UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

JAQUELINE CARDOSO TOFANELLI

O PAPEL DAS RAÍZES E DOS MICRORGANISMOS NA ESTRUTURAÇÃO DE UM SOLO EM PROCESSO DE RECUPERAÇÃO

Ilha Solteira
2021

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

JAQUELINE CARDOSO TOFANELLI

O PAPEL DAS RAÍZES E DOS MICRORGANISMOS NA ESTRUTURAÇÃO DE UM SOLO EM PROCESSO DE RECUPERAÇÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Agronôma.

Katia Luciene Maltoni
Orientador

Ilha Solteira
2021

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Tofanelli, Jaqueline Cardoso.
T644p O papel das raízes e dos microrganismos na estruturação de um solo em processo de recuperação / Jaqueline Cardoso Tofanelli. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021
38 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Agronômica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2021

Orientador: Katia Luciene Maltoni
Inclui bibliografia

1. Recuperação de solos degradados. 2. Stylosanthes sp. 3. Raízes. 4. Micorrizas.

Raiane da Silva Santos
Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE ENGENHARIA AGRONÔMICA

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

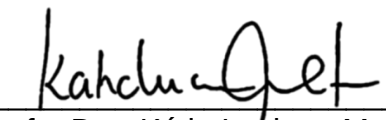
TÍTULO: O papel das raízes e dos microrganismos na estruturação de um solo em processo de recuperação

ALUNO: *Jaqueline Cardoso Tofanelli* RA: 141051787

ORIENTADOR: Kátia Luciene Maltoni

Aprovado (X) - Reprovado ( ) pela Comissão Examinadora com Nota: 9,5

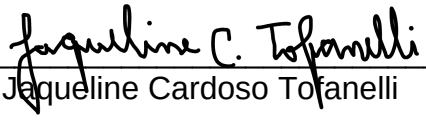
Comissão Examinadora:



Profa. Dra. Kátia Luciene Maltoni
Presidente (Orientador)

Me. Thaís Soto Boni

Profa. Dra. Ana Maria Rodrigues Cassiolato



Jaqueline Cardoso Tofanelli

Ilha Solteira, 13 de agosto de 2021.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Lazaro Proni Tofanelli e Maria Aparecida Cardoso Tofanelli, por todo o amor e apoio incondicionais, pais excepcionais, que sempre me incentivaram a alcançar os meus sonhos e me tornar quem sou hoje, essa oportunidade e todo o conhecimento transformador adquirido ao longo dessa experiência na universidade púbica não seria alcançado sem a dedicação e apoio de vocês.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo apoio, paciência, amparo e ensinamentos. Pela luta diária e todos os esforços para eu pudesse ingressar e continuar por todos esses anos na universidade pública, podendo ter a oportunidade de estudos que eles não tiveram e, por isso, tanto batalharam para que eu conseguisse. Ao meu irmão, Rafael Cardoso Tofanelli, por todos os ensinamentos e apoio para que eu pudesse alcançar os meus sonhos.

A UNESP e, em especial, ao Campus de Ilha Solteira e à toda equipe dessa instituição, que juntos batalham e fornecem um ensino gratuito e de qualidade. Sem a contribuição desta instituição e destas pessoas, eu jamais teria conseguido alcançar tantos sonhos, com tantos ensinamentos e momentos de felicidade.

A minha querida orientadora e amiga, Profª. Drª. Kátia Luciene Maltoni, pela oportunidade concedida no meu sexto semestre de ser sua orientada na monitoria de "Gênese e Classificação de Solo", me ajudando a explorar outros recursos da universidade e me incentivando a sempre buscar por mais conhecimento, sou muito grata por ser sua orientada durante meus anos de graduação, e por toda dedicação, auxílio e incentivo.

A minha banca, composta por mulheres e pesquisadoras excepcionais, Profª. Drª. Ana Maria Rodrigues Cassiolato e Profª. Msc Thaís Soto Boni, todo o meu agradecimento pelo auxílio na elaboração deste trabalho.

Um grande agradecimento aos meus professores, que me acompanharam nesse caminho, por todo o conhecimento transmitido, que me formaram como profissional e principalmente como pessoa. Um agradecimento em especial aos professores Profº. Drº. Omar Jorge Sabbag, meu primeiro orientador, me ajudando a adentrar no meio da pesquisa científica e ao Profº. Drº. Antonio Lazaro Sant'Ana, meu orientador por quatro anos e amigo, que me auxiliou em pesquisas voltadas a Sociologia e Extensão Rural, me ajudando a compreender melhor a importância do Engenheiro Agrônomo e das políticas públicas para o estabelecimento do pequeno produtor rural no campo, de forma digna e sustentável.

Aos amigos que a universidade me apresentou, Danielle Ferreira de Oliveira, Fernando de Souza Buzo, Gabriela Peres Carvalho, Izabela Militão Garcia, Mariana Brassaloti, Paulo Henrique Pissolito e Paula Andrezza Medeiros, agradeço imensamente por todos os momentos que dividimos, todas as alegrias que passamos e ainda passaremos.

Por fim, agradeço à todas as outras pessoas que não foram citadas diretamente, mas que fazem parte desta jornada incrível e transformadora.

RESUMO

Na década de 60, devido à construção da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, algumas áreas serviram como "áreas de empréstimo", sofrendo um intenso processo de degradação, devido a remoção da vegetação e de espessas camadas de solo, com exposição do subsolo à superfície e, consequentemente, às intempéries naturais. Na ausência de vegetação, as condições edáficas, a produção de serapilheira e a atividade microbiológica se encontram negativamente comprometidos. O restabelecimento da vegetação, como resultado da restauração ecológica, leva a melhoria dos serviços ecossistêmicos, podendo contribuir para estimular o desenvolvimento do solo. Por meio do sistema radicular, que introduz material orgânico em subsuperfície e, assim, estimula a atividade microbiana e a formação de agregados, melhorando a condição edáfica do solo degradado. Diante do exposto o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da introdução de *Stylosanthes* sp. e do estabelecimento da gramínea *Aristida riparia* Trin., em um subsolo em processo de recuperação. O experimento foi conduzido em área degradada submetida ao processo de revegetação, na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP/ Campus de Ilha Solteira, localizada no município de Selvíria – MS. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, com quatro tratamentos: sem vegetação (SV), *Stylosanthes* sp. (STY), *A. riparia* (GRAM) e *Stylosanthes* sp. + *A. riparia* (STYGRAM), com 3 repetições. Foram coletadas amostras de solo, do sistema radicular (SSR) e distantes 0,30 m do ponto de inserção da planta (SOLO). Os atributos avaliados foram fertilidade do solo, colonização radicular por fungos micorrízicos arbusculares (FMA) e por fungos endofíticos septados escuros (DSE) e imagens de agregados em microscopia eletrônica de varredura. A introdução de STY e a colonização GRAM, no solo degradado, estão produzindo mudanças no solo, constatou-se um aumento nos os teores de N, P, MO, K^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, elevação do pH e redução de Al^{3+} e H+Al, onde a associação destas (STYGRAM) produziu os melhores resultados. Na gramínea, a colonização radicular mostrou predomínio de DSE. As raízes e hifas dos fungos estão contribuindo para a agregação do solo.

Palavras-chave: Gramínea; *Stylosanthes* sp.; micorriza arbuscular; fungos endofíticos septados escuros.

ABSTRACT

In the 60s, due to the construction of the Ilha Solteira Hydroelectric Power Plant, some areas served as "loan areas", undergoing an intense process of degradation, due to the removal of vegetation and thick layers of soil, with exposure of the subsoil to the surface and, consequently, to the weather. In the absence of vegetation, edaphic conditions, litter production and microbiological activity are negatively compromised. The restoration of vegetation, as a result of ecological restoration, leads to the improvement of ecosystem services and can contribute to stimulating soil development through the root system of the vegetation, which introduces organic matter into the subsurface and thus stimulates microbial activity and the formation of aggregates, improving the edaphic condition of the degraded soil. Given the above, the objective of this work was to evaluate the effects of the introduction of *Stylosanthes* sp. and the establishment of the grass *Aristida riparia* Trin., in a subsoil in the process of recovery. The experiment was conducted in a degraded area, submitted to the recovery process, at Teaching, Research and Extension Farm of the Engineering Faculty of Ilha Solteira – UNESP/ Ilha Solteira Campus, located in the city of Selvíria – MS. The experimental design used was completely randomized, with four treatments: no vegetation (SV), *Stylosanthes* sp. (STY), *A. riparia* (GRAM), and *Stylosanthes* sp. + *A. riparia* (STYGRAM), with 3 repetitions. Soil samples were collected from the root system (SSR) and 0.30m away from the plant insertion point (SOIL). The evaluated attributes were soil fertility, mycorrhizal colonization of roots by endophytic and arbuscular fungi and images of aggregates in scanning electron microscopy. The introduction of STY and colonization by GRAM, in degraded soil, are producing changes in the soil, there was an increase in the contents of N, P, MO, K^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, increase in pH and reduction in Al^{3+} and H+Al. where the association of these (STYGRAM) obtained the best results. Mycorrhizal colonization showed a predominance of dark septate endophytic fungi in the grass. Roots and fungal hyphae are contributing to soil aggregation.

Keywords: Grass; *Stylosanthes* sp.; arbuscular mycorrhiza; dark septate endophytic fungi.

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**.....	10
2	**REVISÃO DE LITERATURA.**.....	11
2.1	CONCEITO E IMPORTÂNCIA DA ESTRUTURA DO SOLO.....	11
2.2	AGREGADOS DO SOLO.....	12
2.3	ESTABILIDADE DOS AGREGADOS.....	13
2.4	IMPORTÂNCIA DAS RAÍZES E MICRORGANISMOS NO PROCESSO DE AGREGAÇÃO DO SOLO.....	13
3	**MATERIAL E MÉTODOS**.....	14
3.1	HISTÓRICO DA ÁREA.....	14
3.2	TRATAMENTOS E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	16
3.3	COLETAS E ANÁLISES REALIZADAS.....	17
3.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	20
4	**RESULTADOS**.....	20
5	**DISCUSSÃO**.....	30
6	**CONSIDERAÇÕES FINAIS**.....	33
	REFERÊNCIAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

As características da comunidade vegetal como composição e diversidade podem influenciar as condições edáficas do solo (agregação, temperatura, umidade, entre outras), a produção de serapilheira, que pode interferir na concentração de carbono, nitrogênio, fósforo, relação C/N, os exsudatos radiculares, bem como na diversidade e atividade microbiana do solo (PRESCOTT; GRAYSTON, 2013; THAKUR *et al*., 2015; BARBI *et al*., 2016; MARTIN *et al*., 2016). Assim, na ausência de vegetação as condições edáficas, a produção de serapilheira e a atividade microbiológica se encontram negativamente comprometidos.

A revegetação, tecnologia baseada no uso de plantas para restauração *in situ* é comum em muitos programas de recuperação, por ser ambientalmente sustentável e permitir o uso de plantas nativas da região. Visto que apresentam mecanismos de sobrevivência adaptados às condições climáticas locais (MENDEZ; MAIER, 2008) aumentando as chances de sucesso da revegetação, uma vez que depende do estabelecimento, crescimento e reprodução das plantas (GILLESPIE; ALLEN, 2004). No entanto, as restrições edáficas podem dificultar fortemente o processo (BELL, 2013).

O restabelecimento da vegetação, como resultado da restauração ecológica, leva a melhoria dos serviços ecossistêmicos (SHAOXUAN *et al*., 2016; WANG *et al*., 2016; DENG *et al*., 2017). O sequestro de carbono, a agregação do solo, maneira pela qual as partículas do solo são mantidas juntas, dentre vários outros serviços ecossistêmicos, podem melhorar na presença da vegetação. Edgerton *et al.* (1995) encontraram uma correlação linear positiva entre estabilidade de agregados do solo e a biomassa microbiana.

A atividade microbiana tem no solo localizado ao redor dos pelos e das pontas das raízes, um local propício para seu estabelecimento, onde ocorre a liberação dos exsudatos rizosféricos pelas plantas (XU *et al*., 2004), como também a absorção de nutrientes e água pelas plantas (SPARKS; BENFEY, 2017).

