



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM AGROECOLOGIA

LAYLA GABRIELLE SILVA OLIVEIRA

ESTRATÉGIAS DE RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA E SUA
INFLUÊNCIA SOBRE A COMUNIDADE DE FUNGOS
MICORRÍZICOS ARBUSCULARES NATIVOS NA AMAZÔNIA
ORIENTAL

São Luís - MA

2023

LAYLA GABRIELLE SILVA OLIVEIRA

Bióloga

ESTRATÉGIAS DE RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA E SUA
INFLUÊNCIA SOBRE A COMUNIDADE DE FUNGOS
MICORRÍZICOS ARBUSCULARES NATIVOS NA AMAZÔNIA
ORIENTAL

Dissertação apresentada ao Curso de
Mestrado do Programa de Pós-
Graduação em Agroecologia da
Universidade Estadual do Maranhão
para obtenção do título de Mestre em
Agroecologia.

Orientador: Prof. Dr. Guillaume
Xavier Rousseau

São Luís - MA

2023

Oliveira, Layla Gabrielle Silva .

Estratégias de restauração ecológica e sua influência sob comunidade de fungos micorrízicos arbusculares nativos na Amazônia oriental / Layla Gabrielle Silva Oliveira. – São Luís, 2023.

53 f

Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Agroecologia) - Universidade Estadual do Maranhão, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Guillaume Xavier Rosseau.

LAYLA GABRIELLE SILVA OLIVEIRA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Agroecologia da Universidade Estadual do Maranhão para obtenção do título de Mestre em Agroecologia.

Orientador: Prof. Dr. Guillaume Xavier Rousseau

Aprovada em: 06 / 03 / 2023

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Guillaume Xavier Rousseau
UEMA

Prof. Dra. Camila Pinheiro Nobre
UEMA - Itapecuru

Prof. Dr. Orlando Carlos Huertas Tavares
UFRRJ

São Luís – MA
2023

Aos meus pais, Jadna e Valbete, que sempre me incentivaram e apoiaram meu crescimento. Ao meu irmão, Guilherme, pelas alegrias e meu namorado, João Carlos, pelo amor, dedico a eles.

AGRADECIMENTOS

Quando finalizamos mais uma etapa do nosso ciclo de vida, observamos que vários nomes contribuíram para que ele pudesse ser realizado. Sendo assim, vou tentar agradecer a todos aqueles que de alguma forma contribuíram e se fizeram presentes.

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado vida, capacidade e força de vontade de vencer.

A meus queridos e amados pais, Valbete e Jadna Silva Oliveira, pelos inúmeros conselhos, incentivos e por sempre acreditaram no meu potencial quando nem mesmo entendiam.

Ao meu querido irmão, Guilherme, por sempre estar ao meu lado e me alegrar.

A meu namorado, João Carlos, que sempre esteve ao meu lado e me suportou e apoiou quando nem mesmo eu me suportava e acreditava.

E toda minha família (avós, tias e tios) todo o cuidado e amor por todo apoio e confiança que depositaram em mim.

A Universidade Estadual do Maranhão e o Programa de Pós-Graduação em Agroecologia pelo valioso conhecimento disponibilizado.

A UEMA e ao CNPq pela concessão da bolsa de estudo.

Agradecimento em especial aos meus orientadores Dr. Guillaume Xavier Rousseau e Camila Pinheiro Nobre pela oportunidade de trabalhar junto e por todo incentivo, ajuda e disposição para que eu pudesse concluir minha pesquisa.

À Luis Manuel Hernández García, por me ajudar durante o projeto, nas coletas, no laboratório, nas análises, na escrita e nas risadas.

Ao meu amigo, Ranney Ritchie, pelas conversas e incentivos.

Aos meus colegas do laboratório de Microbiologia do Solo, em especial Cintya, pelas conversas, risadas e ajuda imprescindível.

Aos meus colegas do curso de Agroecologia que sempre mantiveram o companheirismo, em especial Suzanne.

E a todos aqueles que de alguma forma me ajudaram na minha caminhada acadêmica.

Muito obrigada!

Mas se alguém tem falta de sabedoria, peça a Deus, e ele a dará porque é generoso e dá com bondade a todos.

Tiago 1:5

RESUMO

Os Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA) desempenham papel essencial na nutrição vegetal, resistência a estresses e na regeneração de áreas degradadas. Estudos revelam a abundância e importância dos FMA na região amazônica, incluindo o estado do Maranhão. Este estudo teve por objetivo caracterizar e verificar a resposta das comunidades de fungos micorrízicos arbusculares em função da estratégia de restauração ecológica. Coletas de solo (0-10cm) foram realizadas no final do período seco (outubro e novembro/21), em áreas com diferentes tipos de restauração ecológica: Regeneração Natural (R1), Nucleação (R2) e Sistema Agroflorestal (R3). O delineamento foi em blocos inteiramente casualizado 3x6 (três restaurações x seis blocos) mais adição de 6 parcelas de floresta secundária (SF) para fins comparativos. Foi determinada a densidade de glomerosporos, a comunidade de FMA presentes nas áreas de estudo e os teores de glomalina. Os dados foram avaliados mediante modelos lineares generalizados e aditivos generalizados e, quando significativos, submetidos ao teste de Tukey. A SF apresentou menor densidade de propágulos quando comparada aos demais sistemas de restauração. Os teores de glomalina encontrados não diferiram significativamente entre os sistemas. Foram identificadas 38 espécies de FMA distribuídas em sete famílias e 12 gêneros, sendo o gênero *Glomus* o mais representativo, com a maior riqueza observada na estratégia R1. A composição e a estrutura da comunidade de FMA são influenciadas tanto pelos tipos de restauração quanto pelas variáveis físico-químicas do solo, com os sistemas agroflorestais apresentando maior densidade e riqueza de FMA em comparação com outros tipos de restauração e a floresta secundária. No entanto, a produção de glomerosporos e os teores de glomalina não foram afetados pelos diferentes tipos de restauração.

Palavras-chave:

Glomalina; *Glomeromycota*; micorriza; simbiose.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Densidade de glomerosporos ($50\text{g}^{-1}\text{g}$ de solo) em diferentes sistemas de restauração e floresta secundária. R1: Restauração Natural; R2: Nucleação; R3: Sistema Agroflorestal; SF: Floresta Secundária.* Diferença significativa $p < 0,05$.

Figura 2: Teores de glomalina facilmente extraível (A) e total (B) (mg.g solo^{-1}) em diferentes sistemas de restauração e floresta secundária. R1: Restauração Natural; R2: Nucleação; R3: Sistema Agroflorestal; SF: Floresta Secundária.

Figura 3: Gráfico de ordenação por escalonamento multidimensional não-métrico (NMDS) da composição de espécies de FMAs em resposta as variações físico-químicas em diferentes tipos de restauração, com base nas dissimilaridades de Bray-Curtis entre as amostras (“stress=0,18”). As elipses representam intervalos de confiança (95%). As espécies representam as contribuições significativas para o modelo. R1: Regeneração Natural. R2: Nucleação. R3: Sistema Agroflorestal. SF: Floresta secundária.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Média das propriedades químicas e físicas do solo em diferentes sistemas de restauração e floresta secundária. Trat: Tratamento; R1: Restauração Natural; R2: Nucleação; R3: Sistema Agroflorestal; SF: Floresta Secundária.

Tabela 2: Diversidade, frequência relativa, dominância, valor indicador, significância de fungos micorrízicos arbusculares em diferentes sistemas de restauração e floresta secundária. RN: Restauração Natural; Ilhas: Nucleação; SAF: Sistema Agroflorestal; SF: Floresta Secundária. *Indica diferença significativa

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Aw – Clima tropical, com inverno seco

Cu - Cobre

FESL – Fazenda Escola São Luís

FMA – Fungos Micorrízicos Arbusculares

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

K - Potássio

mm - milímetro

Mg.m – miligrama por grama

pH – Potencial Hidrogeniônico

RPM – Rotação Por Minuto

SAF – Sistema Agroflorestal

SF – Floresta Secundária

Zn - Zinco

μ M - micrômetro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL.....	11
INTRODUÇÃO.....	12
CAPÍTULO I: Revisão bibliográfica	
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
1.1 –Bioma Amazônico.....	14
1.1.1 Amazônia Maranhense.....	14
1.2 – Restauração Ecológica.....	15
1.2.1 – Métodos de Restauração Ecológica.....	16
1.3 – Fungos Micorrízicos Arbusculares - FMA.....	18
1.3.1 – Fungos Micorrízicos Arbusculares na Amazônia.....	20
1.3.2 – Glomalina.....	21
REFERÊNCIAS.....	23
CAPÍTULO II: Estratégias de restauração ecológica e sua influência sobre a comunidade de fungos micorrízicos arbusculares nativos na Amazônia Oriental....	
30	
APÊNDICES	

INTRODUÇÃO GERAL

INTRODUÇÃO

O bioma Amazônia é compartilhado por nove países da América do Sul, com o Brasil abrigando a maior parte dessa área (60%) (Da Silva *et al.*, 2023). Como a maior floresta tropical do mundo, a Amazônia é longe de ser uma floresta homogênea, apresentando gradientes significativos de produtividade, diversidade e características funcionais ao longo de sua extensão (Stegmann *et al.*, 2024; Smith *et al.*, 2021). No entanto, a Amazônia tem sido um centro de mudanças ambientais nas últimas décadas, as taxas de desmatamento aumentaram recentemente e diversas atividades humanas, como a exploração madeireira, incêndios florestais e pesca predatória, têm degradado a floresta remanescente e ameaçado sua biodiversidade (Morais *et al.*, 2024; Smith *et al.*, 2021).

A restauração de ecossistemas degradados é amplamente reconhecida como uma estratégia essencial para enfrentar as mudanças climáticas, o declínio da biodiversidade e os desafios ecológicos e sociais relacionados (Frietsch *et al.*, 2023; IPCC, 2019). Ela pode ser definida como o "processo de interromper e reverter a degradação dos ecossistemas" (IPBES, 2019). E, embora a riqueza e a abundância da vegetação sejam frequentemente utilizadas para avaliar o sucesso da restauração, a restauração ecológica envolve diversas atividades, que vão desde a revegetação até composição de espécies, a estrutura e a função do ecossistema (Hugo *et al.*, 2024; Frietsch *et al.*, 2023). Além disso, a análise microbiológica é particularmente importante, pois os microrganismos podem gerar feedbacks positivos na restauração dos ecossistemas através de interações planta-solo (Da Silva *et al.*, 2023).

Os Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA), pertencentes ao filo *Glomeromycota* (Tedersoo *et al.*, 2018), são cosmopolitas e apresentam biotrofia obrigatória, isto é, apenas completam seu ciclo de vida na presença de uma planta hospedeira através da associação mutualística com as raízes da maioria das espécies de plantas conhecidas (Stürmer; Siqueira, 2013). Também são conhecidos por sua habilidade em aumentar o estado nutricional das plantas através da absorção de nutrientes, especialmente o fósforo, contribuindo no aumento da produtividade (Smith; Read, 1997; Moura *et al.*, 2019). Além disso, estudos demonstraram que os FMA podem melhorar a estrutura do solo, a retenção de nutrientes, aumentar a tolerância à seca e fortalecer a resistência a doenças desempenhando um papel crucial no suporte de serviços ecológicos (Begum *et al.*, 2019; Lutz *et al.*, 2023). Nesse contexto, nossa pesquisa objetivou caracterizar e verificar a resposta das comunidades de fungos micorrízicos arbusculares em função da estratégia de restauração ecológica.

CAPÍTULO I: Revisão bibliográfica

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Bioma Amazônico

A Floresta Amazônica é a maior floresta tropical e representa 45% do total de florestas tropicais do mundo (IBGE, 2011). Ela ocupa aproximadamente 6,5 milhões de km² e estende-se por oito países na América do Sul, sendo aproximadamente 59% do território total da floresta amazônica pertencentes ao Brasil (Rocha *et al.*, 2015).

Devido ao seu clima quente e úmido, com chuvas o ano todo, maior bacia hidrográfica do mundo, solos com baixa fertilidade natural e troca de cátions, além de elevada acidez, a Amazônia apresenta grande diversidade de fisionomias, deixando de lado o conceito da homogeneidade definida para uma grande floresta tropical úmida (Moreira, 2009). Ela é conhecida como abrigo da maior biodiversidade do mundo, tendo um papel imprescindível na manutenção de serviços ecológicos, pois nela podem ser encontradas milhares de espécies animais, vegetais e microrganismos (Delazeri, 2016).

Por causa dessas e outras características o bioma Amazônia é de grande importância para o equilíbrio da Terra, uma vez que 20% das reservas de água doce do planeta vem dos seus rios e ela abriga toneladas de carbono. Além disso sua massa vegetal libera anualmente trilhões de toneladas de água para a atmosfera graças ao processo de evapotranspiração das suas árvores (IBGE, 2011; Delazeri, 2016).

O governo brasileiro, em 1953, como forma de estimular o desenvolvimento e conservação desse bioma criou a Região da Amazônia Brasileira composta pelos Estados do Pará, Acre, Amapá e Rio Branco, e partes dos Estados de Mato Grosso, Goiás e Maranhão, e a região de Guaporé (Martha Júnior *et al.*, 2011).

