

Microbiologia de agregados de pastagens abandonadas, em diferentes estágios de sucessão

Microbiology of aggregates in abandoned pastures at different succession stages

Rogério Melloni¹, Lucas Aléxey de Oliveira², Nara Luiza Pedrezzini Silva²

RESUMO: O Sul de Minas Gerais é uma região fortemente ligada à prática de pecuária, a qual tem promovido, em virtude de manejos inadequados, sérios problemas erosivos, muitas vezes relacionados à agregação do solo. Micro-organismos são considerados muito sensíveis a manejos aplicados ao solo e têm papel conhecido na sua agregação. O presente trabalho visou estudar o impacto do processo de sucessão em diferentes áreas de pastagens sobre micro-organismos e seus processos, diretamente em agregados de diferentes classes de tamanho, considerando-os como importantes habitats microbianos passíveis de interferências. Para isso foram utilizadas quatro áreas de pastagem, na sub-bacia do Ribeirão José Pereira, na cidade de Itajubá (MG), sob diferentes estágios de sucessão secundária, em ARGISSOLO VERMELHO Distrófico, sendo: A1 - área em estágio inicial de sucessão e solo parcialmente exposto; A2 - área em estágio médio de sucessão e solo parcialmente exposto; A3 - área sem sucessão, com solo totalmente coberto; e A4 - área em maior estágio de sucessão, com alta diversidade de espécies arbóreas e arbustivas, e solo totalmente coberto. As amostras de solo obtidas das áreas de estudo foram separadas em três classes de agregados de tamanhos: 0,5; 2,0; e 4,0 mm, antes da determinação dos atributos bioquímicos (atividade e biomassa microbianas, quociente metabólico - qCO_2) e microbiológicos (comprimento de micélio extrarradicular, densidades de bactérias, actinobactérias e fungos totais). As pastagens, em seus diferentes estágios de sucessão, afetaram diferentemente os micro-organismos do solo e seus processos. Para a grande maioria dos indicadores microbiológicos não houve efeito ou influência do tamanho dos agregados. A área em estágio de sucessão secundária mais avançada (A4) possibilitou maior atividade, biomassa e micélio extrarradicular em relação às demais áreas.

Palavras-chave: Agregação. Microbiota do solo. Pasto. Sucessão secundária.

ABSTRACT: The southern region of the state of Minas Gerais, Brazil, is highly characterized by livestock breeding which, due to inadequate managements, has produced erosion issues frequently related to soil aggregation. Microorganisms are highly sensitive to soil managements and have a role in their aggregation. Current analysis studies the impact of the succession process in different pasturelands on microorganisms and its processes especially in aggregates with different class sizes which are important microbes that may be subject to interferences. Four pasture areas were selected from the sub-basin of the river José Pereira, Itajubá MG, Brazil, at different stages of secondary succession, in dystrophic red argosol: A1 – area at the first stage of succession and partially exposed soil; A2 – area in mid-succession stage and partially exposed soil; A3 – area without any succession, with totally covered soil; A4 – area with the highest succession stage, with great diversity of tree and shrub species and totally covered soil. Soil samples from areas under analysis were separated into three classes of aggregates with 0.5; 2.0 and 4.0 mm, prior to the determination of biochemical (microbial activity and biomass, metabolic quotient - qCO_2) and microbiological (length of extra-radicular mycelium, density of bacteria, actinobacteria and total fungi) attributes. Pastures at different succession stages impacted differently soil microorganisms and processes. For most microbiological indexes, there was no effect or influence of aggregate size. Area with the most advanced secondary succession stage (A4) provided more activity, biomass and extra-radicular mycelium when compared to the other areas.

Keywords: Aggregation. Microbiota of the soil. Pastureland. Secondary succession.

Autor correspondente:

Rogério Melloni: rmelloni@unifei.edu.br

Recebido em: 17/05/2021

Aceito em: 09/09/2021

¹ Engenheiro agrônomo, mestre e doutor em Agronomia. Docente do Instituto de Recursos Naturais - Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá (MG), Brasil.

² Discentes do curso de graduação em Engenharia Ambiental Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá (MG), Brasil.



INTRODUÇÃO

Minas Gerais ocupa o segundo lugar quanto ao tamanho de áreas destinadas à pecuária. O Estado conta com uma área de pastagem de 20,5 milhões de ha, cerca de 34,96% do território estadual, sendo 56% com algum indício e outros 24% em estado severo de degradação. Especificamente, o Sul do Estado possui uma economia fortemente ligada à pecuária, com Itajubá (MG) possuindo, aproximadamente, 47% do seu território de pastagem, e 35% deles com indício de degradação (MALAQUIAS *et al.*, 2019). Uma importante microbacia presente na região, a qual envolve a Reserva Biológica Serra dos Toledos e várias nascentes, é a do Ribeirão José Pereira, dominada por relevo forte-ondulado (declividade entre 15 e 45%), com cobertura de pastagem, sem uso de práticas de manejo conservacionistas. Segundo Flauzino *et al.* (2016), a insustentabilidade produtiva nos ecossistemas de pastagens torna-se mais crítica nas áreas de exploração extensiva, como a do presente estudo, caracterizada pelo uso extrativista e pelo baixo nível tecnológico.