Áreas que sofreram com a remoção de espessas camadas de solo, expondo o subsolo, estão entre os substratos ambientalmente mais hostis e biologicamente desafiadores, como os encontrados em áreas mineradas (JAMIESON, 2011; CROSS *et al*., 2017; CROSS; LAMBERS, 2017). Estas são caracterizadas pela falta de material orgânico, condições desafiadoras de pH na rizosfera, baixa disponibilidade de água, elevadas temperaturas à superfície, baixa diversidade e funcionalidade de comunidades microbianas (HUANG *et al*., 2011; GINOCCHIO *et al*., 2017; KUMARESAN *et al*., 2017; CROSS *et al.*, 2019).

Nestas áreas, o restabelecimento da vegetação pode contribuir para estimular o desenvolvimento do solo, que depende de intervenções que promovam sua estruturação e melhorem a dinâmica da água, a disponibilidade de nutrientes, a atividade microbiológica e o acúmulo de carbono orgânico (CROSS; LAMBERS, 2017; BEGUM *et al.*, 2019), o que irá reduzir a erosão por meio de interações raiz-solo (VICKERS *et al*., 2012).

A hipótese deste trabalho é que a revegetação do subsolo que, por meio do sistema radicular, introduz material orgânico em subsuperfície e, assim, estimula a atividade microbiana e a formação de agregados, melhora a condição edáfica do solo degradado.

Diante do exposto o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da introdução de *Stylosanthes* sp. e do estabelecimento da gramínea *Aristida riparia* Trin. em um subsolo em processo de recuperação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CONCEITO E IMPORTÂNCIA DA ESTRUTURA DO SOLO

O solo é um sistema aberto e em constante modificação, ou seja, o solo evolui, se desenvolve e se forma de maneira contínua no ambiente em que está inserido, modificando seus atributos físico-químicos.

A formação do solo está ligada à uma dinâmica interna de processos pedogenéticos específicos, que são características de um determinado pedoambiente, dando origem a diversos tipos de solos com propriedades e características próprias. Para Moniz e Buol (1982), a estrutura de um solo é consequência dos processos gerais de seu desenvolvimento, onde os fatores de formação podem influenciar o aparecimento de determinada estrutura. Podemos compreender como estrutura do solo, a forma como as partículas minerais e orgânicas estão organizadas no espaço.

Como termo estrutura, segundo Marshall (1962), está o arranjo das partículas do solo e do espaço poroso entre elas, levando em conta o tamanho, a forma e o arranjo dos agregados formados quando partículas primárias se agrupam em unidades separáveis.

Ferreira (2010) define, ainda, a estrutura do solo como um atributo de natureza dinâmica, ou seja, mesmo que a forma e o tamanho das unidades estruturais não se alterem, uma simples mudança em sua disposição, com consequente alteração do espaço poroso, determinará um novo comportamento dos processos que ocorrem dentro do solo.

A estrutura do solo, segundo Hillel (1982), é fortemente afetada por mudanças no clima, atividade biológica e práticas de manejo do solo, de maneira a ser vulnerável a forças de natureza mecânica e físico-química. Primavesi (2002) reforça que a mudança no espaço poroso altera o arranjo das partículas e, consecutivamente, sua estrutura.

Sendo assim, o solo tem sua estrutura modificada tanto por ações humanas como por intempéries ambientais. E sua preservação é fundamental para o aporte de água e nutrientes, manutenção de elevadas taxas de infiltração de água no solo, resistência a erosão, manutenção e equilíbrio favorável para o crescimento e desenvolvimento das raízes das plantas (FERREIRA, 2010).

2.2 AGREGADOS DO SOLO

Os agregados são unidades básicas da estrutura do solo, tendo grande importância na manutenção da porosidade e aeração do solo, desenvolvimento das plantas e da microbiota do solo, na infiltração de água e redução da erodibilidade (OADES, 1984). Estes são formados pela junção de duas ou mais partículas primárias, quando a força que as une é maior que a força de união entre partículas adjacentes (FERREIRA, 2010), possuindo forma, tamanho e o arranjo bastante variáveis e associados a um complexo conjunto de interações entre fatores mineralógicos, químicos e biológicos (LEPSCH, 2011).

Floculação, cimentação e fissuração são os três principais mecanismos de formação dos agregados (LEPSCH, 2011). A floculação dos colóides do solo é uma condição necessária para a formação dos agregados, porém não suficiente, precisando da presença de um agente cimentante para a estabilização de todos os componentes do agregado (FERREIRA, 2010).

A formação e a estabilidade de agregados do solo tem como principais fatores envolvidos a matéria orgânica, a fração mineral, a fauna do solo, microrganismos, raízes, agentes inorgânicos, cátions e variáveis ambientais (SALTON *et al*., 2008). De acordo com Tisdall e Oades (1982), os agregados podem ser divididos em função do tamanho, sendo os microagregados (< 0,25 mm), formados pela interação das frações granulométricas entre si e destas com as moléculas orgânicas, cátions polivalentes e argila. Os macroagregados (> 0,25 mm) são derivados da ação de raízes finas e hifas de fungos, principalmente os micorrízicos, que entrelaçam os microagregados proporciando estruturas mais complexas.

2.3 ESTABILIDADE DOS AGREGADOS

O tamanho e o grau de desenvolvimento dos agregados do solo influenciam em fatores como infiltração, retenção de água, aeração e resistência a penetração de raízes, selamento e encrostamento superficial, transferência de calor, erosão hídrica e eólica; sendo assim são indicadores dos processos envolvidos na degradação do solo (KLEIN, 2008; LEPSCH, 2011).

Agregados estáveis são importantes para propiciar um solo com espaços porosos para desenvolvimento das raízes, da fauna e da circulação de ar e água, estando ligados a boa estrutura do solo (SALTON *et al*., 2008).

Bastos *et al.* (2005) citam como principais fatores que interferem na agregação do solo, o tipo e teor de argila, metais polivalentes, carbonato de cálcio, óxidos e hidróxidos de ferro, alumínio, e manganês, exsudatos orgânicos de plantas, substâncias orgânicas provenientes da ação de microrganismos e outros compostos orgânicos.

Trata-se de estabilidade dos agregados, a resistência que o agrupamento das partículas do solo apresenta sobre à ação das forças desagregadoras que atuam sobre elas, onde tal resistência pode ser afetada pela redução de material agregador, repercutindo na diminuição do diâmetro dos agregados e no aumento de perda do solo (SOUZA *et al*., 2004).

A matéria orgânica atua como agente condicionadora do solo, agregando partículas minerais e exercendo papel fundamental na formação e estabilização dos agregados (MEURER, 2000). Estudando o efeito da matéria orgânica e dos óxidos de ferro e alumínio na estabilidade de diferentes classes de tamanho de agregados de solos de evolução pedogenética sobre basalto, Hanke (2012) concluiu que, para classes de agregados menores que 2 mm, os óxidos de ferro e teores mais elevados de argila, destacam-se como principais agentes estabilizadores, enquanto nas classes maiores, a MO se apresenta como principal agente cimentante.

Castro Filho *et al.* (1998) analisando a influência da incorporação de resíduos na superfície do solo, relataram um aumento nos níveis de carbono orgânico e agregação do solo, aumentando a percentagem de agregados maiores que 2,00 mm.

2.4 IMPORTÂNCIA DAS RAÍZES E MICRORGANISMOS NO PROCESSO DE AGREGAÇÃO DO SOLO

A fauna do solo, microrganismos, raízes, agentes inorgânicos e variáveis ambientais, juntamente com a matéria orgânica do solo, estão entre os principais fatores envolvidos na formação e estabilidade de agregados do solo (SALTON *et al.*, 2008).

Brandão e Silva (2012) avaliando o comportamento do sistema radicular da *Urochloa ruziziensis* (R.Germ.& Evrard) Crins., observaram um aumento na formação e estabilização dos agregados do solo, com maiores incrementos nas classes de agregados de menor diâmetro, confirmando o efeito significativo do sistema radicular da gramínea.

As raízes de gramíneas perenes utilizadas em sistemas conservacionistas aumentam a aproximação das partículas do solo, em consequência da constante absorção de água, renovação do sistema radicular e da atividade microbiana estimulado pela liberação de exsudatos, promovendo assim a formação e estabilização de agregados do solo (SILVA; MIELNICZUK, 1998).

Dufranc *et al*. (2004), analisando agregação do solo com atributos físicos, químicos e microbianos, em dois Latossolos manejados com plantio direto, relataram que, a comunidade bacteriana agiu como o principal agente agregador dos solos estudados.

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) contribuem para a estabilidade dos agregados tanto por meio da ação física do micélio fúngico, como por meio da ação química, produzindo uma glicoproteína denominada glomalina, que possui efeito cimentante, unindo as partículas de solo e, desta maneira, formando agregados estáveis (RILLIG; MUMMEY, 2006).

Deste modo, pode-se observar a importância dos fatores químicos, físicos e biológicos no processo de agregação do solo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 HISTÓRICO DA ÁREA

O trabalho foi conduzido em área experimental estabelecida na FEPE -Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Engenharia – UNESP/ Campus de Ilha Solteira, localizada no município de Selvíria - MS, sob coordenadas 20º 22’de latitude S e 51º 24’ de longitude O (Figura 1).

Figura 1. Mapa de localização da área experimental, em Selvíria/MS.

Fonte: Google Earth (2021).

Na década de 60, devido à construção da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, esta área passou por um processo intenso de degradação, com a remoção da vegetação e dos horizontes mais superficiais do solo, deixando assim o subsolo exposto à superfície e, consequentemente, às intempéries naturais (Figura 2).

Figura 2. Vista geral da área experimental localizada na FEPE.

Fonte: Google Earth (2021).

O clima na região, caracterizado por inverno seco e verão chuvoso, é do tipo Aw (Tropical úmido), segundo a classificação de Köppen (ALVAREZ *et al*., 2014), com precipitação e temperatura média anual de 1.300 mm e 25,5ºC. Os solos de ocorrência comum na região são Latossolos e Argissolos Vermelhos, porém na área experimental o solo foi removido, permanecendo à superfície o subsolo quimicamente pobre (baixos teores de N, P, MO, Ca^{2+} e Mg^{2+}), com baixa capacidade de infiltração de água e elevada densidade (1,53 kg dm^{-3}) como descrito por Rodrigues *et al*. (2007). Este conjunto não favorece a revegetação natural, mantendo sua exposição e, como consequência, suscetível a processos erosivos.

Um experimento instalado em 2011, na área acima descrita, teve por objetivo induzir a revegetação e melhorar as condições edáficas. Para tanto a área foi gradeada (grade pesada), escarificada (arado de aiveca), destorroada (grade leve) e contou ainda com 12 tratamentos resultantes da aplicação de 3 doses de composto de macrófitas aquáticas secas (RO - 0, 16 e 32 t ha^{-1}) e 4 doses de cinza do bagaço da cana-de açúcar *biochar* (RA - 0, 15, 30 e 45 t ha^{-1}). Os tratamentos foram dispostos em três blocos casualizados, resultantes de três repetições de cada tratamento, totalizam 36 parcelas experimentais de 20 m x 30 m (600 m^2). Logo depois (60 dias), estes tratamentos receberam mudas de 10 espécies arbóreas de Cerrado (1080 mudas numa área de 3,4 ha) e a vegetação nativa que porventura surgiu na área foi mantida, mais detalhes estão descritos em Boni *et al*., (2020).

Em janeiro de 2017, com a intenção de estimular o processo de recuperação desta área foram introduzidos novos tratamentos. As 36 parcelas experimentais foram subdivididas em quatro novos tratamentos, aleatoriamente distribuídos, o que resultou em 144 novas parcelas de 10 m x 15 m (150 m^2). Nestas foram introduzidas sementes de estilosantes Campo Grande, nome comercial dado à mistura física de sementes de *Stylosanthes capitata* Vogel (80%) e *Stylosanthes macrocephala* M.B. Ferreira & Sousa Costa (20%) e *Calopogonium* sp., como descrito por Fardin *et al*. (2021). Estes novos tratamentos ficaram assim constituídos: 100% estilosantes (4 kg de sementes ha^{-1}), 100% calopogônio (4 kg de sementes ha^{-1}), 50% estilosantes + 50% calopogônio e o controle (sem adição de sementes). No entanto, o *Calopogonium* sp. não conseguiu se estabelecer na área, de acordo com observação de campo.