No ano de 1966, o território da Amazônia brasileira possuía 4,2 milhões de km² e subdividido em duas regiões: Amazônia Oriental, que abrange os Estados do Pará, Maranhão, Amapá, Tocantins e Mato Grosso; e Amazônia Ocidental, que é composta pelos Estados do Amazonas, Acre, Rondônia e Roraima (Serra; Fernandez, 2004; Reyes *et al.*, 2018).

1.1.1 Amazônia Maranhense

No Brasil, o bioma amazônico ocupa 4,2 km², uma área que se estende por nove estados incluindo parte do Maranhão. O Maranhão está situado na porção mais oriental da Amazônia brasileira, conhecida como Amazônia Maranhense, e possui 110,4 mil km², o que representa 27,6% do território do Estado (Celentano *et al.*, 2017).

A Amazônia Maranhense é considerada top 10 nos *hotspot* da restauração, ocupando o terceiro lugar quanto à biodiversidade na Área de Proteção Ambiental (APA) da Baixada Maranhense e sétimo em Ecorregiões na floresta de babaçu (Brancalion *et al.*,

2019). Sendo os babaçuais destaque no percentual de área de cobertura vegetal que compõe o território do bioma Amazônia no Maranhão (Paixão, 2019; Rocha *et al.*, 2019).

Situada na região conhecida como “Arco do Desmatamento”, que começa no Acre e se estende até o oeste do Maranhão, a Amazônia Maranhense sofre com um processo contínuo de desmatamento causando perdas significativas na biodiversidade para fornecer espaço para agricultura e pecuária (Brito; Ilkiu-Borges, 2014; Celentano *et al.*, 2017).

No Maranhão apenas 25% da cobertura vegetal do bioma amazônico é preservada, sendo o estado que possui o menor grau de ocupação do espaço com áreas protegidas, apresentando alto grau de desmatamento e fragmentação florestal e um dos menores índices de desenvolvimento humano do país (Brito; Ilkiu-Borges, 2014; Reyes *et al.*, 2018).

1.2 Restauração Ecológica

Através da Lei 9.985 de 18/07/2000 a recuperação de áreas degradadas é definida como a “restituição de um ecossistema ou de uma população silvestre degradada a uma condição não degradada, que pode ser diferente de sua condição original”. E a restauração como “restituição de um ecossistema ou de uma população silvestre degradada o mais próximo possível da sua condição original” (BRASIL, 2000).

O conceito de restauração ecológica vem amadurecendo e se tornando mais diversos ao decorrer do tempo devido às mudanças tecnológicas e aprimoramento das técnicas. Entretanto um dos conceitos mais aceito é definido pela Sociedade de Restauração Ecológica (SERI, 2004) como “o processo de auxiliar a recuperação de um ecossistema que foi degradado, danificado ou destruído”, com intuito de recuperar suas funções ecológicas, estruturais e composição para garantir o retorno de processos fundamentais ao funcionamento do novo ecossistema, criando um novo hábitat para microrganismos do solo que são de grande importância para a formação e manutenção de comunidades de plantas (Fonseca *et al.*, 2017).

Diferentes são as abordagens, no que se refere às metodologias de restauração, que vão desde aquelas que priorizam a recuperação natural do ecossistema (restauração passiva ou ativa), passando por aquelas mais intensivas que tem por objetivo acelerar o processo por meio da intervenção humana (restauração ativa) (Dellasala *et al.*, 2003). A escolha entre o tipo de restauração deve passar por uma análise que leva em consideração não só o potencial natural de regeneração, mas também o grau de degradação do ecossistema a ser restaurado e seu entorno, além dos custos e benefícios socioambientais envolvidos nesse processo (Durigan *et al.*, 2010; Durigan; Engel, 2015; Trentin, 2018).

1.2.1 Métodos de Restauração Ecológica

- Restauração Passiva

É o método mais simples de restauração e consiste em remover a fonte de perturbação, tendo o cuidado para proteger a área de perturbações externas como fogo e gado. Esse método permite que o ecossistema se recupere espontaneamente através da sucessão natural não necessitando de intervenção humana, sendo o mais indicado quando os recursos financeiros são escassos (Lamb; Gilmour, 2003; Celentano *et al.*, 2011).

O sucesso da restauração passiva ocorre, geralmente, em áreas que antes foram utilizadas na agricultura e pastagem, e onde a colonização e o crescimento da vegetação não são limitados por nenhum fator, ou ainda áreas relativamente pequenas e com presença de fragmentos de vegetação original próximos (Trentin, 2018).

- Restauração Ativa

Em locais onde não há presença de regeneração natural é preciso um esforço para iniciar o processo de restauração chamado de restauração ativa. A restauração ativa é aquela que exige uma ação humana direta tendo por finalidade conduzir, favorecer, direcionar, facilitar e acelerar o processo natural da sucessão ecológica, utilizando espécies nativas nas áreas que sofreram algum tipo de degradação ambiental – degradação do solo provocada pela erosão e a perda da camada superficial, colonização inadequada de espécies ocasionada por pouca dispersão, ou o predomínio de plantas invasoras – e que não tem resiliência para voltarem sozinhas através da sucessão (Brancaion; Gandolfi; Rodrigues, 2015; Andrade *et al.*, 2018).

Um ponto chave nesse tipo de restauração, se tratando da recomposição florística, é a escolha das espécies a serem utilizadas priorizando aquelas que geram benefícios ecológicos e, até mesmo, econômicos dando prioridade as espécies nativas pela facilidade de acelerar a regeneração natural. Outro ponto importante é o método a ser implantado, dentre os quais se encontram reflorestamento ou plantio de mudas, nucleação, o resgate de plântulas oriundas da regeneração natural, a semeadura direta e galharias, sendo o reflorestamento ou plantio de mudas em alta densidade o mais comum e a nucleação o menos dispendioso (Celentano *et al.*, 2011; Andrade *et al.*, 2018).

Nucleação

Segundo Anderson (1953), este método é baseado em dois princípios fundamentais: o primeiro considera que a unidade de plantio deve consistir em um grupo de árvores e o segundo que estas unidades devem ficar espaçadas sobre a área. Em resumo, essa técnica consiste na criação de pequenos habitats/nichos na área degradada por meios de grupos densos ou unidades de plantios de várias composições e estruturas,

com o intuito de induzir a heterogeneidade ambiental mediante intervenções pontuais (WWF - BRASIL, 2017; Paixão, 2019).

Esses grupos ficam espalhados estrategicamente por toda a área se expandindo naturalmente, sempre respeitando os processos sucessionais e ecológicos e, assim, garantindo o fluxo gênico das espécies entre a área degradada e os fragmentos próximos mais preservados com o objetivo de promover os processos de dispersão e regeneração. Além de acelerar o restabelecimento de processos como a ciclagem de nutrientes e o sequestro de carbono (Celentano *et al.*, 2011; WWF - BRASIL, 2017).

Um ponto essencial para garantir o êxito desse tipo de intervenção é a existência de fragmentos remanescentes no entorno da área que está sendo restaurada visando promover a conectividade da paisagem e o restabelecimento dos fluxos biológicos, uma vez que esses remanescentes podem reduzir a competição e estimular a regeneração natural (Coutinho *et al.*, 2019; Paixão, 2019).

Sistemas agroflorestais (SAFs)

Os Sistemas Agroflorestais são sistemas produtivos onde há integração de mudas de espécies arbóreas nativas com culturas agrícolas e/ou pastoreio formando um sistema de produção contínuo e sustentável em uma mesma área, sendo uma opção para proporcionar retorno econômico e criando espaço na restauração na paisagem agrícola. Há diversos tipos de SAFs, que vão desde sistemas simplificados, com poucas espécies e baixa intensidade de manejo, passando por sistemas altamente complexos, com alta biodiversidade e alta intensidade de manejo conforme os aspectos funcionais e estruturais (Micollis *et al.*, 2016; Celentano *et al.*, 2017).

Sua principal caracterização varia de sistemas silviagrícolas (combinação de uma ou mais espécies florestais com culturas agrícolas anuais ou perenes), sistemas silvipastoris (combinação de pastagens e animais com uma ou mais espécies arbóreas), sistemas agrossilvipastoris (associação de animais, geralmente de pequeno porte, com cultivos agrícolas e árvores ou arbustos em uma mesma área) e quintais agroflorestais (combinação de árvores com espécies agrícolas e/ou animais, medicinais e outras de uso doméstico) (Paludo; Costabeber, 2012; Micollis *et al.*, 2016).

A versatilidade dos SAFs permite-lhes o cumprimento de diversas funções, como produção alimentar com fontes de sumidouros do gás carbônico atmosférico (CO₂), estratégia para a redução de desmatamentos, restabelecer a ciclagem de nutrientes, mitigar as mudanças climáticas. Além disso proporciona o estímulo das atividades microbiológicas através da melhoria das propriedades físicas e químicas (Paixão, 2019; Celentano *et al.*, 2020).

Os SAFs são a alternativa mais atrativa e viável para o Maranhão, pois aliam a restauração de processos ecológicos e a segurança alimentar para os pequenos agricultores, com o objetivo de erradicar a pobreza e indicadores socioeconômicos desfavoráveis visando o aumento da qualidade de vida (Celentano *et al.*, 2017). Isso só foi possível porque a Lei Federal nº 12.651 de 2012 admite a exploração agroflorestal em Área de Preservação Permanente (APP) ou Reserva Legal (RL) quando realizada por agricultores familiares e por meio de SAFs, tendo sempre o cuidado de não ultrapassar a taxa de 50% de espécies exóticas permitidas (Celentano *et al.*, 2020).

1.3 Fungos Micorrízicos Arbusculares – FMA

Os seres vivos mais antigos são os microrganismos, cuja origem data de bilhões de anos atrás. Ao longo do processo evolutivo adquiriram características e adaptações para coexistir com outros seres vivos, mantendo relações diversas em forma e função. São conhecidas inúmeras relações biológicas entre os seres vivos, dentre as quais pode-se destacar as simbioses entre plantas e microrganismos heterotróficos, como as micorrizas (Moreira; Siqueira, 2006).

O termo micorriza vem do grego *mykes* = (fungo) e *rhizae* = (raiz) e foi utilizado pela primeira vez por Frank em 1885 (Moreira; Siqueira, 2006) para se referir as associações simbióticas mutualísticas entre os fungos e as raízes das plantas. Muitos pesquisadores acreditam que devido a essa associação as plantas obtiveram maior sucesso ao colonizar o habitat terrestre (Selosse; Le Tacon, 1998).

Nesta associação há uma conexão entre as raízes das plantas e os fungos, onde a planta repassa para o fungo fotoassimilados que vão auxiliar na manutenção e desenvolvimento de novas estruturas morfológicas (Smith; Read, 1997), enquanto o fungo aumenta a produtividade da planta melhorando seu estado nutricional, ampliando sua superfície de contato com o solo como extensão da raiz e otimizando a absorção de água e nutrientes, principalmente dos que são considerados pouco móveis (Silva, 2013; Moura *et al.*, 2019).

As micorrizas arbusculares são importantes não só por promoverem a interface entre a planta e o ambiente físico, mas também com o ambiente biológico, conferindo às plantas maior resistência ao ataque de patógenos e tolerância a estresses bióticos e abióticos, além de influenciar a diversidade vegetal (Laurindo *et al.*, 2020; Miller; Kling, 2000).

Os Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA), pertencentes ao filo *Glomeromycota* (Tedersoo *et al.*, 2018), são cosmopolitas e apresentam biotrofia obrigatória, isto é, apenas completam seu ciclo de vida na presença de uma planta

hospedeira (Bedini *et al.*, 2007; Souza *et al.*, 2011). São relacionados por possuírem baixa especificidade de hospedeiro, podendo colonizar diversas espécies de plantas pertencentes a vários grupos (briófitas, pteridófitas, gimnospermas e angiospermas), em diferentes ecossistemas terrestres que abrangem desde os trópicos até o ártico (Smith; Read, 2008; Stürmer; Siqueira, 2013).

O principal papel dos FMA está associado à nutrição das plantas, sendo o fósforo o principal nutriente disponibilizado por este grupo de fungos (Smith; Smith, 2011; Carrillo-Saucedo *et al.*, 2018). Os FMA são capazes de absorver nitrogênio além de outros elementos como K, Cu e Zn e água graças a rede de micélio presente no solo que tem por função aumentar a área de absorção e transferir esses elementos e água para as raízes fazendo com que uma maior parte do solo seja explorada pelas plantas favorecendo assim seu estabelecimento e desenvolvimento (Saggin-Júnior *et al.*, 1994; Tekaya *et al.*, 2017).

A função dos FMA não se resume somente à nutrição vegetal, mas também está associada a uma diversidade de espécies vegetais maior e ao equilíbrio dos ecossistemas auxiliando na resistência a estresses ambientais e contra ações de patógenos (Berbara *et al.*, 2006; Lenoir *et al.*, 2016; Atakan; Ozkaya, 2021). Os FMA também são essenciais para a regeneração de áreas degradadas pois melhoram a estrutura física e aumentam a agregação do solo, além de possuir uma alta capacidade de reter metais graças a glomalina (Marshall, 1962; Pereira *et al.*, 2014; Lehmann *et al.*, 2017).