Como resultante do uso e do manejo inadequado da terra, principalmente em áreas de pastagem, tem-se uma progressiva destruição dos atributos ligados à qualidade do solo, intensificando-se os processos erosivos, aumentando a compactação do solo, perda de produtividade, empobrecimento microbiológico e danos ao ambiente (SILVA *et al.*, 2015). A utilização dos diferentes sistemas de manejo de pastagem proporciona, principalmente, alterações na estrutura do solo (BONETTI *et al.*, 2015; TAVARES FILHO; TESSIER, 2010), tendo que a relação entre o manejo e a qualidade do solo pode ser avaliada pelo seu efeito nos atributos físicos, químicos e microbiológicos do mesmo (ROCHA JUNIOR *et al.*, 2020).

A agregação do solo é um processo chave que afeta fortemente a estrutura do solo, a qual pode ser definida como o arranjo tridimensional de partículas primárias, matéria orgânica, agregados do solo e poros associados. Influencia diretamente a organização da biodiversidade do solo e processos biogeoquímicos (LEHAMANN; RILLIG, 2015), sendo alvo do presente estudo.

Como grande participante na formação de agregados (RILLIG; MUMMEY, 2006; BARBOSA *et al.*, 2019; LEHMAN *et al.*, 2020), segundo Goss, Carvalho e Brito (2017), o micélio extrarradicular total (MET) presente no solo atua, ainda, na absorção e transferência de nutrientes e moléculas sinalizadoras entre plantas diferentes, contribuindo para o sucesso do desenvolvimento da cobertura vegetal.

De forma complementar, Pimentel, Dionísio e Signor (2016) indicam que as bactérias também, assim como os fungos anteriormente citados, possuem um importante papel no solo, entre eles o de indicadora de qualidade, decomposição de material orgânico, ciclagem de nutrientes, fixação de nitrogênio e agregação do solo. Sabe-se, ainda, que as bactérias possuem uma alta produção de exopolissacarídeos, que causam a agregação do solo em microagregados

e, por consequência, dos macroagregados, e atuam indiretamente na sua estabilização (MITSUIKI, 2006).

Portanto, os processos de uso e ocupação do solo apresentam influência no comportamento de micro-organismos e vice-versa. Com isso, vários estudos buscam relacionar micro-organismos do solo com a sua agregação (CARDOSO; ANDREOTE, 2016; MOREIRA; SIQUEIRA, 2006), os quais podem atuar como bioindicadores da qualidade do solo, especialmente em áreas cobertas com pastagem, como a deste estudo.

Quando pastagens são abandonadas, processos de sucessão ecológica tendem a ocorrer. O termo “sucessão ecológica” tem sido empregado há anos, pois seu conceito é fundamental na Ecologia para a compreensão da dinâmica e o entendimento das comunidades (SILVA *et al.*, 2012). Para Odum (1988), por exemplo, a sucessão ecológica está relacionada às modificações estruturais das espécies e, ao longo do tempo, nos processos da comunidade. Porém, quando a formação da comunidade acontece com o substrato parcialmente sem vegetação é denominada de sucessão primária e, por outro, como nas áreas selecionadas neste trabalho, se a comunidade começar num local antes ocupado, como o caso de pastagens abandonadas, chama-se de sucessão secundária.

Vários estudos têm sido conduzidos sobre o efeito do abandono de pastagens na diversificação da cobertura vegetal por processos de sucessão (VIEIRA; PESSOA, 2001; PELUZIO *et al.*, 2018), sendo um mais amplo realizado por Fragoso e Carpanezzi (2017), os quais confirmaram a vulnerabilidade do ambiente à colonização por gramíneas exóticas invasoras, quando não instaladas propositalmente, como as espécies do gênero *Urochloa* (*Brachiaria*), largamente usadas em pastagens brasileiras, as quais são consideradas excelentes competidoras com alto poder de resistência. Pastagens abandonadas por tempos diferentes apresentam níveis ou estágios diferentes de sucessão secundária, formando capoeiras (SILVA *et al.*, 2012), os quais podem afetar diretamente a qualidade do solo, em maior ênfase a microbiota do solo.

Nesse sentido, o presente trabalho visou estudar o impacto da sucessão secundária de pastagens abandonadas em micro-organismos e seus processos, diretamente em agregados de diferentes classes de tamanho, considerando-os como importantes habitats microbianos passíveis de interferências naturais e antrópicas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado na microbacia do Ribeirão José Pereira, localizado no município de Itajubá, Minas Gerais. A grande área de estudo apresenta domínio de ARGISSOLO VERMELHO Distrófico latossólico de textura argilosa e média (LIMA *et al.*, 2021). A região é caracterizada pela grande incidência de solo sob pastagens, com vegetação rasteira e arbustiva, de braquiária, utilizada para práticas agropecuárias e agricultura local. A

microbacia é responsável pelo abastecimento do Ribeirão José Pereira, um dos principais afluentes do Rio Sapucaí na região (FLAUZINO *et al.*, 2016).