3.2 TRATAMENTOS E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

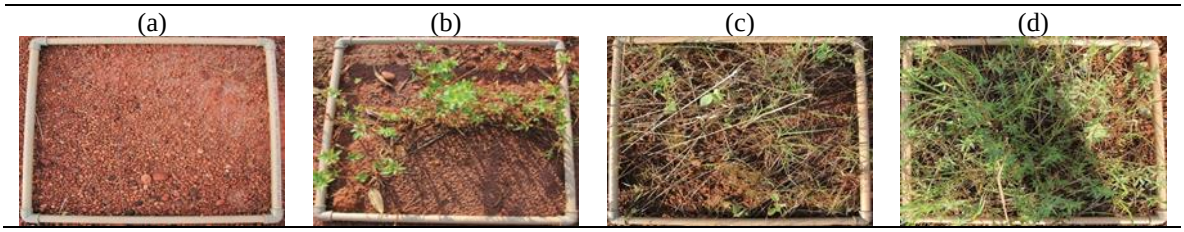
Para realização deste trabalho foram selecionadas as três parcelas do tratamento que recebeu, em 2011, as doses mais altas de RO e RA, isto é, onde foram aplicados 32 t ha^{-1} de

RO + 45 t ha^{-1} de RA, sendo RO composto de macrófitas aquáticas secas e RA de cinza do bagaço da cana-de açúcar (*biochar*).

Nestas três parcelas foram selecionadas 4 áreas para amostragem: 1- sem vegetação (SV); 2- com *Stylosanthes* sp. (STY); 3- com gramínea nativa de ocorrência espontânea – *A. riparia* (GRAM); 4- com *Stylosanthes* sp. e gramínea nativa (STYGRAM). Cada uma destas áreas de amostragem foi fotografada com auxílio de um quadrante de 1 m de aresta (Figura 3).

O delineamento experimental foi caracterizado como inteiramente casualisado (DIC), contendo quatro tratamentos e três repetições, totalizando 12 áreas amostrais.

Figura 3. Áreas selecionadas para coleta: (a) sem vegetação, (b) com *Stylosanthes* sp., (c) com gramínea nativa (*Aristida riparia* Trin.) e (d) com *Stylosanthes* sp. e *A. riparia*.



Fonte: Elaboração da própria autora (2021).

3.3 COLETAS E ANÁLISES REALIZADAS

Os trabalhos em campo foram realizados em fevereiro de 2019, em procedimentos manuais, com coleta de porções deformadas e indeformadas de material de solo ocorrendo nos 0,10 m superficiais, próximo ao local de inserção da planta ao solo e, neste caso, contendo parte do sistema radicular (SSR) acompanhada de estruturas de material de solo (Figura 4). A outra coleta, também dentro do quadrante, porém distante 0,30 m do ponto de inserção da planta, evitando coletar o sistema radicular, doravante denominada SOLO.

As amostras foram coletadas com o auxílio de uma faca, para a retirada de pequenas porções de solo indeformadas. Assim, foram coletadas 12 amostras contendo raízes e agregados de solo e 12 amostras sem. Estas 24 amostras foram levadas ao laboratório e secas ao ar.

Figura 4. Coleta, (a) próximo ao local de inserção de *Stylosanthes* sp. ao solo e (b) material coletado contendo raízes e o solo.

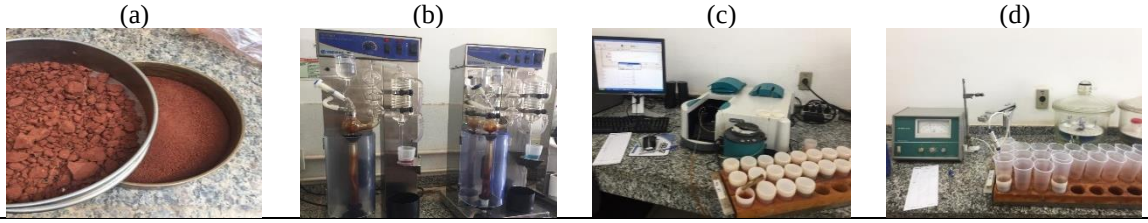
(a) (b)

Fonte: Elaboração da própria autora (2021).

Parte das amostras coletadas, tanto SSR como SOLO, secas ao ar, passadas em peneira com malha de 2 mm - TFSA (Figura 5), e analisadas para fertilidade (fósforo (P), matéria orgânica (MO), potássio trocável (K^+), cálcio trocável (Ca^{2+}), magnésio trocável (Mg^{2+}), reação do solo (pH), alumínio trocável (Al^{3+})) seguindo metodologia de Raij *et al*. (2001). O teor de nitrogênio total (NT) foi quantificado pelo método de Kjeldahl (MALAVOLTA *et al*., 1997). As análises foram feitas nos laboratórios de Fertilidade e Nutrição de Plantas da Faculdade de Engenharia da UNESP, Campus de Ilha Solteira.

Figura 5. Preparo e análises de solo (a) peneiramento em malha de 2 mm de abertura, (b) destilador tipo Kjeldahl para quantificação do nitrogênio total, (c) colorímetro para quantificação do teor de matéria orgânica e (d) peagâmetro para determinação do pH.

(a) (b) (c) (d)



Fonte: Elaboração da própria autora (2021).

A colonização radicular por fungos micorrizícos arbusculares (FMA) e por fungos endofíticos septados escuros (DSE) foi analisada em três amostras de raízes de *A. riparia* e três amostras de *Stylosanthes* sp., coletadas nas áreas anteriormente descritas, totalizando seis amostras de raízes. Para cada repetição coletou-se 1 g de raiz fresca, as quais foram lavadas em água corrente, clareadas e coloridas para avaliação da colonização radicular, em microscopia ótica (BETHLENFALVAY *et al*., 1981; McGONIGLE *et al*., 1990; VIERHEILIG *et al*.,1998).

Para tanto as raízes lavadas foram colocadas em béqueres com KOH 10 e aquecidas a 90°C em banho-maria por 30 minutos, quando à elas adicionou-se H_2O_2 6%, antes de retornarem ao banho-maria, por 10 minutos. Na sequência as raízes foram lavadas com o auxílio de pisseta e peneira, em seguida foi adicionado HCl 1% até encobri-las e o material retornou ao banho-maria por 15 minutos. Drenado o HCl, adicionou-se o corante azul de tripano, seguido de 3 minutos de aquecimento. Após o resfriamento, as raízes foram lavadas para retirar o excesso do corante e armazenadas em frascos plásticos com lactoglicerol para posterior análise.

A contagem da presença ou ausência de hifas foi realizada em microscópio óptico, utilizando-se uma lâmina onde foram colocados 5 segmentos de raízes dividida em 10 marcações paralelas onde foram colocados 5 segmentos de raízes. A análise consistiu na observação da presença ou ausência de hifas características na colonização. Para cada amostra foram analisadas 2 lâminas com 5 segmentos cada, totalizando 100 pontos de análise por amostra (Figura 6).

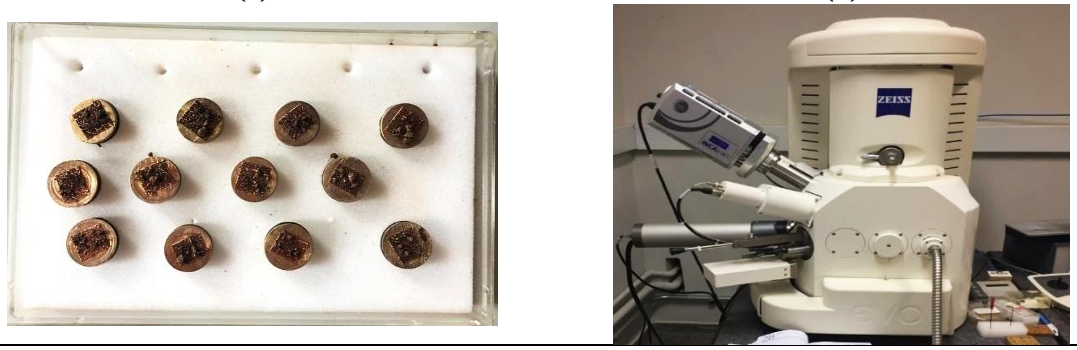
Figura 6. Preparação das raízes para a avaliação da colonização radicular, (a) amostras coletadas e lavadas, (b) aquecimento em banho maria, (c) amostras coloridas e (d) lâminas com os seguimentos de raízes para análise em microscópio.

Fonte: Elaboração da própria autora (2021).

As amostras foram destorroadas delicadamente e os agregados (tanto das amostras SSR e SOLO) foram coletados e preparados para avaliação em microscópio eletrônico de varredura (MEV). O preparo envolveu a fixação dos agregados em porta amostra (com fita de carbono com revestimento duplo), para observação detalhada das estruturas presentes. Após fixação, elas foram recobertas com uma película de ouro, em câmara de vácuo, utilizando o metalizador Quorum – Q150TE, tendo sido necessários três recobrimentos para a realização da análise (WHITE, 2008). Em seguida as amostras foram levadas ao MEV, modelo EVO/LS15 – ZEISS e as observações foram feitas com diferentes aumentos, sendo 40 x, 100 x, 250 x, 500 x 1000 x e 2000 x, dentre outros (Figura 7).

Figura 7. MEV, (a) amostras de solo recobertas com ouro e (b) microscópio eletrônico de varredura utilizados para as avaliações.

(a) (b)



Fonte: Elaboração da própria autora (2021).

3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, em que foi testada a hipótese da normalidade dos erros pelo teste de Shapiro-Wilk e, após comprovação desta hipótese, procedeu-se a análise de variância. As diferenças entre os níveis dos tratamentos e na interação entre eles foram testadas pelo teste F a 5%. Quando encontrada diferença significativa as médias foram comparadas por meio do teste Tukey a 5%. Todas as análises foram realizadas no software SISVAR (FERREIRA, 2019).

4 RESULTADOS

A introdução de *Stylosanthes* sp. e a colonização espontânea da *A. riparia*, no solo degradado, promoveu incrementos em NT, P, MO, pH, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} e redução no Al^{3+} e H+Al (Tabela 1). No ambiente solo no entorno do sistema radicular (SSR) e apartado deste (SOLO -0,30 m distante da inserção das plantas) e não há diferenças significativas para a fertilidade.

Entre os tratamentos de plantas (SV, STY, GRAM e STYGRAM) cabe destacar a combinação STYGRAM, pois com esta associação há maiores teores de NT, P, Ca^{2+} e Mg^{2+} tanto no SSR, quanto no SOLO. As variáveis pH, K^+, Al^{3+} e H+Al não diferiram entre as plantas introduzidas, isto é, tanto faz se GRAM, STY ou os dois combinados, e estes diferem da situação em que a vegetação se faz ausente, isto é, no SV o pH e teor de K^+ são menores, Al^{3+} e H+Al são mais elevados, reafirmando a contribuição da vegetação em melhorar as condições químicas do solo.

Tabela 1 - Valores médios de nitrogênio total (NT), fósforo (P), matéria orgânica (MO), reação do solo (pH), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), alumínio (Al^{3+}), e acidez potencial (H+Al), em dois ambientes (Amb) de solo (SOLO e solo do sistema radicular-SSR), e quatro tratamentos de planta (Planta), definidos como sem vegetação (SV), *Stylosanthes* sp. (STY), *Aristida riparia* (GRAM) e STYGRAM, *p valor*, coeficiente de variação (CV) e média geral.

Fontes de variação	**NT** (g kg^{-1})	**P** (mg kg^{-1})	**MO** (g kg^{-1})	**$pH_{(CaCl_2)}$**	**K^+**	**Ca^{2+}**	**Mg^{2+}**	**Al^{3+}**	**H+AL**
					---------- ($mmol_c$ kg^{-1}) ----------				
					p valor				
Planta	**0,0000**	**0,0001**	**0,0001**	**0,0000**	**0,0001**	**0,0001**	**0,0000**	**0,0011**	**0,0142**
Amb	0,9509	0,0552	0,3522	0,2330	0,4600	0,4753	0,6846	0,8408	0,7188
Amb x planta	0,5887	0,1914	0,9914	0,6757	0,4046	0, 8934	0,9871[s]	0,9884	0,6900
CV (%)	26	17	17	4	24	23	29	114	15
Média Geral	0,50	2,44	8,1	4,97	1,11	10,5	5,8	0,9	13,1
Planta					**Média**				
SV	0,28 b	2,0 b	6,1 b	4,3 b	0,60 b	3,3 c	2,4 c	2,7 a	15,8 a
STY	0,41 b	2,3 b	7,5 b	**5,0 a**	**1,16 a**	8,5 b	4,7 bc	**0,5 b**	**11,9 b**
GRAM	0,44 b	1,9 b	7,0 b	**5,2 a**	**1,13 a**	8,0 b	5,5 b	**0,3 b**	**12,3 b**
ESTGRAM	**0,93 a**	**3,6 a**	**11,8 a**	**5,4 a**	**1,57 a**	**22,3 a**	**10,6 a**	**0,0 b**	**12,5 b**
Amb					**Média**				
SSR	0,50 a	2,3 a	8,4 a	5,0 a	1,16 a	10,9 a	5,9 a	0,9 a	13,3 a
SOLO	0,50 a	2,6 a	7,8 a	4,9 a	1,07 a	10,2 a	5,6 a	0,8 a	13,0 a

*Médias seguidas de mesma letra, minúscula na coluna, por fonte de variação, não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey para $p \geq 0,05$.