Os FMA podem abrandar a limitação existente no crescimento das plantas causada por uma oferta imprópria de nutrientes (Nouri *et al.*, 2014), promovendo assim diversos efeitos na comunidade vegetal, contribuindo para a manutenção das comunidades de plantas (Tawaraya *et al.*, 2003), afetando a composição da comunidade vegetal por sua influência na estruturação vegetal possibilitando uma maior competitividade e sucesso da vegetação contribuindo para a reabilitação de áreas degradadas (Melloni *et al.*, 2003; Klironomos *et al.*, 2011).

Sendo assim, a diversidade e a atividade dos FMA representam um mecanismo chave ao funcionamento dos ecossistemas, principalmente pelo aumento da produtividade da biomassa vegetal e pelo incremento na dinâmica e aporte de nutrientes ao solo via serapilheira, estimulando a cadeia trófica no ecossistema determinando o padrão na estruturação e sucessão da comunidade vegetal evidenciando o potencial biorrecuperador destes fungos (Carneiro *et al.*, 2012; Colodete *et al.*, 2014).

Estudo de Carneiro *et al.* (2012) com fungos micorrízicos arbusculares como indicadores da recuperação de áreas degradadas no nordeste do Brasil evidenciou maior

similaridade entre áreas em recuperação e início de degradação com a mata nativa; e maior dissimilaridade destas com área de maior grau de degradação. Uma outra pesquisa realizada por Colodete *et al.* (2014) para demonstrar a aplicação dos fungos micorrízicos arbusculares na recuperação de áreas impactadas mostrou que os FMA são importantes sensores ambientais e, conseqüentemente, têm grande importância no monitoramento destas áreas.

1.3.1 Fungos Micorrízicos Arbusculares na Amazônia

Atualmente são conhecidas cerca de 352 espécies de FMA a nível global (Goto; Jobim, 2020), sendo 263 com ocorrência no Brasil (Silva *et al.*, 2014), 97 reportadas para a região amazônica (Caproni *et al.* 2003; Leal *et al.*, 2009, 2013; Azevedo *et al.*, 2014) e 70 espécies registradas para o estado do Maranhão (Nobre *et al.*, 2010 – 2018; Reyes *et al.*, 2018; Lima *et al.*, 2020).

Apesar da região amazônica possuir a maior área de floresta tropical do mundo, pouco se conhece da diversidade dos FMA nessa região e seus efeitos no crescimento de plantas. Leal *et al.* (2009) revelam uma abundância na comunidade de FMA em solos em diferentes usos no Alto dos Solimões-Amazônia. Estudos abordando aspectos funcionais das comunidades de FMA revelam a existência de comunidades de fungos com elevada eficiência simbiótica, sendo esta característica influenciada pela origem da comunidade de plantas (Silva, 2009).

O estado do Maranhão apresenta poucos estudos sobre FMA sendo todos os resultados disponíveis concentrados na região do bioma amazônico. Nobre *et al.* (2010) verificaram que o sistema em aleias aumentou o potencial de infectividade dos FMA nativos dependendo da espécie de leguminosa arbórea associada, estação de coleta e distância das árvores. Outro trabalho realizado por Nobre *et al.* (2018) estudando a palmeira babaçu, na periferia oriental da Amazônia, investigaram o FMA como uma possível explicação para o excelente sucesso ecológico desta palmeira. O estudo apontou para uma forte associação micorrízica do babaçu como um mecanismo potencial para seu sucesso ecológico em terras degradadas.

Reyes *et al.* (2018) sugerem que a composição de espécies de FMA, ao longo da sucessão de florestas secundárias na periferia oriental da Amazônia, foi impulsionada principalmente pela sazonalidade e apenas marginalmente pela sucessão. Lima *et al.* (2020) concluíram que a sazonalidade, cobertura vegetal e nível de perturbação afetam a densidade de glomerosporos, a riqueza, atividade e composição da comunidade de FMA.

1.3.2 Glomalina

A glomalina é uma glicoproteína resultante da degradação das hifas e esporos de FMA, que se acumula no solo e tem por principal finalidade a proteção e sobrevivência dos fungos (Lehmann *et al.*, 2017). É considerada uma proteína estável, persistente e abundante no solo, de natureza hidrofóbica, recalcitrante e resistente à degradação pelo calor que garante sua função agregadora forte e correlação com a estabilidade de agregados (Rillig *et al.*, 2003; Prasad *et al.*, 2018).

Dentre as principais funções desta proteína estão o auxílio na proteção das hifas quanto à dessecação e palatabilidade, na aderência das hifas nas superfícies e na agregação das partículas minerais e orgânicas presentes no solo, cuja contribuição é importante na sustentabilidade dos ecossistemas (Lutgen *et al.*, 2003; Peng *et al.*, 2013; Sousa *et al.*, 2012). Além disso, a quantificação da glomalina é um indicador do uso do solo já que é bastante sensível às alterações, sendo considerada um meio rápido e objetivo de demonstrar eventuais mudanças do manejo do solo (Purin; Rillig, 2007; Rillig *et al.*, 2003; Santos *et al.*, 2018).

É notório a contribuição da glomalina para a estocagem de carbono nos solos e estima-se que contribua com 37% de carbono e 4% de nitrogênio em solos tropicais, além de ser um importante componente da matéria orgânica do solo e auxiliar na retenção de água, sendo, portanto, uma determinante chave da qualidade do solo (Atakan; ÖZKAYA, 2021; Nobre *et al.*, 2015).

Usualmente, essa proteína é definida em duas frações, com base na sua facilidade de extração: fração 1, ou facilmente extraível (GFE); e fração 2, ou total (GT) (Wright; Upadhyaya, 1996). A primeira fração se refere à glomalina recentemente depositada pelos fungos e que não sofreu transformações bioquímicas no solo; enquanto que a segunda seria o resultado do acúmulo da primeira ao longo do tempo, sendo mais recalcitrante e fixada em partículas de solo, especialmente nas argilas, e exposto às ações de intemperismo (Wright; Upadhyaya, 1996; Sousa *et al.*, 2012).

Logo, a glomalina é um bom indicador da qualidade e recuperação de solos degradados pois contribui para o desenvolvimento da vegetação melhorando a produtividade de forma sustentável melhorando as características do solo graças a sua forte ligação com as variáveis físico-químicas e também na sua participação nos processos biológicos que acontecem no solo (Purin; Rillig, 2007; Reyes *et al.*, 2018).

Assim, a adoção de agroecossistemas diversificados, com suas práticas de manejo que aumentam a diversidade vegetal e reduzem os distúrbios na estrutura do solo podem contribuir para a produção e manutenção dos estoques de glomalina, principalmente por

beneficiar os FMA. Além disso esses agroecossistemas têm a capacidade de potencializar a síntese da proteína da glomalina aumentando os estoques de carbono no solo, a ciclagem e a biodiversidade na área, tornando esse ambiente mais sustentável sendo um meio promissor na conservação de áreas degradadas (Morales *et al.*, 2005; Tavares, 2011).

REFERÊNCIAS

ANDERSON, M.L. Spaced-Group planting. **Unasyuva**, vol. 7, n. 2. University of Edinburgh, Scotland, 1953.

ANDRADE, G.K.O. et al. Regeneração natural em área de reflorestamento misto com espécies nativas no município de Laranjeiras, SE. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 61, 2018.. <http://dx.doi.org/10.22491/rca.2018.2779>.

ATAKAN, A.; ÖZKAYA, H.O. Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Glomalin. **Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology**, v. 9, n. 12, p. 2371-2375, 2021.

AZEVEDO, J.M.A et al. Richness and frequency of species of arbuscular mycorrhizal fungi in forage peanut genotypes in Acre, northern Brazil, **Acta Amazonica**, v. 44, n. 2, p. 157-168, 2014.

BEDINI, S. et al. Effects of long-term land use on Arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin-related soil protein. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 120, p. 463-466, 2007.

BEGUM, N. et al. Improved Drought Tolerance by AMF Inoculation in Maize (*Zea mays*) Involves Physiological and Biochemical Implications. **Plants**, v. 8, n. 12, p. 579, 6 dez. 2019. DOI: 10.3390/plantas8120579. Disponível: <https://www.mdpi.com/2223-7747/8/12/579>. Acesso: 24 jan. 2024.

BERBARA, R.L.L.; SOUZA, F.A.; FONSECA, H.M.A.C. Fungos Micorrízicos Arbusculares: Muito além da nutrição. In: FERNANDES, M.S. (ed.). **Nutrição Mineral de Plantas**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 53-88, 2006.

BRANCALION, P.H.S et al. Global restoration opportunities in tropical rainforest landscapes. **Science Advances**, v. 5, p. 1-12, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav3223>.

BRANCALION, P.H.S.; GANDOLFI, S.; RODRIGUES, R. R. **Restauração Florestal**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. Disponível em: http://www.lcb.esalq.usp.br/sites/default/files/publicacao_arq/978-85-7975-019-9.pdf.

BRANCALION, P.H.S.; LIMA, L.R.; RODRIGUES, R.R. Restauração ecológica como estratégia de resgate e conservação da biodiversidade em paisagens antrópicas tropicais. **Conservação da biodiversidade em paisagens antropizadas do Brasil**, v. 1, p. 565-587, 2013.

BRASIL. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Brasília, 2000.

BRITO, E. da S.; ILKIU-BORGES, A.L. Briófitas de uma área de Terra Firme no município de Mirinzal e novas ocorrências para o estado do Maranhão, Brasil. **IHERINGIA, Série Botânica**, Porto Alegre, v. 69, n. 1, p. 133-142, 2014.

CAPRONI, A.L. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi occurrence in revegetated areas after bauxite mining at Porto Trombetas, Pará State, Brazil. **Pesquisa Agropecuária**, v. 38, n. 12, p. 1409- 1418, 2003.

CARNEIRO, R.F.V et al. Fungos micorrízicos arbusculares como indicadores da recuperação de áreas degradadas no Nordeste do Brasil. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 43, n. 4, p. 648-657, 2012.

CARRILLO-SAUCEDO, S.M.; GAVITO, M.E.; SIDDIQUE, I. Arbuscular mycorrhizal fungal spore communities of a tropical dry forest ecosystem show resilience to land-use change. **Fungal Ecology**, v. 32, p. 29–39, 2018.

CELENTANO, D. et al. Carbon sequestration and nutrient cycling in agroforestry systems on degraded soils of Eastern Amazon, Brazil, **Agroforestry Systems**, 2020. DOI: [10.1007/s10457-020-00496-4](https://doi.org/10.1007/s10457-020-00496-4).

CELENTANO, D. et al. Towards zero deforestation and forest restoration in the Amazon region of Maranhão state, Brazil. **Land Use Policy**, 2017.

CELENTANO, D. et al. Restauración ecológica de bosques tropicales en Costa Rica: efecto de varios modelos en la producción, acumulación y descomposición de hojarasca. **Rev. Biol. Trop.** (Int. J. Trop. Biol. ISSN-0034-7744), v. 59, n. 3, p. 1323-1336, 2011.

COLODETE, C.M.; DOBBSS, L.B.; RAMOS, A.C. Aplicação das micorrizas arbusculares na recuperação de áreas impactadas. **Natureza on line**. v. 12, n. 1, p. 31-37, 2014.

COUTINHO, P.R.O.S et al. Restauração passiva em pastagens abandonadas a partir de núcleos de vegetação na Mata Atlântica, Brasil. **Revista Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, 2019.

DA SILVA, C.M. et al. The potential for forest landscape restoration in the Amazon: state of the art of restoration strategies. **Restoration ecology**, v. 31, n. 5, 2023. <https://doi.org/10.1111/rec.13955>

DELLASALA, D.A et al. A citizen's call for ecological forest restoration: forest restoration principles and criteria. **Ecological Restoration**, v. 21, p. 14–23, 2003.

DELAZERI, M. Determinantes do desmatamento nos municípios do Arco Verde – Amazônia Legal: uma abordagem econométrica. **Revista Economia e Ensaios**, v. 30, n. 2, p. 11-34, 2016.

DURIGAN, G.; ENGEL, V.L. Restauração de ecossistemas no Brasil: onde estamos e para onde podemos ir? In: MARTINS, S.V. (ed.). **Restauração ecológica de ecossistemas degradados**. 2.ed. Viçosa: Editora UFV, p. 42-69, 2015.

DURIGAN, G. et al. Normas jurídicas para a restauração ecológica: uma barreira a mais a dificultar o êxito das iniciativas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, p. 471-485, 2010.

FONSECA, D.A. et al. Avaliação da regeneração natural em área de restauração ecológica e mata ciliar de referência. **Revista Ciência Florestal**, v. 27, n. 2, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509827733>.

FRIETSCH, M. et al. Future-proofing ecosystem restoration through enhancing adaptive capacity. **Commun Biol**, v. 6, n. 377, 2023. <https://doi.org/10.1038/s42003-023-04736-y>

GOTO, B.T.; JOBIM, K. Laboratório de Biologia de Micorrizas. Disponível em: < <http://glomeromycota.wixsite.com/lbmicorrizas> >. Acesso em: 09/09/2022.