A grande área de estudo foi dividida em quatro áreas, selecionadas por apresentarem mesmo tipo de solo e serem similares nos processos antrópicos sofridos ao longo do tempo, degradadas por atividades agropecuárias e incidências de queimadas e três delas abandonadas. Nesse sentido, após abandono e/ou uso inconstante dessas áreas, as áreas se diferenciaram pelo estágio de sucessão secundária, formando capoeiras, cuja descrição se encontra no Quadro 1.

Quadro 1. Caracterização das áreas de estudo selecionadas

Áreas de estudo	Identificação simplificada	Coordenadas geográficas	Descrição da área
A1	Área de capoeira baixa	22°25'7.47"S 45°25'9.37"O	Área aproximada de 7500 m ² , destinada, principalmente, à pecuária de corte. Baixo estágio de sucessão secundária, com pouca diversidade de espécies arbóreas e arbustivas; solo totalmente coberto, sem sinais aparentes de erosão. Apresenta altitude máxima de 924 e mínima de 889 m, classificando-se como uma área de relevo forte ondulado, com 38% de declividade média.
A2	Área de capoeira alta	22°25'3.09"S 45°26'14.89"O	Área aproximada de 4000 m ² , destinando-se à pecuária de corte, produção de leite e de equinos. Médio estágio de sucessão secundária, com pouca diversidade de espécies arbóreas e arbustivas; recorrente circulação de gado e reincidência de queimadas antrópicas; solo parcialmente coberto, com alguns sinais de erosão. Apresenta altitude máxima de 886 e mínima de 871 m, com 26% de declividade média, classificando-se como uma área de relevo forte ondulado.
A3	Área de pasto homogêneo	22°24'12.11"S 45°26'46.75"O	Área aproximada de 4100 m ² , destinando-se à pecuária de corte e equinocultura. Homogênea e ativa, sem sucessão secundária, apresenta solo coberto, pouca diversidade de espécies arbóreas e arbustivas, com predominância de espécies rasteiras. Altitude máxima de 889 e mínima de 871 m, enquadrando-se na classe de relevo forte ondulado da região, com declividade média de 22%.
A4	Área de pasto com mata	22°24'18.93"S 45°25'42.18"O	Área aproximada de 4200 m ² , em elevado estágio de sucessão secundária, destinando-se, ainda, à pecuária de corte e equinocultura, apesar de poucas gramíneas. Possui grande diversidade de espécies arbóreas e arbustivas; solo totalmente coberto com presença de serapilheira; pouca circulação de gado. Apresenta altitude máxima de 889 e mínima de 873 m, com declividade média de 18%, sendo a área de menor declividade, mas, ainda assim, com relevo classificado como forte ondulado.

Fonte: Dados da pesquisa.

Para a amostragem do solo, cada área foi dividida em três subáreas, sendo três coletas simples para formar uma composta deformada em cada subárea, em profundidade de 0-20 cm, por meio de enxada, cuja metodologia está descrita no Manual de Coleta de Solo no Campo (SANTOS *et al.*, 2005). Posteriormente, parte das amostras foi submetida à análise química

(Tabela 1) e parte encaminhada para determinação da umidade atual, por meio da diferença de peso antes e após secagem em estufa a 110 °C, antes da separação dos agregados em classes diferentes de tamanho.

Tabela 1. Resultados da caracterização química das amostras de solo das diferentes áreas de estudo

Áreas	pH	K	P	Ca	Mg	Al	H + Al	SB
	-	---mg dm ⁻³ ---			-----cmol _c dm ⁻³ -----			
A1	5,7a	77,16a	1,12ab	2,49a	0,8a	0,17b	3,79b	3,49a
A2	5,36ba	37,9a	0,74b	1,98a	0,45ab	0,37b	4,32b	2,54b
A3	4,9cb	32,73a	1,35a	0,66b	0,11b	1,05a	6,85a	0,85c
A4	4,76c	36,17a	1,61a	0,45b	0,22b	1,35a	8,55a	0,77c

Áreas	t	T	V	m	MO	P rem
	-----cmol _c dm ⁻³ -----		---%---		dag kg ⁻¹	mg L ⁻¹
A1	3,66a	7,29ab	48,17a	4,55b	2,3a	35,26a
A2	2,91b	6,86b	37,69a	13,01b	2,0a	30,13a
A3	1,91c	7,7ab	11,22b	55,27a	2,4a	20,24b
A4	2,13c	9,33a	8,45b	63,85a	2,3a	19,53b

A1 - capoeira baixa; A2 - capoeira alta; A3 - pasto homogêneo; A4 - pasto com mata.

Médias seguidas de mesma letra (comparação entre áreas de estudo) não diferem entre si, por Tukey, a 5% de significância.