Fonte: Elaboração da própria autora (2021).

A interação entre ambiente Solo x Plantas (Tabela 1) não mostrou resultados estatisticamente significativos, porém o desdobramento (Tabela 2) indica que associando STYGRAM os resultados são promissores, quanto aos aspectos químicos avaliados, com destaque para os teores de MO, NT, Ca^{2+} e Mg^{2+}, que superam os demais tratamentos (GRAM, STY e SV). Os teores de P aumentam tanto no tratamento SOLO quanto SSR na presença de STYGRAM.

Para pH (SOLO e SSR), K^+ (SSR) e Al^{3+} (SOLO e SSR) a presença da vegetação melhora a condição do solo, isto é, contribui para elevação do pH e dos teores de K^+ e diminui os teores de Al^{3+}, independe da composição da comunidade vegetal em estabelecimento na área, os teores de K^+ no SOLO e H+Al (SOLO e SSR) apresentam comportamento variável.

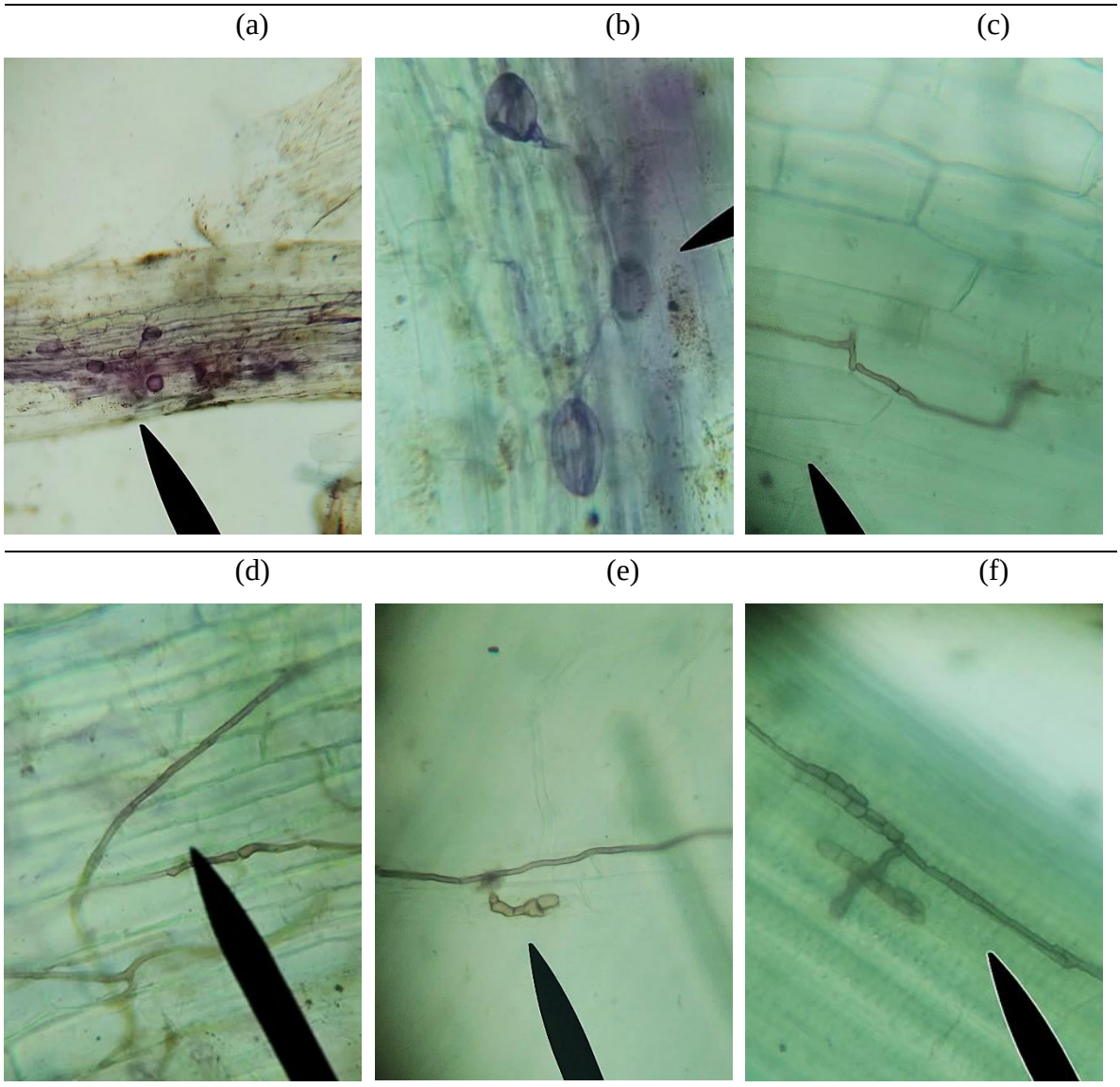
Tabela 2- Desdobramento da interação entre Ambiente (SOLO e SSR) e tratamentos de plantas (Planta), definidos como sem vegetação (SV), *Stylosanthes* sp. (STY), *Aristida riparia* (GRAM) e STYGRAM, para matéria orgânica (MO), fósforo (P), pH, nitrogênio total (NT), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), alumínio (Al^{3+}) e acidez potencial (H+Al) do solo, bem como *p valor*.

Planta	**MO** (g kg^{-1})			**P** (mg kg^{-1})			**N** (g kg^{-1})		
	SOLO	SSR	***p* valor**	SOLO	SSR	***p* valor**	SOLO	SSR	***p* valor**
SV	6,00 bA	6,23 bA	0,8366	2,40 bA	1,60 bA	**0,0277**	0,32 bA	0,25 bA	0,4824
STY	7,17 bA	7,83 bA	0,5576	2,40 bA	2,13 bA	0,4314	0,39 bA	0,42 bA	0,8295
GRAM	6,70 bA	7,37 bA	0,5576	2,13 bA	1,60 bA	0,1260	0,46 bA	0,41 bA	0,6454
STYGRAM	**11,50 aA**	**12,07 aA**	0,6176	**3,50 aA**	**3,73 aA**	0,4902	**0,81 aA**	**0,93 aA**	0,2900
***p* valor**	**0,0006**	**0,0004**		**0,0037**	**0,0001**		**0,0014**	**0,0000**	
	$pH_{(CaCl2)}$			**K^+** (mmolc kg^{-1})			**Ca^{2+}** (mmolc kg^{-1})		
	SOLO	SSR	***p* valor**	SOLO	SSR	***p* valor**	SOLO	SSR	***p* valor**
SV	4,37 bA	4,30 bA	0,7079	0,63 bA	0,57 bA	0,8117	3,37 bA	3,17 cA	0,9218
STY	**4,97 aA**	**5,10 aA**	0,4567	1,05 abA	**1,28 aA**	0,3050	7,57 bA	9,40 bA	0,3744
GRAM	**5,03 aA**	**5,27 aA**	0,2006	0,97 bA	**1,28 aA**	0,1782	7,87 bA	8,10 bcA	0,9089
STYGRAM	**5,30 aA**	**5,43 aA**	0,4567	**1,65 aA**	**1,49 aA**	0,4870	**21,80 aA**	**22,87 aA**	0,6023
***p* valor**	**0,0005**	**0,0000**		**0,0025**	**0,0040**		**0,0001**	**0,0000**	
	Mg^{2+} (mmolc kg^{-1})			**Al^{3+}** (mmolc kg^{-1})			**H+Al** (mmolc kg^{-1})		
	SOLO	SSR	***p* valor**	SOLO	SSR	***p* valor**	SOLO	SSR	***p* valor**
SV	2,37 bA	2,37 bA	1,0000	2,67 aA	2,67 aA	1,0000	14,83aA	16,70aA	0,2709
STY	4,43 bA	4,97 bA	0,7021	**0,33 bA**	**0,66 bA**	0,6885	11,87aA	**11,87bA**	1,000
GRAM	5,20 bA	5,73 bA	0,7021	**0,33 bA**	**0,33 bA**	1,0000	12,77aA	**11,87bA**	0,5900
STYGRAM	**10,57 a**A	**10,63 a**A	0,9618	**0,00 bA**	**0,00 bA**	1,0000	12,33aA	**12,57abA**	0,8884
***p* valor**	**0,0001**	**0,0002**		**0,0172**	**0,0209**		0,3158	**0,0259**	

*Médias observadas seguidas de mesma letra, minúscula nas colunas e maiúscula nas linhas, por fonte de variação, não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey a 5%.
Fonte: Elaboração da própria autora (2021).

A colonização das raízes mostrou uma única ocorrência de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) em *A. riparia* e várias ocorrências de fungos endofíticos septados escuros (DSE), contabilizando 11% das avaliações conduzidas (Figura 8). As avaliações realizadas nas raízes do *Stylosanthes* sp. apontaram ausência de colonização.

Figura 8. Colonização micorrízica da *Aristida riparia* por (a) micorriza arbuscular (vesículas e hifas); (b) detalhe da colonização por micorriza arbuscular, (c), (d), (e) fungos endofíticos septados escuros e (f) microescleródium com endofíticos septados escuros.



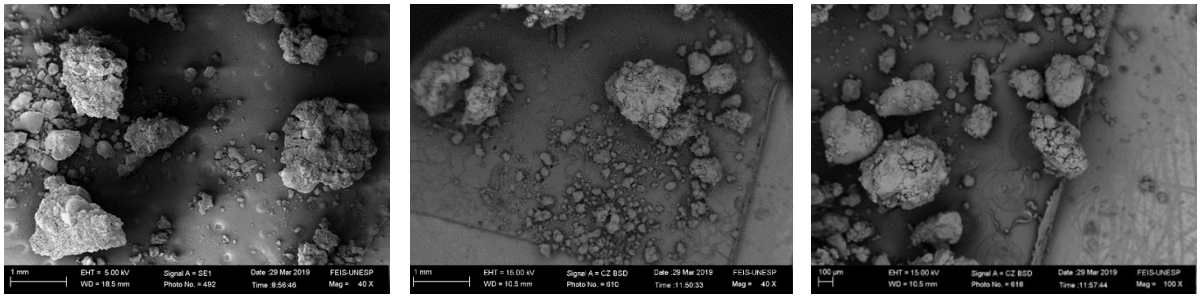
Fonte: Elaboração da própria autora (2021).

A introdução do *Stylosanthes* sp. e o estabelecimento de *A. riparia*, na área degradada, estão produzindo mudanças no solo. Estas mudanças ocorrem de modo mais intenso na área próxima ao sistema radicular das plantas. Pequenas porções de SSR, quando observadas em microscopia eletrônica de varredura (Figura 9) permitem identificar diferenças no material de solo, particularmente das raízes em relação às partículas do solo degradado.

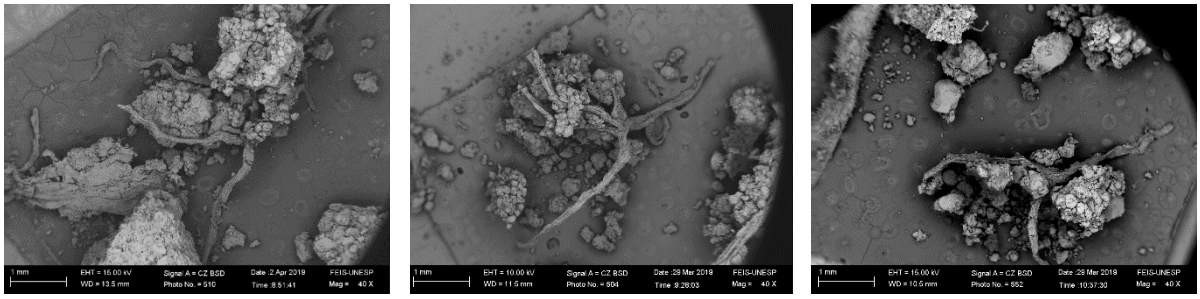
Numa primeira observação nota-se a ocorrência de pequenas estruturas associadas às raízes (Figura 9 b, c e d), diferente do ambiente sem raízes (Figura 9 a), onde as estruturas aparecem com rupturas, com ocorrência de grãos isolados e aspecto pouco poroso.