HUGO, F. et al. The Distance to Reference Communities Index (DRCI): a new tool to assess communities' restoration success. **Restoration ecology**, 2024. <https://doi.org/10.1111/rec.14194>

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 2011. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acesso: agosto de 2022.

IPCC. **Climate Change and Land: an IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems** (IPCC, 2019).

IPBES, 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. **Population and development review**, v. 45, n. 3, p. 680–681, 2019. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6417333>

JESSICA et al. The Changing Amazon Hydrological Cycle—Inferences From Over 200 Years of Tree-Ring Oxygen Isotope Data. **Journal of geophysical research. Biogeosciences**, v. 127, n. 10, 1 out. 2022.

KLIRONOMOS, J. et al. Forces that structure plant communities: Quantifying the importance of the mycorrhizal symbiosis. **New Phytol**, v. 189, p. 366–370, 2011.

LAMB, D.; GILMOUR, D. Rehabilitation and restoration of degraded forests. **Issues in forest conservation**. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources and The World Wide Fund for Nature. Inglaterra, 2003.

LAURINDO, L.K. et al. Fungos micorrízicos arbusculares. In: TANCREDO, S.L. (Ed.), **Indicadores da Qualidade do Solo em Sistemas Agroflorestais e Ecossistemas Associados**. PPGEAN, Curitiba, p.7-27, 2020.

LEAL, P.L.; STÜRMER, S.L.; SIQUEIRA, J.O. Occurrence and diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in trap cultures from soils under different land use systems in the Amazon, Brazil. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v. 40, n. 1, p. 111-121, 2009.

LENOIR, I.; FONTAINE, J.; SAHRAOUI, A.L.H. Arbuscular mycorrhizal fungal responses to abiotic stresses: A review. **Phytochemistry**, 2016.

LEHMANN, A.; RILLIG, M.C. Understanding mechanisms of soil biota involvement in soil aggregation: a way forward with saprobic fungi? **Soil Biology and Biochemistry**, v. 88, p. 298– 302, 2017.

LIMA, M.D.B. et al. Fungos micorrízicos arbusculares em diferentes vegetações no município de São Luís, Maranhão. **Estudos Ambientais e Agronômicos - Resultados para o Brasil vol.02**, Editora: Editora Pascal, 2020.

LUTGEN, E.R.; MUIR-CLAIRMONT, D.; GRAHAM, J.; RILLIG, M.C. Seasonality of arbuscular mycorrhizal hyphae and glomalin in a western Montana grassland. **Plant and Soil**, The Hague, v.257, n.1, p.71-83, 2003.

LUTZ, S. et al. Soil microbiome indicators can predict crop growth response to large-scale inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi. **Nature Microbiology**, v. 8, n. 12, p. 2277–2289, 1 dez. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41564-023-01520-w>. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41564-023-01520-w#citeas>>. Acesso em 23 out. 2023.

MARSHALL, T.L. **The nature, development and significance of soil structure**. In: NEALE, G.J., ed. Transactions of joint meeting of commissions, 4 & 5. (ISSS). Palmerston North, New Zealand, p.243-257, 1962.

MARTHA JÚNIOR, G.B.; CONTINI, E.; NAVARRO, Z. **Caracterização da Amazônia Legal e macrotendências do ambiente externo**. p. 50, 2011.

MELLONI, R.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Fungos micorrízicos arbusculares em solos de área de mineração de bauxita em reabilitação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 38, n. 2, p. 267-276, 2003.

MICOLLIS, A. et al. Restauração Ecológica com Sistemas Agroflorestais: como conciliar conservação com produção. Opções para Cerrado e Caatinga. **Instituto Sociedade, População e Natureza – ISPN/Centro Internacional de Pesquisa Agroflorestal – ICRAF**. Brasília, 2016.

MILLER, R.M.; KLING, M. The importance of integration and scale in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. **Plant Soil**, v. 226, p. 295-309, 2000.

MORALES, A.L. et al. Niveles de glomalina em suelos de dos ecosistemas del sur de Chile. **Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal**, v. 5, p. 37-45, 2005.

MOREIRA, F.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. Editora UFLA, Lavras, MG, Brasil, 2006.

MOURA, J.B. et al. Arbuscular Mycorrhizal Fungi Associated with Bamboo Under Cerrado Brazilian Vegetation. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, n. 4, p. 954- 962, 2019.

NOBRE, C.P. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi associated with the babassu palm (*Attalea speciosa*) in the eastern periphery of Amazonia, Brazil. **Acta Amazonica**, v. 48, n. 4, p. 321-329, 2018.

NOBRE, C.P. et al. Fungos micorrízicos arbusculares em sistema de aléias no Estado do Maranhão, Brasil. **Acta Amazonica**, v. 40, p. 641-646, 2010.

NOBRE, C.P. et al. Agregação, glomalina e carbono orgânico na chapada do Araripe, Ceará, Brasil. **Revista Caatinga**, v. 28, p. 138-147, 2015.

NOURI, E. et al. **Phosphorus and nitrogen regulate arbuscular mycorrhizal symbiosis in petunia hybrida**, 2014.

PAIXÃO, L.R.R.S. **Efeito de diferentes estratégias de restauração sobre o estoque de carbono na Amazônia maranhense**. Dissertação (Mestre em Agroecologia), Universidade Estadual do Maranhão, 2019.

PALUDO, R.; COSTABEBER, J.A. Sistemas agroflorestais como estratégia de desenvolvimento rural em diferentes biomas brasileiros. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 7, n. 2, p. 63-76, 2012.

PENG, S.; GUO, T.; LIU, G. The effects of arbuscular mycorrhizal hyphal networks on soil aggregations of purple soil in southwest China. **Soil Biology and Biochemistry**, v.57, p. 411 – 417, 2013.

PEREIRA, C.M.R. et al. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in Atlantic forest areas under different land uses. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.185, p. 245-252, 2014.

PRASAD, M.; CHAUDHARY, M.; RAMAKRISHNAN, S.; MAHAWER, S.K. Glomalin: A miracle protein for soil sustainability. **Indian Farmer**, v. 5, n. 09, p. 1092-1100, 2018.

PURIN, S.; RILLIG, M.C. The arbuscular mycorrhizal fungal protein glomalin: Limitations, progress, and a new hypothesis for its function. **Pedobiologia**, v. 51, n. 2, p. 123-130, 2007.

REYES, H.A et al. Arbuscular mycorrhizal fungi along secondary forest succession at the eastern periphery of Amazonia: Seasonal variability and impacts of soil fertility. **Applied Soil Ecology**, 2018.

RILLIG, M.C. et al. Glomalin, an arbuscular-mycorrhizal fungal soil protein, responds to land-use change. **Plant and Soil**, v. 253, p. 293–299, 2003.

ROCHA, A.E. et al. **Sumário Executivo do Zoneamento Ecológico Econômico do Estado do Maranhão – ZEE**. Etapa bioma amazônico. São Luís- MA, IMESC, p.312-330, 2019.

ROCHA, V.M.; CORREIA, F.W.S.; FONSECA, P.A.M. Reciclagem de precipitação na Amazônia: um estudo de revisão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 1, p. 59-70, 2015.

SAGGIN-JÚNIOR, O.J et al. Interação fungos micorrízicos versus superfosfato e seus efeitos no crescimento e teores de nutrientes do cafeeiro em solo não fumigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 18, p. 27-36, 1994.

SANTOS, V.L.S. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi community and glomalin in dry forest ecosystems, Brazil. **Revista de la Facultad de Agronomía**, La Plata, v. 117, n. 1, p. 13-21, 2018.

SELOSSE, M.A; LE TACON, F. The land flora: a phototroph–fungus partnership? **Trends in Ecology & Evolution**, v. 13, p. 15-20, 1998.

SERRA, M.A.; FERNANDEZ, R.G. **Perspectivas de desenvolvimento da Amazônia: motivos para o otimismo e para o pessimismo.** *Economia e Sociedade*, v. 2, n. 2, p. 107-131, 2004.

SERI - Sociedade Internacional para a Restauração Ecológica. **Princípios da SER International sobre a restauração ecológica.** Grupo de Trabalho sobre Ciência e Política (Versão 2). Traduzido, português, 2004.

SILVA, F.C. **Atributos químicos e biológicos em cava de extração de argilas revegetadas com leguminosas e eucalipto.** Tese (Doutorado em Produção Vegetal). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2009.

SILVA, C.F. et al. Comunidade de fungos micorrízicos arbusculares: diversidade, composição e glomalina em área revegetada com sesbânia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, p. 423-431, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200007>.

SILVA, V.C. **Influência de fungos micorrízicos arbusculares no crescimento e produção de óleo essencial em Mentha X Piperita L. var. Citrata (EHRH.) BRIQ.** Dissertação (Mestre em Produção Vegetal), Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2013.

SMITH, C.C. et al. Old-growth forest loss and secondary forest recovery across Amazonian countries. *Environmental research letters*, v. 16, n. 8, p. 085009, 2021. 10.1088/1748-9326/ac1701

SMITH, S.; READ, D. **Mycorrhizal Symbiosis**, 3rd edition. Cambridge University Press, Cambridge, p. 800, 2008.

SMITH, S.E.; READ, D.J. **Mycorrhizal symbiosis.** Academic Press, New York, p. 605, 1997.

SMITH, S.E.; SMITH, F.A. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: new paradigms from cellular to ecosystem scales. *Annual Review of Plant Biology*, v. 62, p. 227-250, 2011.

SOUSA, C.S. et al. Glomalina: características, produção, limitações e contribuição nos solos. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 33, suplemento 1, p. 3033-3044, 2012. DOI: [10.5433/1679-0359.2012v33Sup1p3033](https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33Sup1p3033).

SOUZA, F.A.; GOMES, E.A.; VASCONCELOS, M.J.V.; SOUSA, S.M. **Micorrizas arbusculares: perspectivas para aumento da eficiência de aquisição de fósforo (P) em Poaceae (gramíneas).** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2011.

STEGMANN, L.F. et al. Brazilian public funding for biodiversity research in the Amazon. *Perspectives in ecology and conservation*, v. 22, n. 1, p. 1-7, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2024.01.003>.

STÜRMER, S.L.; SIQUEIRA, J.O. Fungos Micorrízicos. In: MOREIRA, F.M.S.; CARES, J. E.; ZANETTI, R.; STÜRMER, S.L. **O Ecossistema solo: componentes, relações ecológicas e efeitos na produção vegetal.** Lavras: Editora UFLA, p. 289-311, 2013.

TAVARES, R.C. **Funcionalidade das micorrizas arbusculares em cafezais agroecológicos**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, 2011.

TAWARAYA, K. et al. Arbuscular mycorrhizal colonization of tree species grown in peat swamp forests of Central Kalimantan, Indonesia. **Forest Ecology and Management**, v. 182, p. 381-386, 2003.

TEDERSOO, L. et al. High-level classification of the Fungi and a tool for evolutionary ecological analyses. **Fungal Diversity**, 2018.

TEKAYA, M. et al. Arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis* influences key physiological parameters of olive trees (*Olea europaea* L.) and mineral nutrient profile. **Photosynthetica**, v. 55, n. 2, p. 308-316, 2017.

TRENTIN, B.E. **A nucleação como alternativa à restauração passiva ao reflorestamento com nativas para a restauração florestal**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal), Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2018.

WRIGHT, S.F.; UPADHYAYA, A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. **Soil Science**, v. 161, n.8, p. 575–586, 1996.

WWF – Brasil. **Restauração Ecológica no Brasil: Desafios e Oportunidades**, 2017.

**CAPÍTULO II: Estratégias de restauração ecológica e sua influência
sobre a comunidade de fungos micorrízicos arbusculares nativos na
Amazônia Oriental**

**Artigo estruturado conforme padrão da Revista Brasileira de Ciência
do Solo**

Estratégias de restauração ecológica e sua influência sobre a comunidade de fungos micorrízicos arbusculares nativos na Amazônia Oriental

Layla Gabrielle Silva Oliveira ^{(1)*} <https://orcid.org/0009-0007-9391-2007>, Luis Manuel Hernández García ⁽¹⁾, Camila Pinheiro Nobre ⁽¹⁾ <https://orcid.org/0000-0001-8137-7456>, Cintya Ferreira Santos ⁽¹⁾ <https://orcid.org/0000-0001-8556-1787>, Guillaume Xavier Rousseau ⁽¹⁾ <https://orcid.org/0000-0002-2482-4376>

1. Programa de Pós-Graduação em Agroecologia, Universidade Estadual do Maranhão, São Luis, Brasil

RESUMO

Os fungos micorrízicos arbusculares, pertencentes ao filo *Glomeromycota*, possuem papel chave nos ecossistemas, principalmente devido à associação realizada com maioria das plantas conhecidas, resultando em melhorias nutricionais e aumento de resistência a estresses bióticos e abióticos, auxiliando na recuperação de ambientes sob interferência humana. Este estudo teve por objetivo caracterizar e verificar a resposta das comunidades de fungos micorrízicos arbusculares em função da estratégia de restauração ecológica. Coletas de solo (0-10cm) foram realizadas no final do período seco (outubro e novembro/21), em áreas com diferentes tipos de restauração ecológica: Regeneração Natural (R1), Nucleação (R2) e Sistema Agroflorestal (R3). O delineamento foi em blocos inteiramente casualizado 3x6 (três restaurações x seis blocos) mais adição de 6 parcelas de floresta secundária (SF) para fins comparativos. Foi determinada a densidade de glomerosporos, a comunidade de FMA presentes nas áreas de estudo e os teores de glomalina. Os dados foram avaliados mediante modelos lineares generalizados e aditivos generalizados e, quando significativos, submetidos ao teste de Tukey. A SF apresentou menor densidade de propágulos quando comparada aos demais sistemas de restauração. Os teores de glomalina encontrados não diferiram significativamente entre os sistemas. Foram identificadas 38 espécies de FMA distribuídas em sete famílias e 12 gêneros, sendo o gênero *Glomus* o mais representativo, com a maior riqueza observada na estratégia R1. A composição e a estrutura da comunidade de FMA são influenciadas tanto pelos tipos de restauração quanto pelas variáveis físico-químicas do solo, com os sistemas agroflorestais apresentando maior densidade e riqueza de FMA em comparação com outros tipos de restauração e a floresta secundária. No entanto, a produção de glomerosporos e os teores de glomalina não foram afetados pelos diferentes tipos de restauração.