Para separar as amostras de solo em diferentes classes de tamanho de agregados foi utilizado agitador com peneiramento a seco, dotado de um conjunto de peneiras de tamanhos 4,00 mm, 2,00 mm, 1,00 mm e 0,500 mm, colocadas de modo decrescente de aberturas de malhas. A amostra de solo foi alocada na peneira superior (4,00 mm) e o conjunto acoplado ao agitador foi operado por 15 min. Após esse tempo, foram selecionados os agregados dos tamanhos de 4,0 mm, 2,0 mm e 0,5 mm para realização das análises microbiológicas. As amostras dos agregados de solo separados foram alocadas em sacos previamente identificados e conservadas em temperatura de até 10 °C.

As análises microbiológicas constaram da determinação de carbono da biomassa microbiana e atividade microbiana, conforme método proposto por Ferreira, Camargo e Vidor (1999), denominado de irradiação/incubação, diretamente nos diferentes tamanhos dos agregados. Após irradiação por forno micro-ondas e incubação por 12 dias, o CO₂ foi coletado em solução de NaOH 1 mol L⁻¹, antes da titulação com HCl 1 mol L⁻¹. O quociente metabólico (qCO₂) foi obtido pela razão entre a atividade microbiana e o carbono da biomassa (ANDERSON; DOMSCH, 1993).

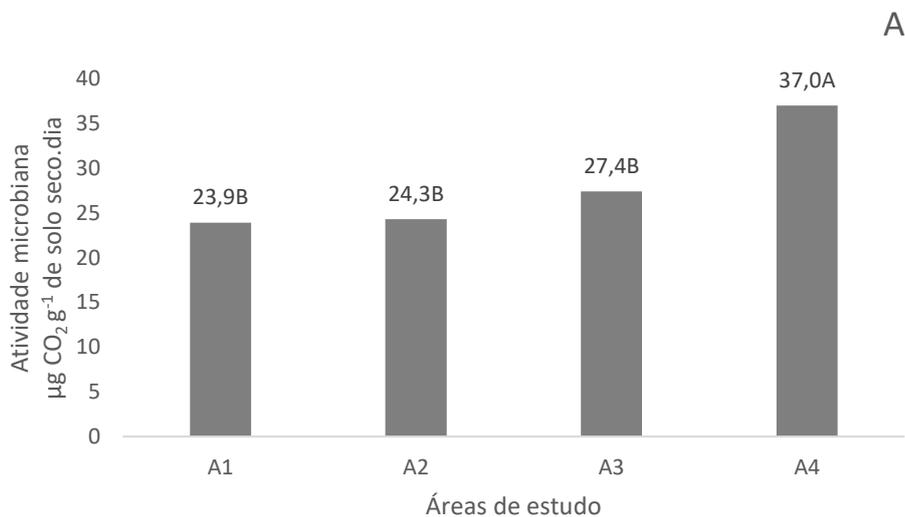
Já o micélio extrarradicular total (MET) de FMAs foi determinado pelo método proposto por Melloni e Cardoso (1999), basicamente por agitação da suspensão contendo amostra dos agregados de solo, peneiramento e filtração a vácuo em membrana de triacetato de celulose, quadriculada, e 0,45 µm de porosidade, com posterior contagem das hifas sob ocular reticulada, em microscópio óptico.

Para determinação da densidade de bactérias totais, actinobactérias totais e fungos totais, utilizaram-se os meios ágar nutriente, Aaronson e Martin, respectivamente. As placas foram inoculadas com suspensões das amostras de solo de 10^{-3} a 10^{-6} , e incubadas em temperatura de 28 °C, por 3 dias para as bactérias e por 6 dias para fungos, antes da contagem das unidades formadoras de colônia (UFC), segundo metodologia apresentada em Melloni *et al.* (2001).

Todos os dados microbiológicos foram, previamente, submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk (0,05), realizando as transformações, caso necessárias. Posteriormente, fez-se a análise de variância e o teste de médias de Scott Knott a 5%, por meio do *software* Sisvar (FERREIRA, 2011). A análise multivariada por componentes principais foi feita com todos os dados microbiológicos nas diferentes classes de tamanho de agregados, utilizando o mesmo programa estatístico.

3 RESULTADO E DISCUSSÃO

Para atividade microbiana (Figura 1A) e comprimento de micélio extrarradicular (Figura 1B) houve efeito somente de áreas, independentemente do tamanho dos agregados. Não se observou efeito significativo para quociente metabólico (qCO_2), o qual mostrou-se não determinante na discriminação das áreas e agregados, com valores de 0,10 a 0,15 $\mu g CO_2 \mu g C^{-1} \cdot g$ de solo seco.dia. Somente para carbono da biomassa microbiana (Figura 2), houve efeito da interação entre áreas e tamanhos de agregados.