Figura 9. Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) das estruturas presentes na rizosfera de (a) *Stylosanthes* sp. (b) *Aristida riparia*, (c) *A. riparia* + *Stylosanthes* sp. e (d) do solo exposto na área degradada, com aumento de 40x, para visão mais ampla do material.

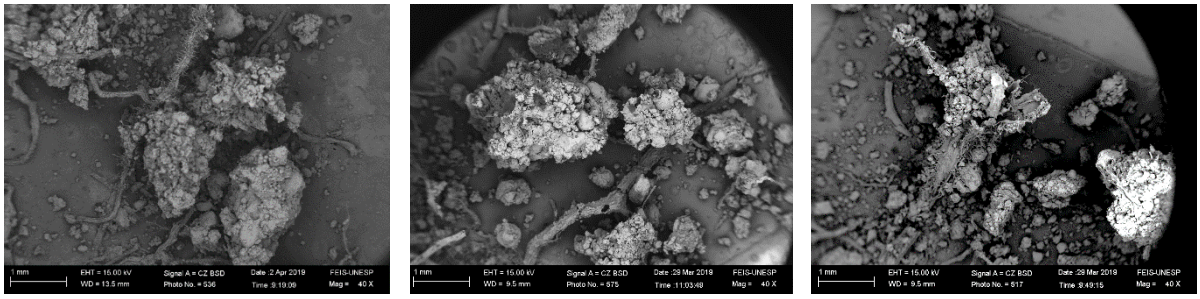
(a) Solo degradado sem vegetação



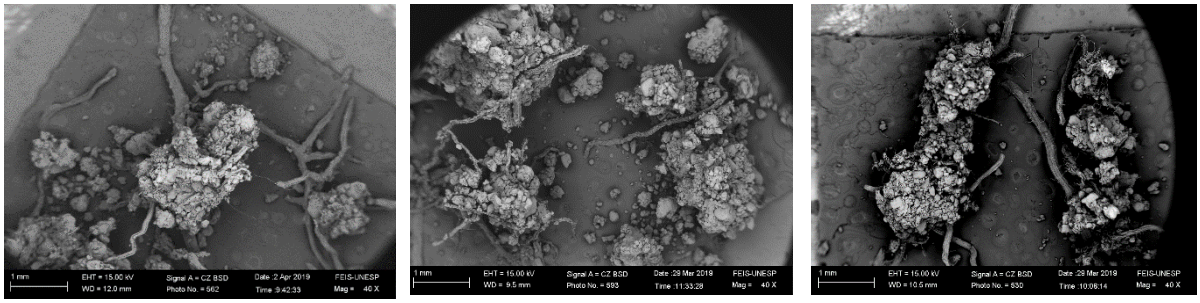
(b) *Stylosanthes* sp.



(c) *Aristida riparia* Trin.



(d) *A. riparia* + *Stylosanthes* sp.

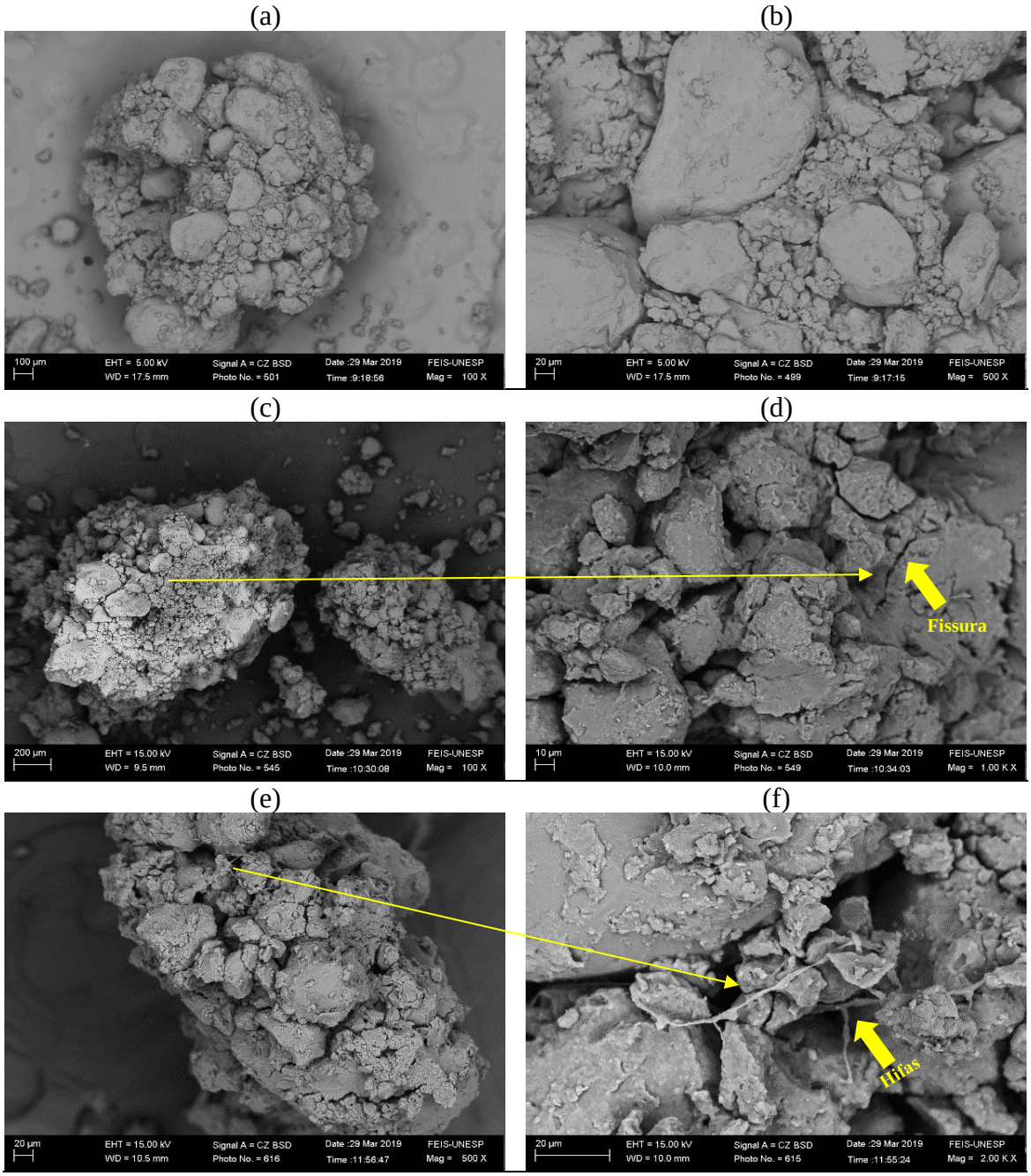


Fonte: Elaboração da própria autora (2021).

Detalhes das amostras das pequenas estruturas coletadas, onde a vegetação está ausente, mostram um ambiente sem raízes (Figura 10 a, b), com ocorrência de fissuras (Figura 10 c, d)

e com raras hifas de fungos (Figura 10 e, f), o meio permanece abiótico deste ponto de vista. As partículas do solo estão unidas, mas mostram vários pontos com fissuras (Figura 10 c e d).

Figura 10. Agregados coletados no Solo sem presença de vegetação, (a) e (b) estrutura presente no Solo e detalhe, (c) e (d) estrutura com presença de fissuras e detalhe, (e) e (f) estrutura com ocorrência de hifa.

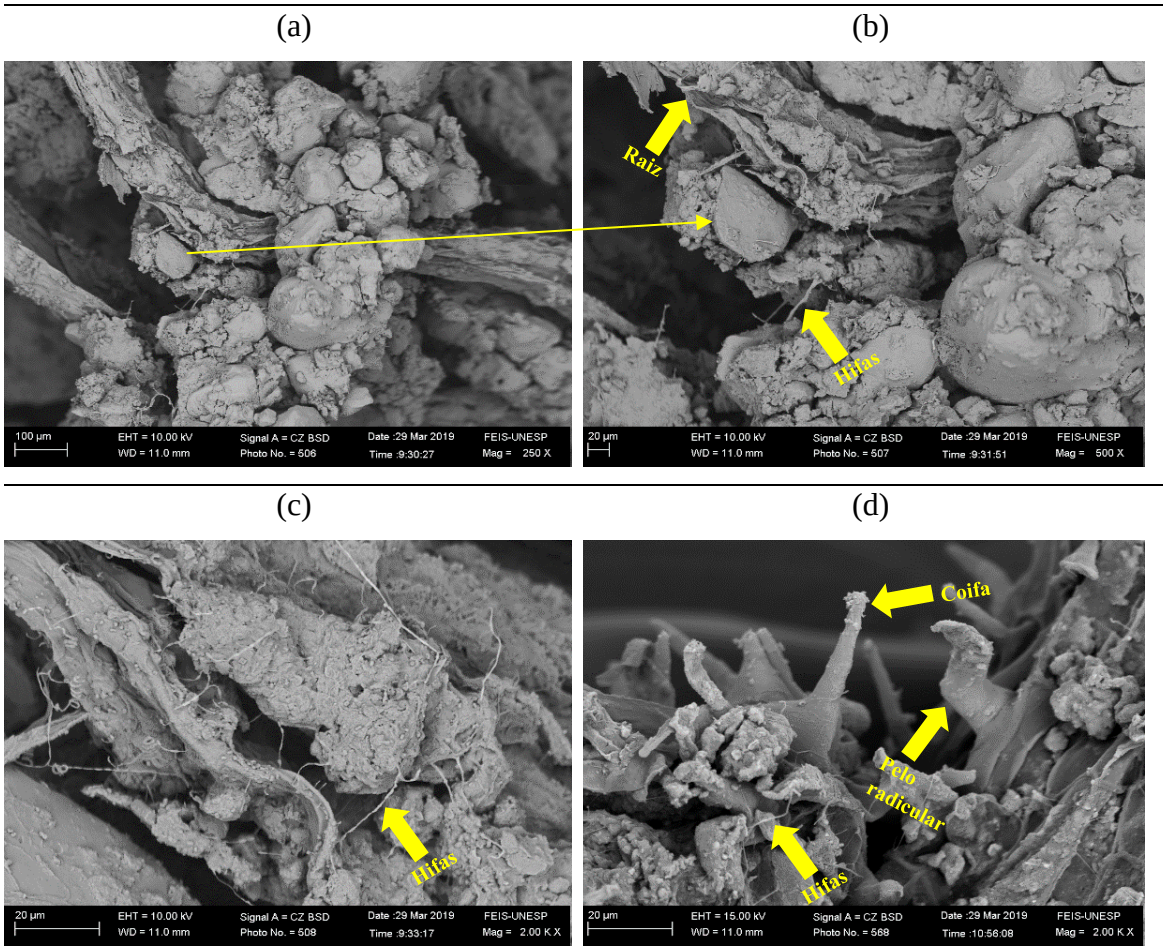


*Setas indicando pontos de destaque, de acordo com a descrição das imagens.
Fonte: Elaboração da própria autora (2021).

As pequenas estruturas coletadas junto do sistema radicular de STY e GRAM mostram a ocorrência de raízes e fungos. Embora não tenha sido identificada a colonização das raízes do STY (Figura 8) nestas pequenas estruturas do solo junto ao sistema radicular é possível identificar a ocorrência de hifas de fungos (Figura 11 a, b, c), bem como de pelos radiculares e coifas (Figura 11 c).

Há também a frequente associação de partículas do solo a raízes e hifas, como se estas estivessem envolvendo as estruturas e contribuindo para agregar estas partículas (Figura 11 c, d).

Figura 11. Estruturas coletadas junto ao sistema radicular de *Stylosanthes* sp., (a) e (b) presença de raízes e detalhe com hifas de fungos, (c) hifas envolvendo partículas do solo, e (d) pelos radiculares e hifas.