Palavras-chave:

Glomalina; *Glomeromycota*; micorriza; simbiose.

INTRODUÇÃO

As florestas tropicais contribuem com a maior biodiversidade do planeta e oferecem uma ampla variedade de benefícios e bem-estar à humanidade (Barlow et al., 2018). Elas são as florestas mais produtivas, com as maiores taxas de movimentação de carbono de todos os ecossistemas terrestres e fornecem serviços ecossistêmicos vitais, como o ciclo hidrológico, alimentos, energia, a regulação da qualidade do ar e do clima (Esquivel-Muelbert et al., 2020; Hubau et al., 2020). Apesar de sua enorme importância e relevância a Floresta Amazônica, maior floresta tropical do planeta, vem sofrendo ao longo dos últimos anos com a perda e fragmentação dos habitats, resultantes principalmente do aumento dos impactos humanos relacionados ao aumento da exploração madeireira ilegal, desmatamento e conversão das áreas florestadas em manejadas, terras agrícolas e pastagens (Barlow et al., 2018; da Cruz et al., 2020). Dentro deste contexto, se torna necessário desenvolver estratégias de restauração ecológica que visam mitigar os impactos provenientes das ações antrópicas (Rothmund et al., 2019).

A restauração ecológica é uma ciência aplicada com o objetivo de restabelecer as interações equilibradas entre componentes abióticos e bióticos de áreas degradadas, permitindo adaptações às mudanças locais e globais, bem como a persistência e evolução de suas espécies componentes (Rosenfield; Müller, 2020; Buss et al., 2021). Embora a riqueza e abundância da vegetação sejam os índices mais comumente utilizados para avaliar o sucesso da restauração, é importante ressaltar que o processo de restauração de uma área vai muito além da reconstituição florística (Wortley et al. 2013; Hugo et al., 2024). Para que o sistema como um todo se torne autossuficiente, é fundamental estabelecer relações ecológicas que contribuam para sua recuperação e estabilidade. Entre essas relações estão as associações micorrízicas (Berude et al., 2015; Hnini et al., 2024).

Os Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA), pertencentes ao filo *Glomeromycota* (Tedersoo et al., 2018), são cosmopolitas e apresentam biotrofia obrigatória, isto é, apenas completam seu ciclo de vida na presença de uma planta hospedeira através da associação mutualística com as raízes da maioria das espécies de plantas conhecidas (Stürmer; Siqueira, 2013). São conhecidos por sua habilidade em aumentar o estado nutricional das plantas através da translocação de água e nutrientes do solo para as raízes das plantas, especialmente o fósforo (Smith; Read, 1997; Hnini et al., 2024). Além disso, estudos demonstraram que os FMA podem melhorar a estrutura do solo, através da produção da glomalina que auxilia na coesão das partículas minerais e orgânicas e contribui para a retenção de nutrientes, aumentar a tolerância à seca e

fortalecer a resistência a doenças desempenhando um papel crucial no suporte de serviços ecológicos (Begum et al., 2019; Al-Arjani et al., 2020; Chamkhi et al., 2021; Lutz et al., 2023).

Comparar as trajetórias das comunidades em regeneração com os padrões das áreas de referência permite inferir sobre a regeneração de determinadas espécies ou grupos funcionais (Suganuma et al., 2014; Fonseca et al., 2017). Assim, o levantamento da comunidade de FMA é primordial para a elaboração de ações estratégicas para conservação e recuperação ambiental e, devido a importância do bioma amazônico, em especial os remanescentes florestais em território maranhense e aos escassos estudos sobre a comunidade de FMA no estado, nosso estudo objetivou caracterizar e verificar a resposta das comunidades de fungos micorrízicos arbusculares em função da estratégia de restauração ecológica.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi realizado nos municípios de São Luís e São José de Ribamar. As áreas de restauração encontram-se localizadas na Fazenda Escola (FESL), nas dependências da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), em São Luís (2°35'27.1"S, 44°12'33.8"W). Remanescentes de florestas secundárias avançadas encontram-se tanto na Fazenda Escola quanto no Sítio Aguahy. Este último é propriedade da Companhia Farmacêutica Quercegen Agronegócios I Ltda (02°29'26"S, 44°19'17"W), localizado no município de São José de Ribamar.

A temperatura média local é de aproximadamente 27 °C, e as médias máximas e mínimas oscilam entre 28–33° e 20–23°C, respectivamente. O clima da região é do tipo Aw, segundo Köppen, caracterizado por apresentar um clima tropical chuvoso com precipitação média de 2.100 mm/ano e duas estações bem definidas, uma chuvosa que se estende de janeiro a junho e uma seca que vai de julho a dezembro (Instituto Nacional de Meteorologia, 2023). Os solos são altamente intemperizados, arenosos e ácidos classificados como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrocoeso Arênico, com textura franco-arenosa (Santos et al., 2018).

Desenho experimental e amostragem

A área do experimento é delimitada por 18 parcelas permanentes de 30 x 30 metros, implantadas em 6 blocos com 3 tratamentos cada. Os tratamentos correspondem a três modelos de restauração ecológica: a regeneração natural (R1), restauração florestal através da Nucleação (R2) e um sistema agroflorestal (R3). Amostras de solos foram

coletadas também em seis parcelas representadas por florestas secundárias (SF) avançadas da região para fins comparativos.

As coletas foram realizadas na época seca (outubro e novembro/2021). Em cada área, de forma aleatória, foram coletadas amostras compostas de solo (duplicata) na profundidade 0-10 cm. As amostras foram levadas aos laboratórios de física e química do solo da Universidade Estadual do Maranhão e analisadas seguindo rotinas descritas em Embrapa (1997).

Tabela 1: Média das propriedades químicas e físicas do solo em diferentes sistemas de restauração e floresta secundária. Trat: Tratamento; R1: Restauração Natural; R2: Nucleação; R3: Sistema Agroflorestal; SF: Floresta Secundária.

Trat	MOS	pH	P	K	Ca	Mg	H+Al	Na	Al	H	C	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Umidade	Dens Ap
	g/dm ³	CaCl ₂	mg/dm ³	mmol/dm ³												%	g/cm ³
R1	20,67	4,46	3,87	2,04	14,50	8,33	31,99	3,79	2,17	41	13,2	24	49	16	11	4	1
R2	19,52	4,28	2,60	2,12	11,17	11,17	33,14	3,83	3,17	38	11,7	28	53	9	11	5	1
R3	21,15	4,50	4,52	2,09	19,50	10,83	29,00	4,32	1,67	30	13,4	29	53	8	9	8	1
SF	24,70	4,31	3,17	2,29	19,67	11,83	41,60	4,51	4,50	52	16,0	24	59	8	10	5	1

Extração e taxonomia de FMA

Os glomerosporos de FMA foram extraídos de amostras de 50 g de solo segundo metodologia de peneiramento úmido (Gedermann; Nicolson, 1963) e centrifugação com sacarose (Jenkins, 1964). Os esporos viáveis foram contados em placa canaleta com auxílio de lupa esteriomicroscópio, montados em lâminas sob resina polivinil álcool glicerol (PVLG) e PVLG+Reagente de Melzer. A identificação foi realizada segundo a classificação proposta por (Oehl et al., 2011) complementado com os novos táxons descritos posteriormente (Goto et al., 2012; Błaszowski; Chwat, 2013).

Extração e quantificação de glomalina

Foram ainda extraídos os teores de glomalina destes solos, fração facilmente extraível – EE-BRSP e fração total – BRSP de acordo com a metodologia proposta por Wright e Upadhyaya (1996). Os teores da fração da glomalina foram quantificados pelo método de determinação de proteínas Bradford (Bradford, 1976) com uso de espectrofotômetro e a curva padrão será construída com albumina bovina (BSA – Sigma Aldrich®).

Análise estatística

Densidade de glomerosporos e teores de glomalina

O efeito do tipo de restauração sobre a densidade de glomerosporos, BRSP e EE-BRSP foi analisado mediante modelos lineares generalizados (GLM) usando a distribuição mais recomendada segundo a natureza dos dados e priorizando a diminuição

da variância residual do modelo (Zuur, 2009). O teste de HSD-Tukey foi usado para comparação de médias com nível de significância de 5%. As relações entre variáveis ambientais e as variáveis microbiológicas foram avaliadas mediante análises exploratórias de correlação seguida de regressão com modelo aditivo generalizado (GAM) para aquelas com maior ajuste e significância. As análises foram realizadas usando o pacote MGCV (Wood, 2017).

Estrutura da comunidade de FMA

A frequência de isolamento das espécies foi calculada e classificada como 'dominante' (d; frequência > 50%), 'mais comum' (mc; frequência 31-50%), 'comum' (c; frequência 10-30%) e 'rara' (r; frequência < 10%) (Zhang et al. 2004). Para identificar espécies potenciais indicadoras, foi estimado o "Índice de Valor Indicador" (Dufrêne; Legendre, 1997), utilizando o pacote "labdsv" (Roberts, 2019). Uma espécie é considerada indicativa de uma categoria ou condição específica quando o índice estimado é $> 40\%$ e $p < 0,05$ (Kubosova et al. 2010).

Uma NMDS (Kruskal, 1964) foi conduzida para determinar a relação das variáveis ambientais com a dissimilaridade das comunidades de espécies em cada tipo de restauração e as florestas secundárias de referência. As variáveis ambientais mais importantes ($P \leq 0,05$) que explicaram a comunidade de fungos micorrízicos arbusculares foram selecionadas automaticamente por um processo iterativo (499 permutações), minimizando os valores de estresse (Borcard et al. 2018). Variáveis significativas colineares foram excluídas de acordo com os critérios do Fator de Inflação da Variância (VIF) para obter valores inferiores a 10 (Borcard et al., 2011). As variáveis ambientais não colineares selecionadas foram usadas para construir o modelo final. A significância do efeito do tipo de regeneração sobre a comunidade de FMA foi testada por Análises Multivariado permutativo das variâncias (PerMANOVA) com 499 permutações sobre a matriz de distância de Bray-Curtis (McArdle; Anderson, 2001). Intervalos de confiança de 95% foram usados para representar o efeito dos tratamentos na ordenação das espécies e variáveis ambientais do modelo final. As análises foram realizadas usando o pacote VEGAN (Oksanen et al. 2022) na linguagem R versão 4.2.2 (R Core Team 2023).

RESULTADOS

Densidade de glomerosporos

O número total de glomerosporos variou acentuadamente, com a floresta secundária apresentando menor abundância que as áreas de restauração, e a área de sistema florestal apresentando menor número quando comparado os sistemas de restauração entre si (Figura 1).

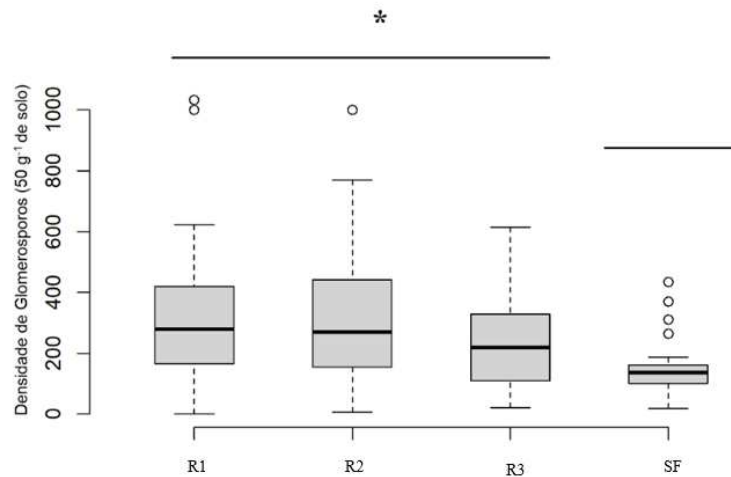


Figura 1: Densidade de glomerosporos ($50\text{g}^{-1}\text{g}$ de solo) em diferentes sistemas de restauração e floresta secundária. R1: Restauração Natural; R2: Nucleação; R3: Sistema Agroflorestal; SF: Floresta Secundária. * Diferença significativa $p < 0,05$.