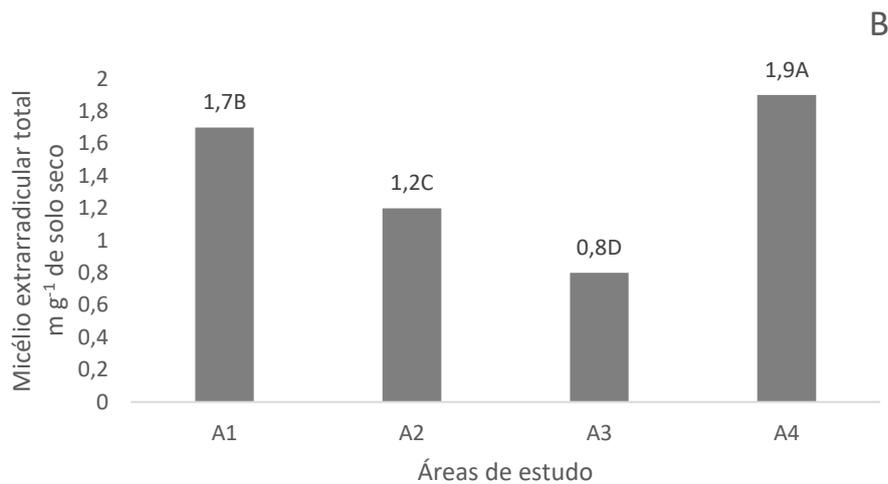


Figura 1. Médias de atividade microbiana (A) e comprimento de micélio extrarradicular total (B) em amostras de solo das diferentes áreas de estudo, independentemente do tamanho de agregados. A1 - capoeira baixa; A2 - capoeira alta; A3 - pasto homogêneo; A4 - pasto com mata. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, por Scott-Knott, a 5% de significância.

A área A4 se destacou com os maiores valores de atividade e comprimento de micélio, em comparação às demais áreas (Figura 1), com maiores discrepâncias para o comprimento de micélio. Nesse sentido, verifica-se que o estágio de sucessão, ou a variação da cobertura do solo ao longo do tempo, teve maior efeito nessas variáveis do que o tamanho dos agregados, ou seja, em pastagens abandonadas e em sucessão, o impacto é muito maior na atividade e comprimento de micélio, independentemente do tamanho dos agregados do solo.

Corroborando os dados observados de MET (Figura 1B) para a área A4, principalmente, Caravaca *et al.* (2006) associaram maior comprimento de MET com o aumento de material orgânico depositado sobre o solo e, posteriormente, ao crescimento das plantas, assim como vários autores têm correlacionado positivamente comprimento de micélio com a baixa fertilidade do solo, principalmente P (MELLONI; CARDOSO, 1999; NOGUEIRA; CARDOSO, 2000; MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; RAMOS; MARTINS, 2010; CARDOSO; ANDREOTE, 2016; ZHIFANG *et al.*, 2019). Segundo os autores supracitados, além da interferência de fatores físicos, químicos e biológicos, o teor de P nas plantas pode influenciar a quantidade ou a composição dos exsudatos radiculares, o que afetaria o crescimento, positivo ou negativo, do micélio extrarradicular dos FMAs e a translocação de nutrientes à planta hospedeira. O baixo teor de P remanescente na área A4 (Tabela 1), aliado, possivelmente, aos baixos teores foliares de P nas plantas (não determinado), contribuíram para o maior MET observado nessa área, independentemente do tamanho dos agregados. Cabe lembrar que o P remanescente representa a quantidade do P-adicionado ao solo que fica na solução de equilíbrio, após definido tempo de contato com o solo. Sua determinação, como feita no presente estudo, auxilia na interpretação da disponibilidade de P, possibilitando inferir sobre a capacidade tampão do solo, além de estratificar, com maior segurança, quando comparado ao P total, a interpretação das análises de solos e as recomendações de adubação (LISBOA *et al.*, 2012).

Outra observação que deve ser registrada diz respeito aos dados de MET da área A4 divergirem dos resultados obtidos por Hagenbo *et al.* (2019). Esses autores, estudando o efeito da idade de florestas no crescimento e eficiência de uso do C e N pelo MET, observaram que a eficiência no uso desses elementos diminui com a idade da floresta, em torno de 65%, supostamente em função da variação da composição de fungos ao longo do tempo e de ajustes metabólicos variados, reduzindo a própria biomassa (ou produção de micélio), em época de menor disponibilidade de nutrientes no solo. Isso não foi observado no presente trabalho, em que maior micélio extrarradicular foi observado na área A4 (Figura 1B), mesmo estando em processo de sucessão mais adiantado, com presença de espécies arbóreas. Pode-se dizer que, atento aos resultados dos autores supracitados, mesmo em estágio maior, o processo de sucessão ainda está em andamento, sem se caracterizar efetivamente como uma floresta.