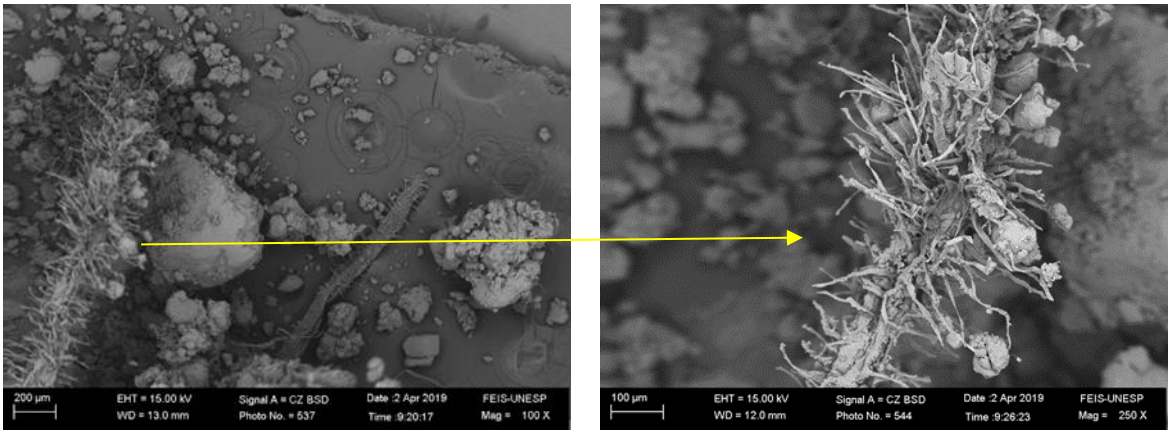


*Setas indicando pontos de destaque, de acordo com a descrição das imagens.
Fonte: Elaboração da própria autora (2021).

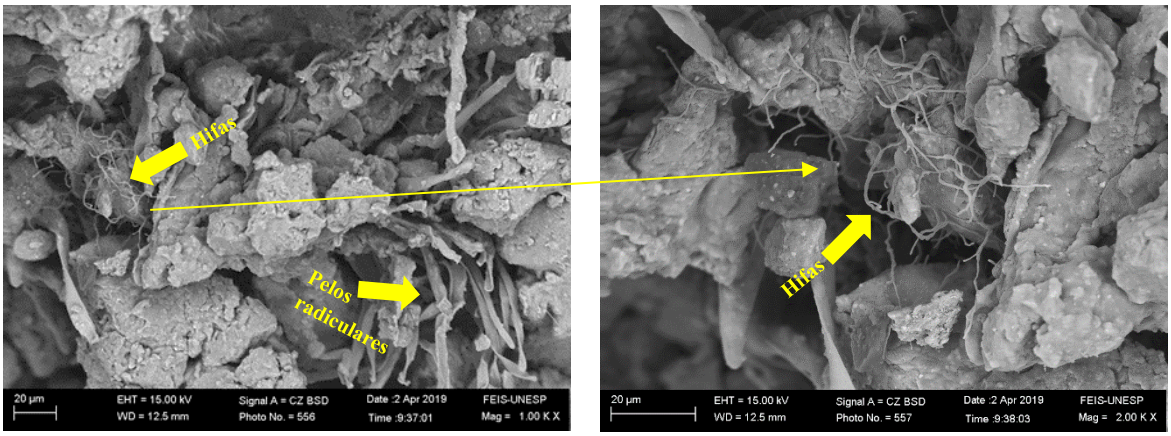
Nas estruturas coletadas junto ao sistema radicular da GRAM pode-se observar a maior quantidade de pelos radiculares (Figura 12), em comparação com o STY (Figura 11).

Figura 12. Estruturas coletadas na região do sistema radicular da gramínea *Aristida riparia* Trin., (a) raízes e estruturas do solo, (b) detalhe de pequenas estruturas unidas às raízes, (c) e (d) partículas de solo envolvidas por hifas de fungos e pelos radiculares, (e) e (f) detalhe dos pelos radiculares e partículas do solo, (g) e (h) detalhes de raiz e hifas de fungos associadas a partículas de solo **(continua)**.

(a) (b)



(c) (d)



(e) (f)

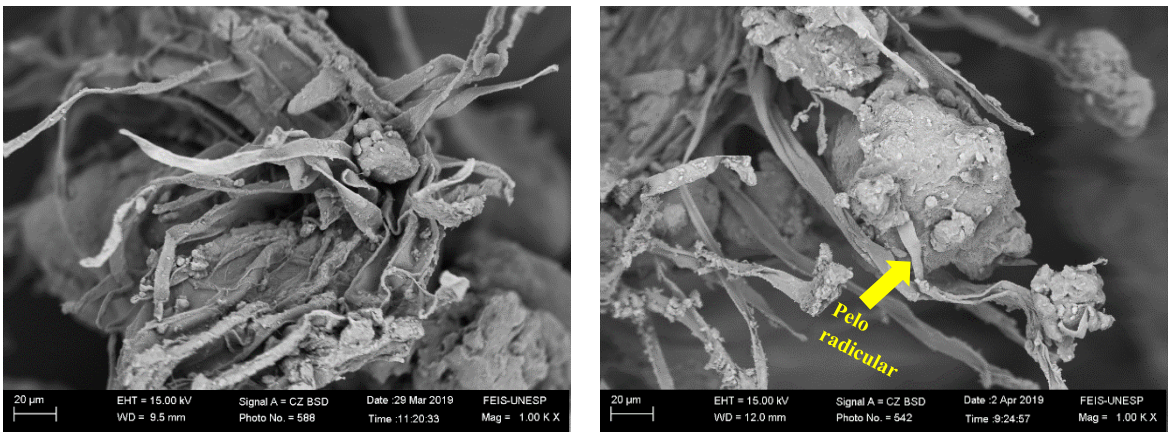
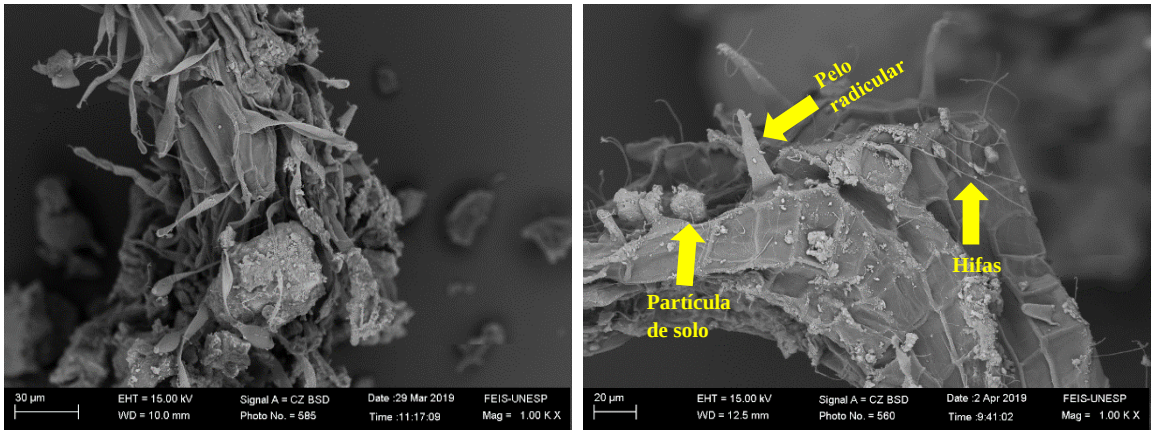


Figura 12. Estruturas coletadas na região do sistema radicular da gramínea *Aristida riparia* Trin., (a) raízes e estruturas do solo, (b) detalhe de pequenas estruturas unidas às raízes, (c) e (d) partículas de solo envolvidas por hifas de fungos e pelos radiculares, (e) e (f) detalhe dos pelos radiculares e partículas do solo, (g) e (h) detalhes de raiz e hifas de fungos associadas a partículas de solo **(continuação)**.

(g) (h)



*Setas indicando pontos de destaque, de acordo com a descrição das imagens.
Fonte: Elaboração da própria autora (2021).

Outro aspecto interessante é a proximidade das partículas com as raízes, que em conjunto com as hifas criam um emaranhado que mantem as partículas do solo próximas, facilitando sua agregação, para dar início a formação de estruturas. A associação *Stylosanthes* sp. e *A. riparia* proporciona maior quantidade de raízes ao meio e, por isso, sua presença no solo é mais frequente (Figura 13).

Figura 13. Estruturas coletadas na SSR, na presença de *Aristida riparia* e *Stylosanthes* sp. (a) presença das raízes. (b) partículas do solo envoltas por raízes, (c) raiz, (d) raiz e partícula de solo com hifas de fungos, (e), (f), (g), (h), (i) e (j) detalhes das estruturas de solo com raízes e hifas em seu interior **(continua)**.