Teores de glomalina

Os teores de glomalina facilmente extraível (EE-BRSP) e total (BRSP) encontrados no presente estudo possuíram comportamento semelhante não diferindo significativamente mesmo entre os sistemas (Figura 2).

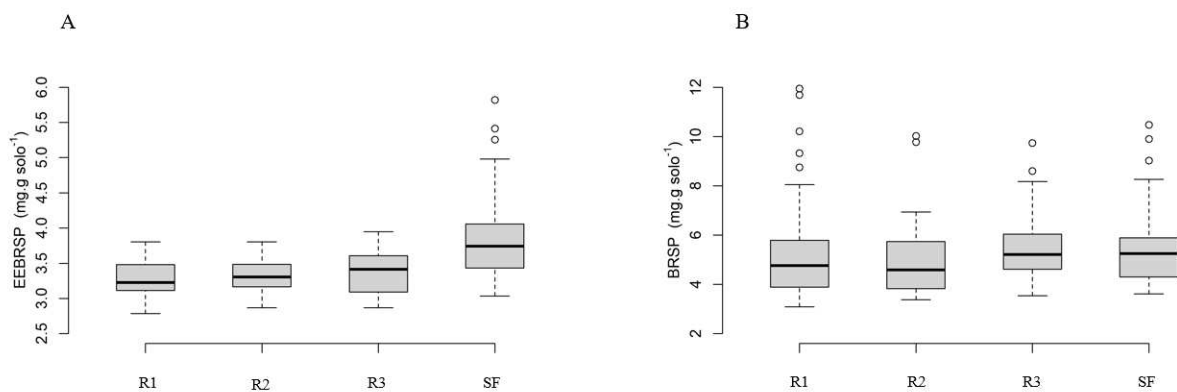


Figura 2: Teores de glomalina facilmente extraível (A) e total (B) (mg.g solo^{-1}) em diferentes sistemas de restauração e floresta secundária. R1: Restauração Natural; R2: Nucleação; R3: Sistema Agroflorestal; SF: Floresta Secundária.

Composição e estrutura da comunidade de FMA

Em todas as áreas foram identificados um total de 38 morfoespécies de FMA, distribuídas em sete famílias e 12 gêneros (Tabela 2). Dos gêneros registrados, os mais representativos em relação ao número de espécies, foram *Glomus* e *Acaulospora* com 16 e nove espécies, respectivamente. Todos os gêneros ocorreram nas áreas de restauração, apenas o gênero *Ambispora* não foi encontrado na SF. As famílias Ambisporaceae e Gigasporaceae só apresentaram uma representante.

Ao todo 17 espécies tiveram ocorrência generalizada. Entre elas podemos destacar as mais abundantes: *G. glomerulatum*, *G. macrocarpum*, *G. sp ambisporum*, *F. geosporum* e *A. morrowiae*. No presente estudo, *F. heterogama* e *G. taiwanensis* foram exclusivas da R1. Enquanto *A. excavata*, *C. sp* e *G. clavisporum* do R3 e, *G. sp pachyscaule* da SF. Apenas R2 não apresentou espécie exclusiva.

Das 38 espécies de FMA, *G. glomerulatum* e *G. macrocarpum* foram dominantes em todos os sistemas estudados. Enquanto que *A. rehmi*, *D. scutata*, *G. spinuliferum*, *G. rubiforme*, *R. sp clarum*, *S. sinuosa* e *R. gregaria* foram classificadas como comum. As demais espécies tiveram frequência de ocorrência variando entre dominante, comum e muito comum de acordo com o ambiente em que foi encontrada.

No total onze espécies foram identificadas como indicadoras para diferentes tipos de restauração (Tabela 2). Sete são indicadoras exclusivamente de R3 (*A. excavata*, *A. scrobiculata*, *G. sp1*, *S. sinuosa*, *C. pelucida*, *R. gregaria* e *S. calospora*), três de SF (*D. scutata*, *G. ambisporum* e *O. pernambucana*), e uma de R2 (*F. geosporum*). Uma análise do valor indicador das espécies mostra que as características físico-químicas são determinantes na ordenação espacial obtida, já que em ausência delas só *A. scrobiculata* e *G. ambisporum* coincidem em ocorrência nas áreas preditas pelo ambiente.

Tabela 2: Diversidade, frequência relativa, dominância, valor indicador, significância de fungos micorrízicos arbusculares em diferentes sistemas de restauração e floresta secundária. R1: Restauração Natural; R2: Nucleação; R3: Sistema Agroflorestral; SF: Floresta Secundária. * Indica diferença significativa.

Espécies	Frequência Relativa				Dominância				Valor Indicador			Significância		Indicador	
	R1	R2	R3	SF	R1	R2	R3	SF	R1	R2	R3	SF	p	Sig	Ind
Acaulosporaceae															
<i>A. excavata</i> Ingleby & C. Walker	0	0	0,22	0	-	-	c	-	0	0	0,222	0	0,001	***	R3
<i>A. Trappe & Janos</i>	0,42	0,31	0,39	0,03	mc	c	mc	c	0,148	0,08	0,143	0,001	0,201	-	-
<i>A. herrerae</i> Furrázola, B.T. Goto, G.A. Silva, Sieverding & Oehl	0,11	0,14	0,14	0	c	c	c	-	0,032	0,037	0,061	0	0,512	-	-
<i>A. mellea</i> Spain & N.C. Schenck	0,03	0,06	0	0	c	c	-	-	0,009	0,037	0	0	0,493	-	-
<i>A. morrowiae</i> Spain & N.C. Schenck	0,36	0,44	0,31	0,07	mc	mc	c	c	0,14	0,132	0,09	0,001	0,321	-	-
<i>A. reducta</i> Oehl, B.T. Goto & C.M.R. Pereira	0,06	0,03	0,06	0	c	c	c	-	0,012	0,003	0,037	0	0,499	-	-
<i>A. rehmi</i> Sieverd & Toro	0,08	0,08	0,14	0,03	c	c	c	c	0,021	0,021	0,06	0,002	0,337	-	-
<i>A. scrobiculata</i> Trappe	0,28	0,39	0,75	0,03	c	mc	d	c	0,023	0,046	0,596	0	0,001	***	R3
<i>A. spinosa</i> C. Walker & Trappe	0,19	0,11	0,03	0	c	c	c	-	0,072	0,063	0,002	0	0,314	-	-
Ambisporaceae															
<i>A. appendicula</i> (Spain, Sieverd., N.C. Schenck) C. Walker	0,14	0,08	0,14	0	c	c	c	-	0,06	0,011	0,06	0	0,422	-	-
Dentiscutataceae															
<i>D. scutata</i> (C. Walker & Diederichs) Sieverding, F.A. Souza & Oehl	0,08	0,03	0,14	0,27	c	c	c	c	0,008	0,001	0,032	0,17	0,004	**	SF
<i>Fuscitata heterogama</i> Oehl, F.A. Souza, L.C. Maia & Sieverding	0,03	0	0	0	c	-	-	-	0,028	0	0	0	1	-	-
<i>F. rubra</i> (Stürmer & J.B. Morton) Oehl, F.A. Souza & Sieverding	0,11	0,19	0,19	0	c	c	c	-	0,035	0,046	0,087	0	0,261	-	-
<i>F. savannicola</i> (R.A. Herrera & Ferrer) Oehl, F.A. Souza & Sieverding	0,11	0,06	0,03	0	c	c	c	-	0,074	0,012	0,003	0	0,109	-	-
Gigasporaceae															
<i>G. decipiens</i> I.R. Hall & L.K. Abbott	0,33	0,33	0,33	0,13	mc	mc	mc	c	0,116	0,089	0,087	0,016	0,572	-	-
Glomeraceae															
<i>Funneliformis geosporum</i> (T.H. Nicholson & Gerd.) C. Walker & A. Schüssler	0,33	0,33	0,19	0,07	mc	mc	c	c	0,089	0,177	0,035	0,001	0,038	*	R2
<i>F. halonatum</i> S.L. Rose & Trappe	0,03	0,06	0	0	c	c	-	-	0,009	0,037	0	0	0,483	-	-
<i>Glomus. ambisporum</i> G.S. Smith & N.C. Schenck	0,31	0,33	0,28	0,73	c	mc	c	d	0,062	0,05	0,033	0,389	0,001	***	SF
<i>G. clavisorum</i> (Trappe) R.T. Almeida & N.C. Schenck	0	0	0,03	0	-	-	c	-	0	0	0,028	0	1	-	-

<i>G. glomerulatum</i> Sieverding	0,89	1	1	0,8	d	d	d	d	0,299	0,327	0,239	0,078	0,022	*	R1,R2, R3
<i>G. macrocarpum</i> (T.H. Nicolson & Gerdemann) Gerdemann & Trappe	0,64	0,67	0,64	0,93	d	d	d	d	0,159	0,232	0,099	0,231	0,404	-	-
<i>G. pachyscaule</i> (C.G. Wu & Z.C. Chen) Sieverd. & Oehl	0	0	0	0,03	-	-	-	c	0	0	0	0,033	0,234	-	-
<i>G. rubiforme</i> (Gerd. & Trappe) R.T. Almeida & N.C. Schenck	0,03	0,08	0,03	0,03	c	c	c	c	0,018	0,018	0,002	0,003	0,957	-	-
<i>G. spinuliferum</i> Sieverd. & Oehl	0,14	0,17	0,03	0,1	c	c	c	c	0,04	0,04	0,001	0,043	0,895	-	-
<i>G. taiwanensis</i> (C.G. Wu & Z.C. Chen) R.T. Almeida & N.C. Schenck ex Y.J. Yao	0,06	0	0	0	c	-	-	-	0,056	0	0	0	0,22	-	-
<i>G. trufemi</i> B.T. Goto, G.A. Silva & F Oehl	0,36	0,28	0,31	0,07	mc	c	c	c	0,127	0,08	0,094	0,004	0,32	-	-
<i>Glomus</i> sp1	0,03	0	0,11	0	c	-	c	-	0,001	0	0,108	0	0,018	*	R3
<i>Glomus</i> sp2	0,06	0	0,03	0	c	-	c	-	0,037	0	0,009	0	0,525	-	-
<i>Glomus</i> sp3	0,14	0,11	0,06	0	c	c	c	-	0,116	0,017	0,001	0	0,069	-	-
<i>Rhizoglomus</i> sp clarum (T.H. Nicolson & N.C. Schenck) Sieverd., G.A. Silva & Oehl	0,17	0,11	0,08	0,13	c	c	c	c	0,037	0,036	0,012	0,04	0,962	-	-
<i>Sclerocystis sinuosa</i> Gerdemann & B.K. Bakshi	0,06	0,06	0,31	0,03	c	c	c	c	0,003	0,003	0,265	0,001	0,001	***	R3
Racocetraceae															
<i>Cetraspora pellucida</i> (T.H. Nicolson & N.C. Schenck) Oehl, F.A. Souza & Sieverding	0,08	0	0,17	0,03	c	-	c	c	0,015	0	0,112	0,005	0,048	*	R3
<i>Cetraspora</i> sp	0	0	0,03	0	-	-	c	-	0	0	0,028	0	1	-	-
<i>Racocetra gregária</i> (N.C. Schenck & T.H. Nicolson) Oehl, F.A. de Souza & Sieverd	0,03	0,06	0,19	0,03	c	c	c	c	0,001	0,005	0,158	0,002	0,01	**	R3
<i>Racocetra</i> sp	0,06	0,06	0,06	0	c	c	c	-	0,021	0,014	0,021	0	0,821	-	-
Scutellosporaceae															
<i>Orbispora pernambucana</i> Oehl, G.A. Silva & D.K. Silva	0,03	0,06	0	0,43	c	c	-	mc	0,001	0,003	0	0,398	0,001	***	SF
<i>Scutellospora calospora</i> (T.H. Nicolson & Gerdemann) C. Walker & F.E. Sanders	0,03	0,14	0,39	0	c	c	mc	-	0,001	0,014	0,341	0	0,001	***	R3
<i>Scutellospora</i> sp		0,06	0	0	c	c	-	-	0,006	0,044	0	0	0,371	-	-

Con. Tabela 2: Diversidade, frequência relativa, dominância, valor indicador, significância de fungos micorrízicos arbusculares em diferentes sistemas de restauração e floresta secundária. R1: Restauração Natural; R2: Nucleação; R3: Sistema Agroflorestal; SF: Floresta Secundária. * Indica diferença significativa.

Nossos resultados sugerem que áreas sujeitas a inundação diferem em termos de composição das áreas não inundáveis. Áreas inundáveis apresentaram maior teor de nutrientes e uma granulometria diferente do que as áreas no terraço. Também foi observado que a comunidade de FMA e as características do solo das áreas em restauração ainda não são comparáveis às das florestas de referências.