Nesse sentido, enfatiza-se que os FMAs, produtores de grandes extensões de micélio extrarradicular, com capacidade de incorporar C no solo e formação de agregados, são considerados fundamentais ao funcionamento do solo, principalmente por construírem nichos para outros micro-organismos do solo durante a revegetação, amentando a diversidade do microbioma do solo, estabilidade da estrutura do solo, ciclagem de nutrientes (QIN *et al.*, 2019) e a própria atividade microbiana registrada nesses ambientes (Figura 1A).

Para carbono da biomassa microbiana, apesar das variações observadas, o maior valor foi obtido em agregados menores (0,5 mm) da área A4, enquanto o menor valor foi observado em agregados maiores (4,0 mm) das áreas A1 e A2 (Figura 2).

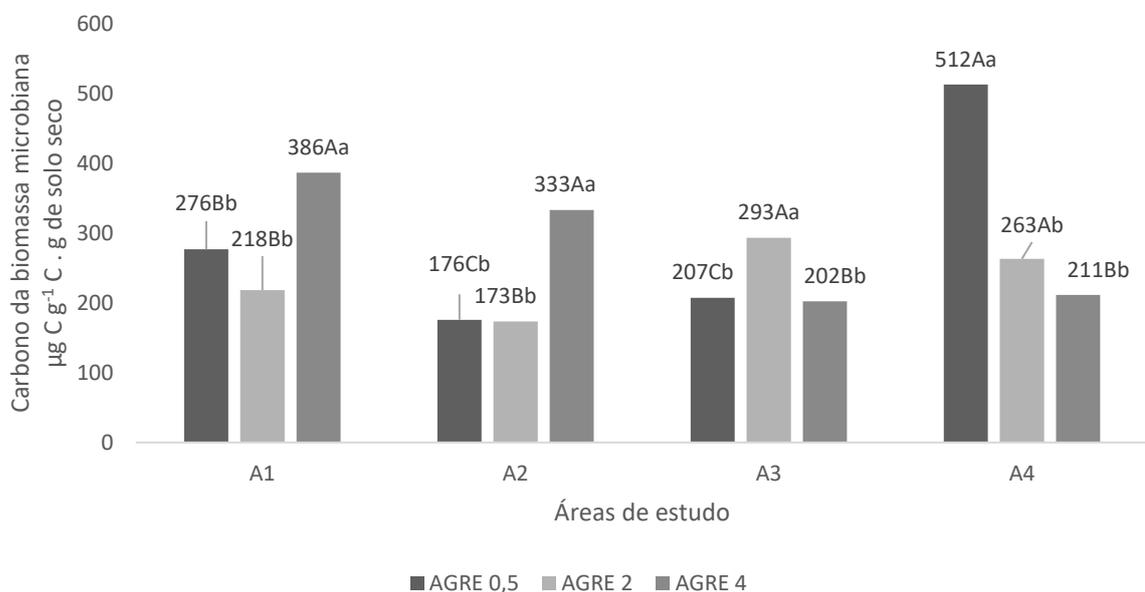


Figura 2. Carbono da biomassa microbiana em agregados (AGRE) de diferentes tamanhos, nas amostras de solo das áreas de estudo.

A1 - capoeira baixa; A2 - capoeira alta; A3 - pasto homogêneo; A4 - pasto com mata. Letras minúsculas são comparadas entre agregados dentro de cada área de estudo. Letras maiúsculas são comparadas entre áreas dentro de cada agregado. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, por Scott-Knott, a 5% de significância.

Como o teor de matéria orgânica foi semelhante em todas as áreas de estudo (Tabela 1), as explicações para esse fato não são devidas a essa variável, mas, possivelmente, à sua qualidade ou a outras alterações da rizosfera proporcionadas pelas raízes da maior diversidade vegetal observada, mas não avaliada, nos agregados menores da área A4. Deve-se salientar que na rizosfera há grande produção de metabólitos de alta diversidade química, inicialmente produzidos pelos micro-organismos do solo e, em seguida, provocando respostas do sistema radicular e modificações de todo aquele ambiente (KORENBLUM *et al.*, 2020). Portanto, maior rizosfera proporcionada pela maior diversidade vegetal em estágios avançados de sucessão secundária afetou positivamente a biomassa microbiana, principalmente na área A4. Especificamente, a maior biomassa microbiana em agregados menores (0,5 mm) da área A4 pode estar relacionada às melhores condições edafoclimáticas proporcionadas pela sucessão secundária, como redução da temperatura do solo e aumento/manutenção da sua umidade, favorecendo maior desenvolvimento de raízes finas e seu maior efeito nesses agregados menores, conforme enfatizado no trabalho de Lee e Jose (2003).