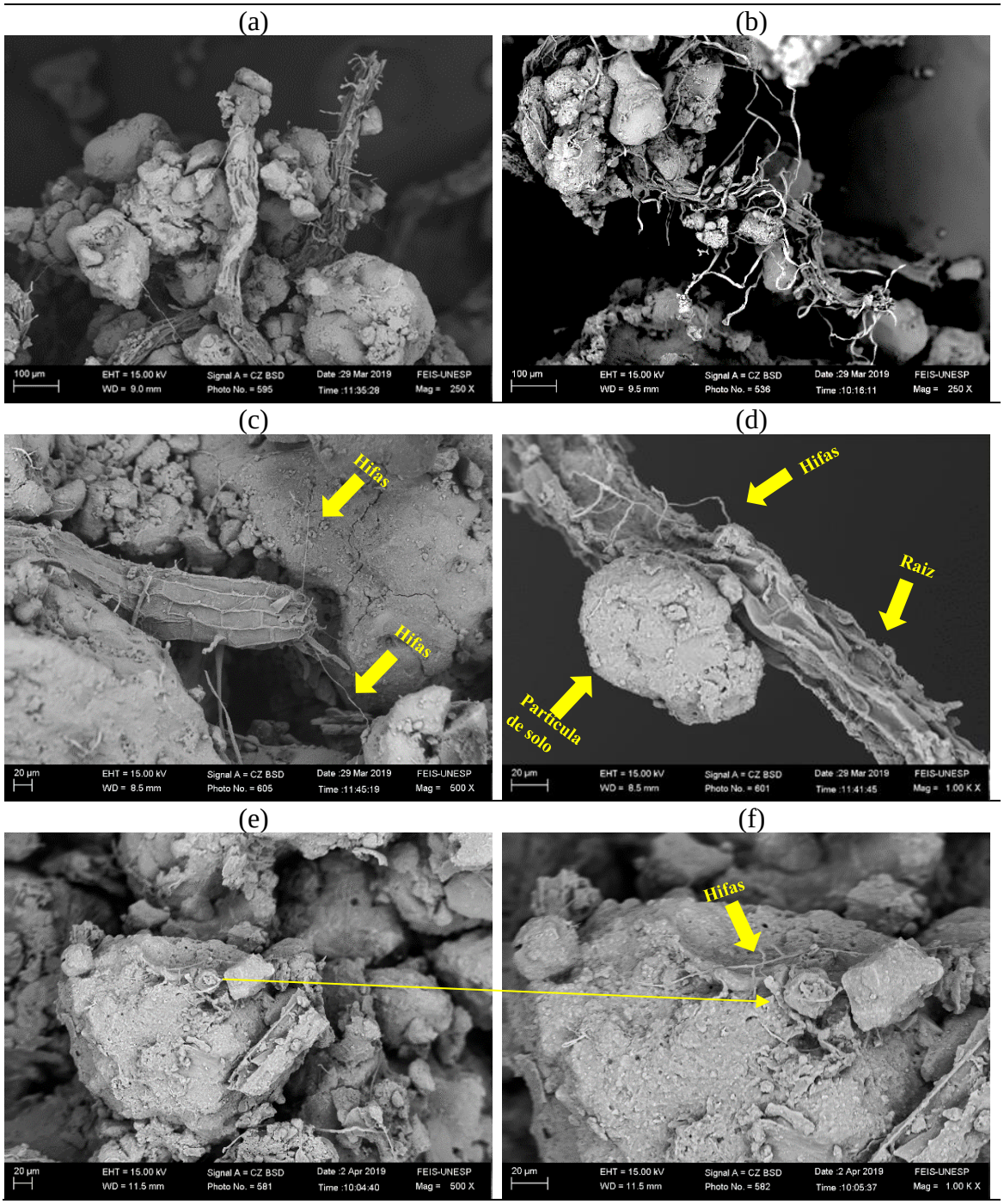
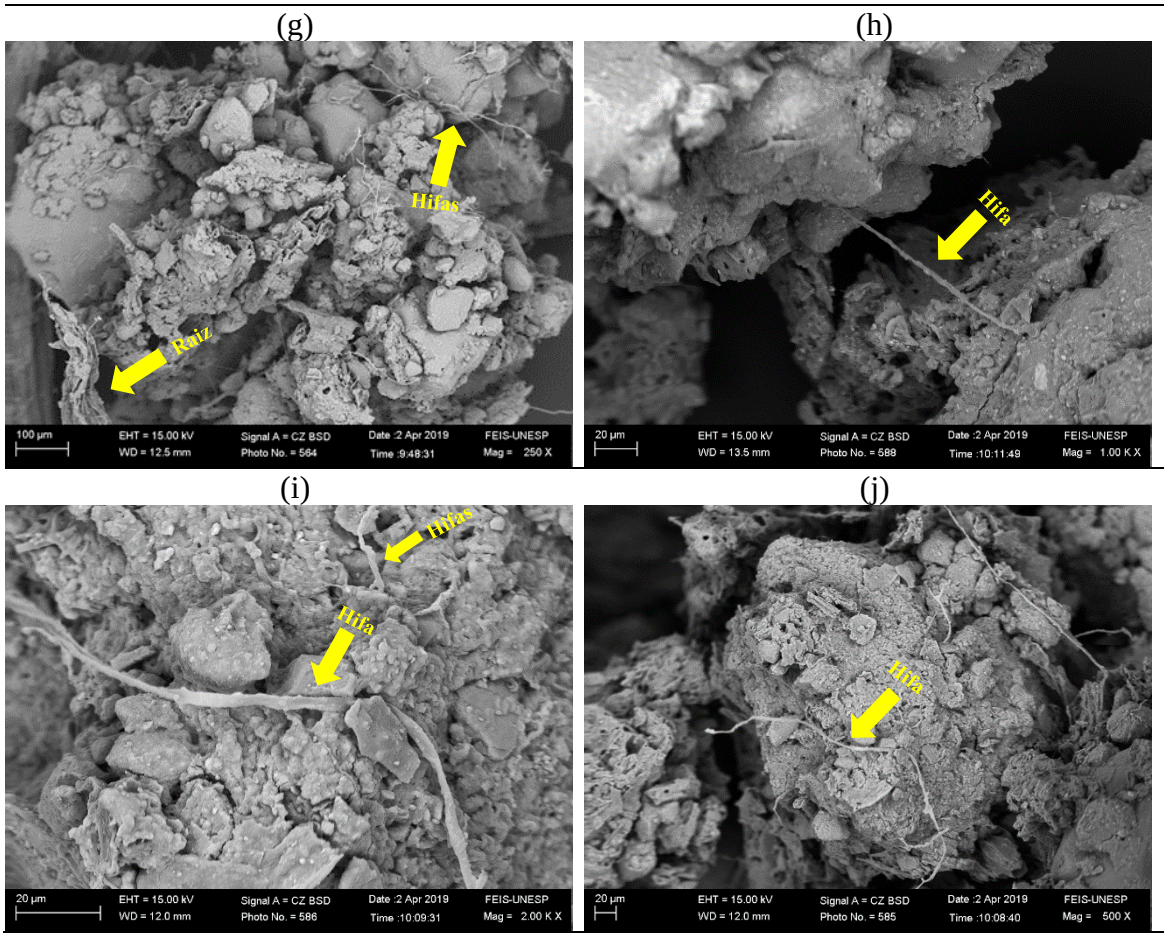


Figura 13. Estruturas coletadas na SSR, na presença de *Aristida riparia* e *Stylosanthes* sp. (a) presença das raízes. (b) partículas do solo envoltas por raízes, (c) raiz, (d) raiz e partícula de solo com hifas de fungos, (e), (f), (g), (h), (i) e (j) detalhes das estruturas de solo com raízes e hifas em seu interior **(continuação)**.



*Setas indicando pontos de destaque, de acordo com a descrição das imagens.
Fonte: Elaboração da própria autora (2021).

5 DISCUSSÃO

As raízes, particularmente as mais finas, tem papel fundamental na ciclagem de nutrientes e do C, uma vez que a maior parte do C acumulado no solo é resultado da produção e renovação dessas raízes, cujo pequeno diâmetro determina uma vida útil menor e com relação C/N baixa. (JACKSON *et al.*, 1997). Skuodiene e Nekrosiene (2012) mostraram que a proporção entre C e N na raiz é diferente entre leguminosas e gramíneas e esta relação influencia o desenvolvimento da microbiota (KUZYAKOV; XU, 2013). As gramíneas desempenham um papel de destaque no acúmulo de material orgânico, devido ao sistema radicular fasciculado, com maior densidade de raízes e melhor distribuição no solo, além de estar em constante

renovação, melhorando, assim, as condições químicas do solo (SILVA; MIELNICZUK, 1997; SALTON; TOMAZZI, 2014; AULER *et al.*, 2008).

Incrementos nos teores de MO, NT, Ca^{2+} e Mg^{2+} podem ser justificados pela renovação do sistema radicular, que introduz matéria orgânica no solo e, com isso, aumenta os teores de NT, Ca^{2+}, Mg^{2+} e poderá aumentar os teores de P e K^{+}, melhorando as condições químicas do solo, o que ocorre de modo mais intenso inicialmente no ambiente mais próximo da raiz.

Comportamento semelhante foi descrito por Nascimento *et al.* (2003) quando da introdução de leguminosas em solo degradado, estes observaram acréscimos significativos no pH, e teores de K^{+} e Mg^{2+} e redução da acidez potencial.

A quantidade de raízes é mais abundante onde estão associados STYGRAM, portanto, podem promover mudanças químicas mais intensas no ambiente SSR e à medida que as raízes aumentam seu alcance (área e volume e colonização) essas mudanças passam a se estabelecer em uma região cada vez maior.

Na busca pela recuperação do solo degradado, é importante lembrar que as raízes das plantas atuam estimulando uma agregação estável do solo tanto pela promoção da população microbiana na rizosfera, como pelo suprimento de resíduos orgânicos (OADES, 1978).

As gramíneas, pelas características já citadas do sistema radicular, têm papel importante na formação e estabilização dos agregados, e a associação com leguminosas é mais eficiente na agregação do solo, do que quando separadas (SILVA; MIELNICZUK, 1997), corroborando os dados obtidos neste trabalho onde STYGRAM apresentam melhores resultados químicos, por exemplo.

A microbiota do solo também contribui para o processo de formação e estabilização dos agregados, além de possuir papel importante no estabelecimento de plantas em áreas degradadas. Martins *et al*. (1999), ressaltaram a contribuição dos FMA nativos no estabelecimento de *Aristida setifolia* Kunth. em áreas degradadas do cerrado, salientando que a associação entre o desenvolvimento vegetal e a atividade microbiana pode ser um fator importante na recuperação dos solos degradados, pois mesmo quando profundamente alterados, eles podem manter uma comunidade microbiana ativa.

Wagg *et al*. (2008) observaram em raízes de mudas de pinus um declínio na colonização aos 3 meses, o que atribuíram ao crescimento das raízes e a falta de recursos para os fungos devido a mudanças no solo. A colonização com DSE, aos três meses estava em torno de 6,7% e FMA de 0,6 %, valores que se aproximam da avaliação feita para *A. riparia*, no entanto são espécies distintas e com idades distintas.

Apesar da importante contribuição da microbiota, o solo estudado tem uma baixa ocupação por microrganismos, como observado na colonização radicular, onde além dos FMA constatou-se a presença, também modesta, de DSE com ausência de FMA nos STY, sugerindo que o ambiente ainda pode ser considerado inóspito para estes microrganismos.

Contudo, a colonização com DSE, embora pequena, pode estar contribuindo para a sobrevivência da *A. riparia* neste ambiente em recuperação, pois segundo He *et al*. (2019) a inoculação com DSE melhorou o desenvolvimento radicular e a absorção de nutrientes pelas plantas hospedeiras, alterou a microbiota do solo, além de ter contribuído para o crescimento e sobrevivência das plantas em condições de estresse hídrico (seca).

Vergara *et al*. (2018) ao avaliar a contribuição de diferentes cepas de DSE, na absorção de nutrientes e crescimento de plantas de arroz, constataram que uma das cepas contribuiu para crescimento das plantas, onde foi observado o aumento da massa seca da parte aérea, perfilhamento, e absorção de nutrientes (N, P, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} e S), principalmente N e P.

Foram observadas a presença de algumas hifas nas amostras de solo SV, possivelmente de DSE, pois, diferentemente de FMA, os DSE não são biotróficos obrigatórios (PEREIRA *et al*., 2011).

De acordo com Menezes *et al.* (2020), o acréscimo de MO promove um aumento na elasticidade do solo, devido ao aumento do teor de carbono orgânico, tornando o solo mais estruturado e resistente ao processo de compactação.

Diversos autores relatam a contribuição da vegetação e a importância das raízes, microrganismos, matéria orgânica e teor de C orgânico no solo no processo de agregação e estabilidade de agregados do solo, a fim de se obter um solo com melhor resistência aos processos de erosão e compactação (REINERT & REICHERT, 2006; SALTON *et al*, 2008; SALTON *et al*, 2014; SERPA *et al*., 2020).

A análise microscópica dos solos é a uma técnica de observação morfológica em escala micrométrica, onde permite-se obter evidências acerca das mudanças contínuas nos atributos físicos e biológicos do solo, resultantes do uso e manejo do solo, auxiliando na interpretação do comportamento e da dinâmica do solo (MIEDEMA, 1997; CASTRO *et al*., 2003).

A utilização da microscopia eletrônica de varredura, permitiu evidenciar de maneira objetiva as mudanças, embora singelas, que a vegetação e os microrganismos estão provocando no solo, assim como a sua contribuição no processo de agregação do solo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A introdução de *Stylosanthes* sp. e a colonização por *A. riparia*, no solo degradado, aumentou os teores de NT, P, MO, K^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, elevou o pH e reduziu Al^{3+} e H+Al.

Os teores de NT, P, Ca^{2+} e Mg^{2} são mais elevados quando *Stylosanthes* sp e *A. riparia* ocorrem associadas.

As imagens da microscopia eletrônica de varredura permitiram a observação de estruturas radiculares, hifas de fungos e o envolvimento destas na formação de pequenas estruturas no solo.

Tanto as raízes quanto as hifas dos fungos estão contribuindo para a agregação do solo.

A colonização micorrízica mostrou predomínio de fungos endofíticos septados escuros, na gramínea.

Nas raízes de *Stylosanthes* sp. a colonização micorrízica só foi observada na microscopia eletrônica de varredura.

A microscopia eletrônica de varredura foi uma ferramenta útil para observação detalhada das pequenas estruturas e da presença de atividade biológica no solo.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v.22, n. 6, p. 711-728, 2014.

AULER, P. A. M.; FIDALSKI, J.; PAVAN, M. A.; NEVES, C. S. V. J. Produção de laranja 'pêra' em sistemas de preparo de solo e manejo nas entrelinhas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [*S. l.*], v. 32, n. 1, p. 363-374, 2008.

BARBI, F.; PRUDENT, E.; VALLON, L.; BUÉE, M.; DUBOST, A.; LEGOUT, A.; MARMEISSE, R.; FRAISSINET-TACHET, L.; LUIS, P. Tree species select diverse soil fungal communities expressing different sets of lingocellulolytic enzyme-encoding genes. **Soil Biology and Biochemistry,** [*S. l.*], v. 100, p. 149-159, 2016.

BASTOS, R. S.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ, V. H.; CORRÊA, M. M.; COSTA, L. M. Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 1, p. 21-31, 2005.

BEGUM, N.; QIN, C.; AHANGER, M. A.; RAZA, S.; KHAN, M. I.; ASHRAF, M.; AHMED, N.; ZHANG, L. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: implications in abiotic stress tolerance. **Frontiers in Plant Science**, [*S. l.*], v. 10, p. 1068, 2019.

BELL, R. W. Land restoration, Principles. In: Jorgenson, S. E. (Ed.). **Encyclopedia of Environmental Management**, v.3. New York: Taylor and Francis, 2013. p. 1621-1626.