DISCUSSÃO

Densidade de glomerosporos

O fato de que as áreas de restauração apresentaram maior densidade de esporos mostra que o uso e histórico da terra influenciou a densidade de esporos, uma vez que as maiores quantidades foram encontradas nessas áreas, mostrando que a densidade de esporos diminui progressivamente durante a sucessão ecológica (Zangaro et al., 2012). Acrescido a esse fato temos que florestas secundárias são um ambiente mais estável e menos perturbado, com presença constante de hospedeiros e ausência de variações bruscas na fertilidade do solo garantindo a sobrevivência de espécies (Stürmer; Siqueira, 2011).

Esse resultado também pode ser explicado porque a floresta secundária é dominada por espécies clímax, ou seja, exigem baixo grau de micotrofia em contraste com as pioneiras ou espécies sucessionais (Stürmer; Siqueira, 2011). E a comunidade de fungos micorrízicos ser composta de espécies mais adaptadas aquele ambiente possuindo estratégias distintas e menor grau de competição por nichos sendo sua garantia assegurada com baixa produção de esporos ou que tenham baixa capacidade de resistência (Caproni et al., 2003; Gomide et al., 2014). O resultado encontrado nesta pesquisa está entre as médias reportadas por Leal e seus colaboradores (2009), Stürmer e Siqueira (2011), Lima et al., 2020 que notaram a baixa densidade de esporos em ecossistema de mata nativa.

Teores de glomalina facilmente extraível (EE-BRSP) e glomalina total (BRSP)

Embora fosse esperado que a floresta secundária apresentasse maiores teores do que as áreas de restauração, tal fato não se confirmou, reforçando que nem sempre há uma correlação entre a produção de glomalina, densidade de hifas e colonização por FMA (Treseder; Turner, 2007). De modo geral, a produção e decomposição de glomalina não tem uma explicação definida. Embora produzida pelos FMA, a glomalina compreende reservatórios que possuem diferentes taxas de reposição e estabilidade necessitando de mais estudos (Purin, 2005; Lima et al., 2020).

Porém, alguns estudos têm mostrado que a produção de glomalina pode ser influenciada pelo sistema de uso do solo, visto que sua produção é menor em solos

agrícolas em relação a solos nativos ou não cultivados, solos esses que não sofreram com perturbações, como o revolvimento do solo por exemplo, que destrói as hifas dos fungos influenciando negativamente na produção de glomalina e na agregação do solo (Rillig et al., 2003; Sousa et al., 2012; Cardoso, 2017). E também pode ser relacionada à atividade da comunidade fúngica (Bedini et al., 2007).

Composição e estrutura da comunidade FMA

A dominância desses gêneros está relacionada com o fato das suas espécies apresentarem maior adaptabilidade e apresentar bastante resistência a perturbações ambientais (Bezerra, 2017). Ambos os gêneros dominantes são comumente representados e possuem ocorrência generalizada em diversos ambientes terrestres (Stürmer; Siqueira, 2011; Silva et al., 2014; Caproni et al., 2018; Reyes et al., 2019).

O domínio de *Glomus*, por exemplo, indica a alta capacidade de esporulação do gênero, a adaptabilidade à região, às situações iniciais de sucessão. Além de se apresentar bastante resistente a perturbações ambientais e possuir estratégia do tipo *r* produzindo muitos esporos (Silva, 2009). Em determinados ambientes, a predominância de um ou mais gêneros de FMA pode ser atribuída à interação entre fatores ambientais, incluindo as propriedades físicas e químicas do solo, bem como as características morfológicas e fisiológicas das plantas. (Winagraski et al., 2019).

Oehl e colaboradores (2017) afirmam que nas condições gerais de fertilidade do solo o pH é um dos elementos mais influente afetando a ocorrência das espécies e comunidade de FMA. O solo estudado apresentou pH muito ácido mostrando a dominância de indivíduos dos gêneros *Glomus* e *Acaulospora*, reconhecidos por sua ampla faixa de adaptação e pela preferência por solos ácidos (Caproni et al., 2003).

A dominância desses gêneros no estudo corrobora com os obtidos por Reyes et al (2019) e Da Silva et al (2021) ao avaliar a comunidade de FMA em florestas secundárias e pastagem e sistemas agroflorestais análogos, respectivamente. Esses autores discutem que, por possuírem esporos pequenos e em grande quantidade, os gêneros *Glomus* e *Acaulospora*, tendem a ter uma maior adaptação ao estresse hídrico, além de serem os gêneros mais descritos.

Souza et al. (2011), afirma que *G. macrocarpum* possui distribuição geográfica em todo país, estando presente na maioria dos estados. É de fundamental importância conhecer mais detalhadamente a ecologia deste gênero, pois ela apresenta grande potencial para o uso em programas de recuperação de áreas degradadas (Caproni et al., 2003).

A presença de espécies indicadoras nas áreas mostra que as condições apresentadas favorecem uma maior esporulação e distribuição dessas espécies, mostrando que variações na abundância e frequências dessas espécies podem refletir possíveis alterações nestes locais (Assis, 2015).

A distribuição das espécies de FMA não pode ser explicada apenas pela planta hospedeira ou pelo bioma. Isso ocorre porque as plantas e as comunidades microbianas do solo têm relações estreitas, associadas à fertilidade e à estrutura do solo (Bonfim et al., 2016; Casazza et al., 2017). Assim, os padrões de diversidade dos FMA em um ecossistema florestal são determinados pela combinação da identidade do hospedeiro e das condições ambientais onde ele cresce (Winagraski et al., 2019).

CONCLUSÕES

A composição e a estrutura da comunidade de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) são influenciadas tanto pelos tipos de restauração quanto pelas variáveis físico-químicas do solo. Nos sistemas agroflorestais, a riqueza de FMA foi maior, refletindo um aumento da diversidade nesses sistemas em comparação com outros tipos de restauração e a floresta secundária. A floresta secundária apresentou a menor densidade de glomerosporos e riqueza de espécies, sugerindo uma gama mais restrita de nichos. No entanto, a produção de glomerosporos e os teores de glomalina facilmente extraível e total não foram afetados pelos diferentes tipos de restauração.

AGRADECIMENTOS

Para o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e pelo e a Universidade Estadual do Maranhão – UEMA pela concessão da bolsa de estudos do primeiro autor.

REFERÊNCIAS

Al-Arjani ABF, Hashem A, Abd_Allah EF. Arbuscular mycorrhizal fungi modulates dynamics tolerance expression to mitigate drought stress in *Ephedra foliata* Boiss. **Saudi Journal of Biological Sciences**. 2020, v. 27, n. 1, p. 380-394. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.10.008>

Assis DMA. **Diversidade de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) em dunas fluviais e marítimas no Estado da Bahia**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Biociências. Programa de Pós-graduação em Biologia de Fungos, 2015.

Barlow J, França F, Gardner TA et al. The future of hyperdiverse tropical ecosystems. **Nature**. 2018, v. 559, p. 517–526. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0301-1>

Bedini S, Avio L, Argese E, Giovannetti, M. Effects of long-term land use on Arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin-related soil protein. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. 2007, v. 120, p. 463-466. 10.1016/j.agee.2006.09.010

Begum N, Qin C, Ahanger MA, Raza S, Khan MI et al. Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Plant Growth Regulation: Implications in Abiotic Stress Tolerance. **Front. Plant Sci.** 2019, v. 10, p. 1068. [10.3389/fpls.2019.01068](https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068)

Berude MC, Almeida DS, Riva MM, Cabanêz PA, Amaral AA. Micorrizas e sua importância agroecológica. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer – Goiânia. 2015, v. 11, n. 22, p. 132-146.

Bezerra, ACAF. **Influência de distúrbios antrópicos e mudanças temporais sobre os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) no semiárido.** 2017. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017

Błaszowski J, Chwat G. *Septoglomus deserticola* emended and new combinations in the emended definition of the family Diversisporaceae. **Acta Mycol.** 2013, v. 48, p. 89–103. <https://doi.org/10.5586/am.2013.011>

Bonfim JA, Vasconcellos RLF, Gumiere T, Mescolotti DLC et al. Diversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in a Brazilian Atlantic Forest Toposequence. **Microbial Ecology.** 2016, v. 71, p.164–177. [10.1007/s00248-015-0661-0](https://doi.org/10.1007/s00248-015-0661-0)

Borcard D, Gillet F, Legendre P. **Canonical Ordination. In: Numerical Ecology with R.** 2011

Borcard D, Gillet F, Legendre P. **Numerical ecology with R.** 2nd edn. Springer. 2018

Bradford MM. A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry.** 1976, v. 72, n. 1-2, p. 248-254, [10.1006/abio.1976.9999](https://doi.org/10.1006/abio.1976.9999)

Buss TOL, Kanieski MR, Nicoletti MF, Goulart MM et al. Restauração ecológica em áreas de mineração por cascalho no Sul do Brasil. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais.** 2021, v. 12, n. 7, p. 81-92. <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.007.0008>.

Cardoso FCP. **Carbono orgânico e glomalina afetados por sistemas de cultivo de longa duração.** Dissertação (Mestre em Agronomia), Universidade de Brasília – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Brasília, 2017

Caproni AL, Franco AA, Berbara RLL, Trufem SB, Granha JR, Monteiro AB. Arbuscular mycorrhizal fungi occurrence in revegetated areas after bauxite mining at Porto Trombetas, Pará State, Brazil. **Pesquisa Agropecuária.** 2003, v. 38, n. 12, p. 1409- 1418. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003001200007>

Caproni AL, Granha JRDO, Fornaciari AJ, Nobre CP, Mendonça LP, Berbara RLL. **Floresta e Ambiente.** 2018; v. 25, n. 3, p. e20150224. doi.org/10.1590/2179-8087.022415

Casazza G, Lumini E, Ercole E, Dovana F, Guerrina M et al. The abundance & diversity of arbuscular mycorrhizal fungi are linked to the soil chemistry of scree & to slope in the Alpic paleo-endemic *Berardia subacaulis*. **PLoS ONE.** 2017, v. 12, p.1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171866>

Chamkhi I, Omari NE, Balahbib A, Menyiy NE et al. Is the rhizosphere a source of applicable multi-beneficial microorganisms for plant enhancement? **Saudi Journal of Biological Sciences**. 2021, v. 29, n. 2, p. 1246-1259. [10.1016/j.sjbs.2021.09.032](https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.09.032)

da Cruz DC, Benayas JMR, Ferreira GC et al. An overview of forest loss and restoration in the Brazilian Amazon. **New Forests**. 2021, v. p. 52, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09777-3>

Dufrêne M, Legendre P. Species assemblages and indicator species: The need for a flexible asymmetrical approach. **Ecol. Monogr**. 1997, v. 67, p. 345–366. <https://doi.org/10.2307/2963459>

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo** / Centro Nacional de Pesquisa de Solos. – 2. ed. rev. atual. – Rio de Janeiro, p. 212, 1997.

Esquivel-Muelbert, A, Phillips OL, Briene, RJW et al. Tree mode of death and mortality risk factors across Amazon forests. **Nat Commun**. 2020, v. 11, p. 5515. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18996-3>

Fonseca DA, Backes AR, Rosenfield MF, Overbeck GE, Müller SC. Avaliação da regeneração natural em área de restauração ecológica e mata ciliar de referência. **Revista Ciência Florestal**. 2017, v. 27, n. 2. <https://doi.org/10.5902/1980509827733>

Gerdemann JW, Nicolson TH. Spores of mycorrhizal endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. **Transactions of the British Mycological Society**. 1963, v. 46, p. 235-244. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80079-0](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80079-0)

Gomide PHO, Silva MLN, Soares CRFS, Cardoso EV et al. Fungos micorrízicos arbusculares em fitofisionomias no Pantanal do Nhecolândia, Mato Grosso do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. 2014, v. 38, p. 1114-1127. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000400007>

Goto BT, Silva GA, de Assis DM, Silva DKA, Ferreira AC de A et al. Intraornatosporaceae (Gigasporales), a new family with two new genera and two new species. **Mycotaxon**. 2012, v.119, p. 117–132. <https://doi.org/10.5248/119.117>

Hnini M, Rabeh K, Oubohssaine M. Interactions between beneficial soil microorganisms (PGPR and AMF) and host plants for environmental restoration: A systematic review. **Plant Stress**. 2024, v. 11, p. 100391. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100391>

Hubau W, Lewis SL, Phillips OL et al. Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. **Nature**. 2020, v. 579, p. 80–87. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2035-0>

Hugo F, Christian M, Frank T, Grillas P et al. The Distance to Reference Communities Index (DRCI): a new tool to assess communities' restoration success, **Restoration Ecology**. 2024. <https://doi.org/10.1111/rec.14194>

Jenkins WRA. Rapid centrifugal-flotation technique for separating nematodes from soil. **Plant Disease Report**. 1964, v. 48, p. 692

Köppen, W. *Climatologia: con un estudio de los climas de la terra*. Fondo de Cultura Económica, México. 1948, p. 479.