Em estudo anterior, em diferentes áreas, Melloni, Melloni e Vieira (2013) avaliaram modificações impostas por diferentes tipos de uso da terra (pastagem, mata de eucalipto, mata com araucária e áreas agrícola) em atributos químicos, físicos e microbiológicos (atividade e carbono microbianos, MET e quociente metabólico - qCO_2) em classes de tamanho de agregados (I - 4,00 a 2,36 mm; II - 2,36 a 1,18 mm; III - 1,18 a 0,60 mm; IV - 0,60 a 0,30 mm; e V - 0,30 a 0,15 mm) de um LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO, também no Sul de Minas Gerais. Independentemente do tipo de uso, a qualidade microbiana dos agregados foi semelhante nas diferentes classes: redução de MET, aumento da atividade microbiana, redução da biomassa e aumento do qCO_2 da classe I para a classe V, ou seja, de agregados maiores para os menores. No caso específico do presente trabalho, em que somente pastagens sob estágios diferentes de sucessão secundária foram estudadas, foi obtido efeito significativo da interação áreas e agregados exclusivamente para a variável carbono da biomassa microbiana (Figura 2). Nesse sentido, verifica-se que, para as condições estudadas, estágios de sucessão secundária estabelecidos, quando pastos são abandonados, afetam somente a biomassa microbiana nas diferentes classes de agregados. Especificamente, redução da biomassa com o aumento do tamanho dos agregados só foi observado para a área A4, concordando com os resultados dos autores supracitados. Para as pastagens A1 e A2, áreas em processo mais inicial de sucessão secundária, esse resultado foi invertido, ou seja, a biomassa microbiana foi maior em agregados maiores (Figura 2).

Assim como discutido por Melloni, Melloni e Vieira (2013), recomenda-se que sejam também avaliadas a composição química e degradabilidade do material orgânico depositado sobre o solo, e não somente o seu teor como realizado neste trabalho (Tabela 1), já que a decomposição microbiana está diretamente relacionada às características químicas do material orgânico (RIBEIRO *et al.*, 2011). Nesse sentido, maior atividade microbiana em solo da área

A4, independentemente do tamanho do agregado (Figura 1A), pode estar relacionada à melhor qualidade do material orgânico depositado ao longo do estágio de sucessão secundária, principalmente à relação C/N, em função da maior diversidade vegetal quando comparada a um pasto homogêneo com braquiária, favorecendo a decomposição heterotrófica.

Para reforçar, Abiven *et al.* (2008), avaliando o efeito da adição de material orgânico em solos, concluíram que um controle adequado da adição deste material proporciona aumento considerável na estabilidade de agregados, reduzindo possíveis processos erosivos. Porém, esse aumento só é possível se for levada em consideração, também, a qualidade desse material orgânico introduzido, como também ocorre durante um processo de sucessão. Os autores citam, como exemplo, os compostos lábeis e o mucigel, representando a fração da matéria orgânica de forte influência na agregação, enquanto compostos recalcitrantes, como a lignina, têm efeito insignificante ou quase nulo na estabilidade dos agregados.

Especificamente com relação aos grupos microbianos estudados, bactérias, actinobactérias e fungos totais, não houve efeito da interação entre áreas de estudo e os tamanhos de agregados. Nesse sentido, somente o efeito das áreas foi observado, assim como para atividade e MET (Figura 1), como se percebe na Figura 3.

Cabe salientar que a escolha desses três grupos microbianos visava abranger microorganismos de grandes diferenças morfológicas, estruturais e metabólicas, sendo as actinobactérias consideradas um grupo intermediário, responsável pela degradação de macromoléculas complexas comumente encontradas no solo, principalmente aqueles que recebem material orgânico, além da síntese e excreção de milhares de metabólitos, como os antibióticos (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

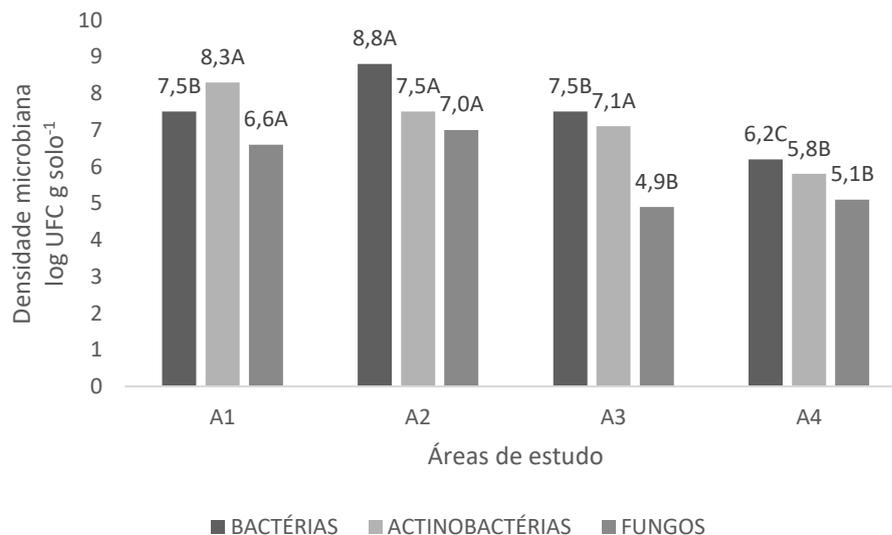


Figura 3. Densidade de bactérias, actinobactérias e fungos em amostras de solo das áreas de estudo, independentemente do tamanho dos agregados.