BETHLENFALVAY, G. J.; PACOVSKY, R. S.; BRONWN, M. S. Measurement of mycorrhizal infection in soybeans. **Soil Science Society of America Journal**, v. 45, n. 5, p. 871-875, 1981.

BONI, T. S.; MALTONI, K. L.; MIZOBATA, K. K. G. da S. *Dipteryx alata* Seedlings nutritional status in a recovery area in the Brazilian Savannah. **Floresta e Ambiente**, [*S. l.*], v. 27, n. 2, p. 2-10, 2020.

BRANDAO, E. D.; SILVA, I. F. Formação e estabilização de agregados pelo sistema radicular de braquiária em um Nitossolo Vermelho. **Ciência Rural**, [*S. l.*], v. 42, n. 7, p. 1193-1199, 2012.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O; PODANOSCH, I. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de cultura e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [*S. l.*], v. 22, n. 3, p. 527-538, 1998.

CASTRO, S. S. de; COOPER, M.; SANTOS, M. C.; VIDALTORRADO, P. Micromorfologia do solo: bases e aplicações. In: CURI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M. de; LOPES, A. S.; ALVAREZ VENEGAS, V. H. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.3, p. 107-164, 2003.

CROSS, S. L.; TOMLINSON, S.; CRAIG, M. D.; DIXON, K. W.; BATEMAN, P. W. Overlooked and undervalued: the neglected role of fauna and a global bias in ecological restoration assessments. Pacific Conservation Biology, [*S. l.*], v. 25, n. 4, p. 331-341, 2019.

CROSS, A. T.; STEVENS, J. C.; DIXON, K. W. One Giant leap for manking: can ecopoiesis avert mine tailings disasters? **Plant and Soil**, v. 421, p. 1- 5, 2017.

CROSS, A.; LAMBERS, H. Young calcareous soil chronosequences as a model for ecological restoration on alkaline mine tailings. **Science of the Total Environment**, v. 607-608, p. 168-175. 2017.

DENG, L.; LIU, S.; KIM, D.G.; PENG, C.; SWEENEY, S.; SHANGGUAN, Z. Past and future carbon sequestration benefits of China's grain for green program. **Global Environmental Change**, [*S. l.*], v.47, p. 13-20, 2017.

DUFRANC, G.; DECHEN, S. C. F.; FREITAS, S. S.; CAMARGO, O. A. Atributos físicos, químicos e microbiológicos relacionados com a estabilidade de agregados de dois Latossolos em plantio direto no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n. 3, p.505-517, 2004.

EDGERTON, D.L.; HARRIS, J.A.; BIRCH, P.; BULLOCK, P. Linear relationship between aggregate stability and microbial biomass in three restored soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v.27, 1499–501, 1995.

FARDIN, F. H.; MALTONI, K. L.; BONI, T. S.; FARIA, G. A.; REZENDE, A. A. Restauração ecológica de subsolo exposto condicionado com resíduos no Cerrado. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 130, p. 1-13, 2021.

FERREIRA, D. F. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria,** v.37, n.4, p. 529-535, 2019.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: Lier, Q. J. van (ed.). **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 1-27, 2010.

GILLESPIE, I.G.; ALLEN, E.B. Fire and competition in a southern California grassland, impacts on the rare forb *Erodium macrophyllum*. **Journal of Applied Ecology**. v.41, p. 643–652, 2004.

GINOCCHIO, R.; LEÓN-LOBOS, P.; ARELLANO, E. C.; VINKA ANIC, V.; J. F.; BAKER, A. J. M. Soil physicochemical factors as environmental filters for spontaneous plant colonization of abandoned tailing dumps. **Environmental Science and Pollution Research** v. 24, p.13484–13496, 2017.

HANKE, D. **Gênese, interação organo-mineral e estabilidade de agregados de solos desenvolvidos de basalto**. Universidade Federal do Paraná, 117 p, 2012 (Dissertação de Mestrado).

HE, C.; WANG, W.; HOU, J. Plant growth and soil microbial impacts of enhancing licorice with inoculating dark septate endophytes under drought stress. **Frontiers in microbiology**, v. 10, p. 2277, 2019.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. New York: Academic Press, 1982. 364 p.

HUANG, L.; BAUMGARTL, T.; MULLIGAN, D. Is rhizosphere remediation sufficient for sustainable revegetation of mine tailings? **Annals of Botany**, v. 110, p. 223 – 238, 2012.

JACKSON, R. B.; MOONEY, H. A.; SCHULZE, E. D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. **PNAS**, v. 94, p.7392 – 7396. 1997.

JAMIESON, H. E. Geochemistry and mineralogy of solid mine waste: essential knowledge for predicting environmental impact. **Elements**, v. 7, p. 381-386, 2011.

KLEIN, V.A. **Física do solo**. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2008. 240 p.

KUMARESAN, D.; CROSS, A.T.; MOREIRA-GREZ, B.; KARIMAN, K.; NEVILL, P.; STEVENS, J.; ALLCOCK, R.J.N.; O'DONNELL, A.G.; DIXON, K.W.; WHITELEY, A.S. Microbial functional capacity is preserved within engineered soil formulations used in mine site restoration. **Scientific Reports**, v. 7, p. 564-573, 2017.

KUZYAKOV, Y.; XU, X. Competition between roots and microorganisms for nitrogen: mechanisms and ecological relevance. **New Phytologist**, v. 198, n. 3, p. 656-669, 2013.

LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 456 p.

MARTIN, P.A.; NEWTON, A.C.; BULLOCK, J.M. Impacts of invasive plants on carbon pools depend on both species' traits and local climate. **Ecology**, v.98, 1026–1035, 2016.

MARTINS, C. R.; MIRANDA, J. C. C.; MIRANDA, L. N. Contribuição de fungos micorrízicos arbusculares nativos no estabelecimento de *Aristida setifolia* Kunth em áreas degradadas do cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 4, p. 665-674, 1999.

MARSHALL, T. J. The nature, development and significance of soil structure. Trans. Comm. IV and V. **The International Union of Soil Sciences**, p. 243-257, 1962.

MENEZES, K. C.; PUIA, J. D.; MACHADO, A. H. R. A importância da elasticidade da matéria orgânica e de sua atuação na estabilidade dos agregados para o controle da compactação do solo. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 3, n. 3, p. 1349-1356, 2020.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafós, 1997, 319 p.

McGONIGLE, T. P.; MILLER, M. H.; EVANS, D. G.; FAIRCHILD, G. L.; SWAN, J. A. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. **New Phytologist**, v. 115, n. 3, p. 495−501, 1990.

MENDEZ, M.O.; MAIER, R.M. Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments — an emerging remediation technology. **Environmental Health Perspectives**. v. 116, n. 3, p. 278–283, 2008.

MEURER, J. E. Introdução à ciência do solo, In: Meurer, E.J. **Fundamentos de química do solo, gênesis**, Porto Alegre, Evangraf, 2000. p.11-21.

MIEDEMA, R. Applications of micromorphology of relevance to agronomy. Advances in Agronomy, v. 59, p.119-169, 1997.

MONIZ, A.C. & BUOL, S.W. Formation of an Oxisol-Ultisol transition in São Paulo, Brazil: I - Double-water flow model of soil development. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, 1128-1233, 1982.

NASCIMENTO, J. T.; SILVA, I. F.; SANTIAGO, R. D.; SILVA NETO, L. F. Efeito de leguminosas nas características químicas e matéria orgânica de um solo degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, p.457-462, 2003.

OADES, J.M. Mucilages at the root surface. **European Journal of Soil Science**, v. 29, n. 1 p. 1-16, 1978.

OADES, J.M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant Soil**, v. 76, p. 319-337, 1984.

PEREIRA, G.M.D.; RIBEIRO, K.G.; FERNANDES JÚNIOR, P.I.; VITAL, M.J.S.; KASUYA, M.C.M.; ZILLI, J.É. Ocorrência de fungos endofíticos "dark septate" em raízes de Oryza glumaepatula na Amazônia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 331-334, 2011.

PRESCOTT, C.E.; GRAYSTON, S.J. Tree species influence on microbial communities in litter and soil: current knowledge and research needs. **Forest Ecology and Management**, v. 309, 19–27, 2013.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. São Paulo, Nobel, 2002, 547p.

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais.** Campinas: IAC, 2001, 285 p.

REINERT, D. J.; REICHERT, R. M. **Propriedades físicas do solo**. Santa Maria, UFSM, 2006, 18 p.

RILLIG, M. C., MUMMEY, D. L. Mycorrhizas and soil structure. **New Phytologist**, v. 171, p. 41-53, 2006.

RODRIGUES, G. B.; MALTONI, K. L.; CASSIOLATO, A. M. R. Dinâmica da regeneração do subsolo de áreas degradadas dentro do bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 73-80, 2007.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRICIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.32, n. 1, p. 11-21, 2008.

SALTON, J.C.; TOMAZI, M. Sistema Radicular de Plantas e Qualidade do Solo. **Comunicado Técnico 198**. Embrapa Agropecuária Oeste. Dourados, Brasil, 2014, 6 p.

SALTON, J. C., MERCANTE, F. M., TOMAZI, M., ZANATTA, J. A., CONCENÇO, G., SILVA, W. M., RETORE, M. Integrated crop - livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, n. 1, p. 70-79, 2014.

SERPA, K. M.; MONTEIRO, F.N.; FALCÃO, K.S.; MENEZES, R.S.; FERREIRA, R. S.; PANACHUKI, E. Atributos físicos e teor de matéria orgânica em área de Cerrado sob diferentes sistemas de cultivo. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 3, 2020.

SHAOXUAN, H.; ZONGSUO, L.; RUILIAN, H.; YONG, W.; GUOBIN, L. Soil carbon dynamics during grass restoration on abandoned sloping cropland in the hilly area of the Loess Plateau, China. **CATENA**, v. 137, p. 679‑685, 2016.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 113-117, 1997.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, p. 311-317, 1998.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 28, p. 937- 944, 2004.

SPARKS, E.E.; BENFEY, P.N. The contribution of root systems to plant nutrient acquisition. **Plant Macronutrient Use Efficiency**, Academic Press, p. 83–92, 2017.

SKUODIENE, R.; NEKROSIENE, R. The effect of perennials as green manure on cereal productivity and disease incidence. **Spanish journal of agricultural research**, n. 1, p. 44-54, 2012.

THAKUR, M.P.; MILCU, A.; MANNING, P.; NIKLAUS, P.A.; ROSCHER, C.; POWER, S.; REICH, P.B.; SCHEU, S.; TILMAN, D.; AI, F. Plant diversity drives soil microbial biomass carbon in grasslands irrespective of global environmental change factors. **Global Change Biology**, v. 21, p. 4076–4085, 2015.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils, **Journal of Soil Science**, v. 33, p. 141-163, 1982.

VERGARA, C. *et al*. Contribution of dark septate fungi to the nutrient uptake and growth of rice plants. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 49, p. 67-78, 2018.

VICKERS, H.; GILLESPIE, M.; GRAVINA, A. Assessing the development of rehabilitated grasslands on post-mined landforms in north west Queensland, Australia. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 163, p. 72-84, 2012.

VIERHEILIG, H.; COUGHLAN, A.P., WYSS, U.; PICHE, Y. Ink and vinegar, a simple staining technique for arbuscular-mycorrhizal fungi. **Applied Environmental Microbiology**. v. 64, n. 12, p. 5004–5007, 1998.

WAGG, C.; PAUTLER, M.; MASSICOTTE, H. B.; PETERSON, R. L. The co-occurrence of ectomycorrhizal, arbuscular mycorrhizal, and dark septate fungi in seedlings of four members of the Pinaceae. **Mycorrhiza**, v. 18, n. 2, p. 103-110, 2008.

WANG, T.; KANG, F.; CHENG, X.; HAN, H.; JI, W. Soil organic carbon and total nitrogen stocks under different land uses in a hilly ecological restoration area of North China. **Soil & Tillage Research**. v. 163, p. 176‑184, 2016.

WHITE, G. N. Scanning electron microscopy. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.). **Methods of soil analysis:** Part 5, mineralogical methods. Madison: Wisconsin, Soil Science Society of America, p. 269-297, 2008.

XU, H.; SUN, Z.Y.; MA, R. Plant belowground habitat and stable layer of plant species in habitat. **Earth Sci. J.** China Univ. Geosci. v. 29, n. 2, 239–246, 2004.