Kruskal JB. Escala multidimensional não métrica: Um método numérico. *Psychometrika*. 1964, v. 29, p. 115–129. <https://doi.org/10.1007/BF02289694>

Kubosova K, Brabec, K, Jarkovsky J, Syrovatka V. Selection of indicative taxa for river habitats: A case study on benthic macroinvertebrates using indicator species analysis and the random forest methods. *Hydrobiologia*. 2010, v. 651, p. 101–114. <https://doi.org/10.1007/s10750-010-0280-1>

Leal PL, Stürmer SL, Siqueira JO. Occurrence and diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in trap cultures from soils under different land use systems in the Amazon, Brazil. *Brazilian Journal of Microbiology*, São Paulo. 2009, v. 40, n. 1, p. 111-121. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822009000100019>

Lima MDB, Oliveira LGSO, Silva LC, Nobre CP. Fungos micorrízicos arbusculares em diferentes vegetações no município de São Luís, Maranhão. **Estudos Ambientais e Agrônômicos - Resultados para o Brasil vol.02**, Editora: Editora Pascal, 2020

Lutz, S. et al. Soil microbiome indicators can predict crop growth response to large-scale inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi. *Nature Microbiology*. 2023, v. 8, n. 12, p. 2277–2289. <https://doi.org/10.1038/s41564-023-01520-w>

McArdle BH, Anderson MJ. Fitting Multivariate Models to Community Data: A Comment on Distance-Based Redundancy Analysis. *Ecology*. 2018, v. 82, p. 290-297. [http://dx.doi.org/10.1890/0012-9658\(2001\)082\[0290:FMMTCD\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1890/0012-9658(2001)082[0290:FMMTCD]2.0.CO;2)

Nobre CP, Ferraz Júnior ASL, Goto BT, Berbara RLL, Nogueira MDC. Fungos micorrízicos arbusculares em sistema de aléias no Estado do Maranhão, Brasil. *Acta Amazônica*. 2010, v. 40, n. 4, p. 641-646. <https://doi.org/10.1590/S004459672010000400002>

Oehl F, Sieverding E, Palenzuela J, Ineichen K, Silva GA. Advances in Glomeromycota taxonomy and classification. *IMA Fungus*. 2011, v. 2, n. 2, p. 191-199. <https://doi.org/10.5598/ima fungus.2011.02.02.10>

Oksanen J, Simpson G, Blanchet F, Kindt R, Legendre P. et al. Vegan: community ecology package. *Cran R*. 2022

Purin S. **Fungos micorrízicos arbusculares: atividade, diversidade e aspectos funcionais em sistemas de produção de maçã**. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>. 2023

Reyes HA, Ferreira PFA, Silva LC, Costa MG da, Nobre CP, Gehring C. Arbuscular mycorrhizal fungi along secondary forest succession at the eastern periphery of

Amazonia: Seasonal variability and impacts of soil fertility. **Applied Soil Ecology**. 2019, v. 136, p. 1–10. 10.1016/j.apsoil.2018.12.013

Rillig MC, Ramsey PW, Morris S, Paul EA. Glomalin, an arbuscular-mycorrhizal fungal soil protein, responds to land-use change. **Plant and Soil**. 2003, v. 253, p. 293–299. <https://doi.org/10.1023/A:1024807820579>

Roberts DW. **Package “labdsv”: ordination and multivariate analysis for ecology**. 2019

Rosenfield MF, Müller SC. Ecologia funcional como ferramenta para planejar e monitorar a restauração ecológica de ecossistemas. **Oecologia Australis**. 2020, v.24, n. 3, p. 550-565. <https://doi.org/10.4257/oeco.2020.2403.02>

Rothmund LD, Almeida Júnior ES, Lima LPA, Massad HAB et al. Impacto da alteração da cobertura do solo nos parâmetros biofísicos no sul da Floresta Amazônica por sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Climatologia**. 2019, v.25, n. 15, p. 122-137. 10.5380/abclima.v25i0.62677

Santos HG dos, Jacomine PKT, Anjos LHC dos, Oliveira VA de, Lumberras JF et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2018, – 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 356 p

Silva CF, Araújo JLS, Silva EMR, Pereira MG, Schiavo JA et al. Comunidade de fungos micorrízicos arbusculares: diversidade, composição e glomalina em área revegetada com sesbânia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2014, v. 38, p. 423-431. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200007>

Silva FC. **Atributos químicos e biológicos em cava de extração de argilas revegetadas com leguminosas e eucalipto**. Tese (Doutorado em Produção Vegetal). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2009

da Silva CF, Camara R, Pereira MG, Dos Santos GL, Aguiar GL et al. Comunidade de fungos micorrízicos arbusculares e matéria orgânica do solo em pastagens e sistemas agroflorestais análogos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. 2021, v. 16, n. 12, p. e8942. <http://www.agraria.pro.br/ojs32/index.php/RBCA/article/view/v16i2a8942>

Smith SE, Read DJ. Mycorrhizal symbiosis. **Academic Press**, New York. 1997, p. 605

Sousa CS, Menezes RSC, Sampaio EVSB, Lima FS. Glomalina: características, produção, limitações e contribuição nos solos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina. 2012, v. 33, suplemento 1, p. 3033-3044. 10.5433/1679-0359.2012v33Sup1p3033

Souza FA, Gomes EA, Vasconcelos MJV, Sousa SM. **Micorrizas arbusculares: perspectivas para aumento da eficiência de aquisição de fósforo (P) em Poaceae (gramíneas)**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2011.

Stürmer SL, Siqueira JO. Species richness and spore abundance of arbuscular mycorrhizal fungi across distinct land uses in Western Brazilian Amazon. **Mycorrhiza**. 2011, v. 21, p. 255-267. 10.1007/s00572-010-0330-6

Stürmer SL, Siqueira JO. Fungos Micorrízicos. In: Moreira FMS, Cares JE, Zanetti R, Stürmer SL. **O Ecossistema solo: componentes, relações ecológicas e efeitos na produção vegetal**. Lavras: Editora UFLA. 2013, p. 289-311.

Suganuma M, de Assis GB, Durigan G. Changes in plant species composition and functional traits along the successional trajectory of a restored patch of Atlantic Forest. *Community Ecology*. 2014, v. 151, n.1, p. 27-36.
<https://doi.org/10.1556/comec.15.2014.1.3>

Tedersoo L, Ramírez SS, Kõljag U, Bahram M, Döring M et al. High-level classification of the Fungi and a tool for evolutionary ecological analyses. **Fungal Diversity**. 2018. <https://doi.org/10.1007/s13225-018-0401-0>

Treseder KK, Turner KM. Glomalin in ecosystems. *Soil Science Society American Journal*. 2007, v. 71, p. 1257-1266. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0377>

Winagraski E, Kaschuk G, Monteiro PHR, Auer G, Higa AR. Diversidade de fungos micorrízicos arbusculares em ecossistemas florestais do Brasil: uma revisão. **Cerne**. 2019, v.25, n.1, p.25-35. <https://doi.org/10.1590/01047760201925012592>

Wood SN. **Generalized additive models: An introduction with R**, second edition. Chapman and Hall/CRC, 2017

Wortley L, Hero JM, Howes M. Evaluating Ecological Restoration Success: A Review of the Literature. **Restoration Ecology**. 2013, v. 21, n. 5.
<https://doi.org/10.1111/rec.12028>

Wright SF, Upadhyaya, A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. **Soil Science**. 1996, v. 161, n.8, p. 575–586. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-199609000-00003>

Zangaro W, Ansanelo AP, Lescano LEAM, Alves RC, Rondina ABL, Nogueira MA. Infection intensity, spore density and inoculum potential of arbuscular mycorrhizal fungi decrease during secondary succession in tropical Brazilian ecosystems. **Journal of Tropical Ecology**. 2012, v.28, n. 5, p. 453-462. [10.1017/S0266467412000399](https://doi.org/10.1017/S0266467412000399)

Zhang Y, Guo LD, Liu RJ. Survey of arbuscular mycorrhizal fungi in deforested and natural forest land in the subtropical region of Dujiangyan, southwest China. **Plant and Soil**. 2004, v. 261, p. 257-263. [10.1023/B:PLSO.0000035572.15098.f6](https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000035572.15098.f6)

Zuur AF, Ieno EN, Walker NJ, Saveliev AA, Smith G. Mixed effects models and extensions in ecology with R. **Springer**, New York, 2009

APÊNDICES

APÊNDICE A - Localização das parcelas amostradas na fazenda escola e áreas adjacentes.

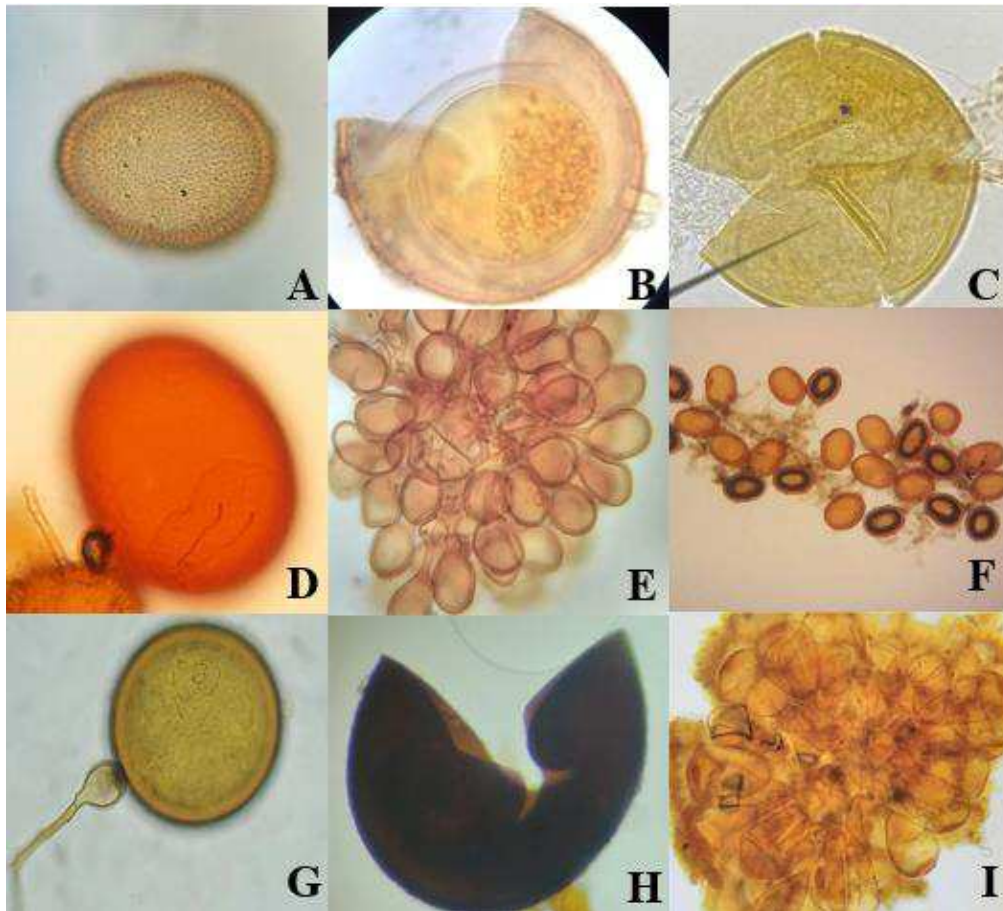


Fonte: GARCÍA., 2022.

APÊNDICE B - Espécies plantadas nos tratamentos de nucleação e sistemas agroflorestais.

Nome Vulgar	Nome Científico	Uso
Angelim	<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	Madeira
Bananeira	<i>Musa</i> spp.	Alimento, matéria orgânica
Barrigudeira	<i>Ceiba pentandra</i> L. Gaertn	Medicinal, fibra
Bordão de Velho	<i>Samanea tubulosa</i> Benth.	Madeira, lenha
Cajueiro	<i>Anacardium occidentale</i> L.	Alimento, matéria orgânica
Gliricídia	<i>Gliricidia sepium</i> Jacq.	Alimento, forragem, adubo verde
Ipê	<i>Handroanthus</i> sp. Mattos	Madeira, ornamental
Mandioca	<i>Manihot esculenta</i> Crantz	Alimento, matéria orgânica
Mangueira	<i>Mangifera indica</i> L.	Alimento, matéria orgânica
Margaridão	<i>Tithonia diversifolia</i> Hemsl	Medicinal, ornamental
Moringa	<i>Moringa oleífera</i> L.	Alimento, medicinal
Nim	<i>Azadirachta indica</i> A. Juss	Madeira, medicinal, cosméticos, fertilizante, reflorestamento
Paricá	<i>Schizolobium amazonicum</i> Herb	Madeira, celulose e papel, medicinal, recuperação e restauração de áreas
Pitomba	<i>Talisia esculenta</i> (A.St.-Hil.) Radlk	Alimento, matéria orgânica
Sabiá	<i>Mimosa caesalpinifolia</i> Benth.	Alimento, madeira, apícola, celulose e papel, medicinal, recuperação e restauração de áreas
Urucum	<i>Bixa orellana</i> L.	Medicinal, cosméticos, corante natural

APÊNDICE D – Espécies de FMA detectadas nas áreas de restauração natural, nucleação, sistema agroflorestal e floresta secundária: a) *Acaulospora rehmii*; b) *Ambispora appendicula*; c) *Acaulospora spinosa*; d) *Fuscutata heterogama*; e) *Glomus* sp *pachyscaule*; f) *Glomus trufemii*; g) *Orbispora pernambucana*; h) *Racocetra gregária* e i) *Sclerocystis sinuosa*.



Fonte: NOBRE, C.P.