A1 - capoeira baixa; A2 - capoeira alta; A3 - pasto homogêneo; A4 - pasto com mata. Médias seguidas de mesma letra (comparação entre áreas de estudo) não diferem entre si, por Scott-Knott, a 5% de significância.

Apesar de variações, contrariando ao observado para as demais variáveis microbiológicas, os menores valores de densidade microbiana foram observados na área A4. Isso significa que nessa área de estudo, com pasto em maior estágio de sucessão secundária, a densidade microbiana deva estar com crescimento controlado ou inibido por alguma outra variável, apesar dos maiores valores de atividade e MET (Figura 1). Os valores de qCO_2 observados nas áreas de estudo, sem diferença significativa, conforme já discutido, não explicam esse resultado e nem estão relacionados à possibilidade de estresse microbiano. A relação entre qCO_2 e estresse microbiano, proposta por Wardle e Ghani (1995), nem sempre tem sido evidente também em outros trabalhos, apesar de baixos valores estarem associados, normalmente, à maior eficiência na conversão de material orgânico à biomassa microbiana (ANTISARI *et al.*, 2021). Nesse sentido, ressalvas devem ser feitas na sua interpretação, pois esses autores anteriormente citados salientaram que tal quociente pode responder a estresses (como limitações de nutrientes ou acidez), mas não a perturbações, limitando o seu uso como bioindicador da qualidade do solo, por exemplo. Contudo, aliado à facilidade de determinação, já que se trata de uma relação calculada entre atividade e biomassa microbianas, pode indicar tanto a eficiência em utilizar fontes de C quanto o grau de limitação por substrato da biomassa microbiana em áreas sob diferentes manejos.

Apesar do qCO_2 não indicar situações de estresse microbiano nas presentes áreas de estudo, verificaram-se limitações químicas do solo na área A4, em relação às demais, que podem explicar a baixa densidade dos grupos microbianos avaliados, quando se observam as variáveis de fertilidade (Tabela 1). Apesar do teor de matéria orgânica ser homogêneo para todas as áreas (entre 2,0 e 2,3 dag kg⁻¹), conforme comentado anteriormente, restrições químicas foram observadas, como maior acidez (pH, Al, H+Al, m) e baixa fertilidade (Ca, Mg, SB, t, P rem) na área A4, as quais interferem negativamente no crescimento e metabolismo microbianos (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; CARDOSO; ANDREOTE, 2016). Porém, essas limitações nutricionais, apesar de dificultarem o crescimento microbiano (densidade de bactérias, actinobactérias e fungos aqui estudados), não foram suficientes para impedir a maior atividade (Figura 1A) e comprimento de micélio extrarradicular (Figura 1B).

Com os valores das variáveis microbiológicas nos diferentes agregados das áreas de estudo, aplicou-se análise multivariada de componentes principais, cujo resultado pode ser visto, inicialmente, pelos autovetores da Tabela 2. Dessa forma, em virtude dos resultados observados nos componentes principais 1 e 2, em que todas as variáveis apresentaram altas relações com um ou outro (acima de 0,40), somente esses foram apresentados na Figura 4.

Através da Figura 4, verifica-se uma separação espacial das áreas em dois grandes grupos: área A4 e o grupo das áreas A1 + (A2 e A3), independentemente da distribuição dos dados relacionados ao tamanho dos agregados. Esse resultado corrobora os demais (exceto biomassa microbiana, Figura 2) apresentados anteriormente (Figuras 1 e 3). A área A4, com

pastagem abandonada em maior estágio de sucessão secundária (Quadro 1), apresentou maior relação com atividade e biomassa microbianas, e MET, comprovando o efeito positivo da sucessão e enriquecimento natural de plantas nos micro-organismos do solo e seus processos. Contrariamente, as demais áreas, em sucessão inicial (A1), mediana (A2) e sem sucessão (A3), apresentam-se em processo de adaptações e ajustes microbianos, atualmente com maiores densidades de bactérias, actinobactérias e fungos.

Tabela 2. Autovetores das variáveis microbiológicas extraídos dos componentes principais 1, 2 e 3, assim como a porcentagem de relação dos componentes com as variáveis

Variáveis microbiológicas	Componente 1 (33,83%)	Componente 2 (21,64%)	Componente 3 (13,47%)
Atividade microbiana	<u>-0,46</u>	-0,07	0,29
Biomassa microbiana	-0,20	<u>0,57</u>	-0,31
Quociente metabólico - qCO ₂	-0,11	<u>-0,59</u>	<u>0,42</u>
Micélio extrarradicular	-0,35	<u>0,47</u>	<u>0,56</u>
Bactérias totais	<u>0,46</u>	-0,02	0,00
Actinobactérias totais	<u>0,47</u>	0,16	0,18
Fungos totais	<u>0,42</u>	0,28	<u>0,54</u>

Valores acima de 0,40 foram considerados de alta relação, sendo sublinhados.

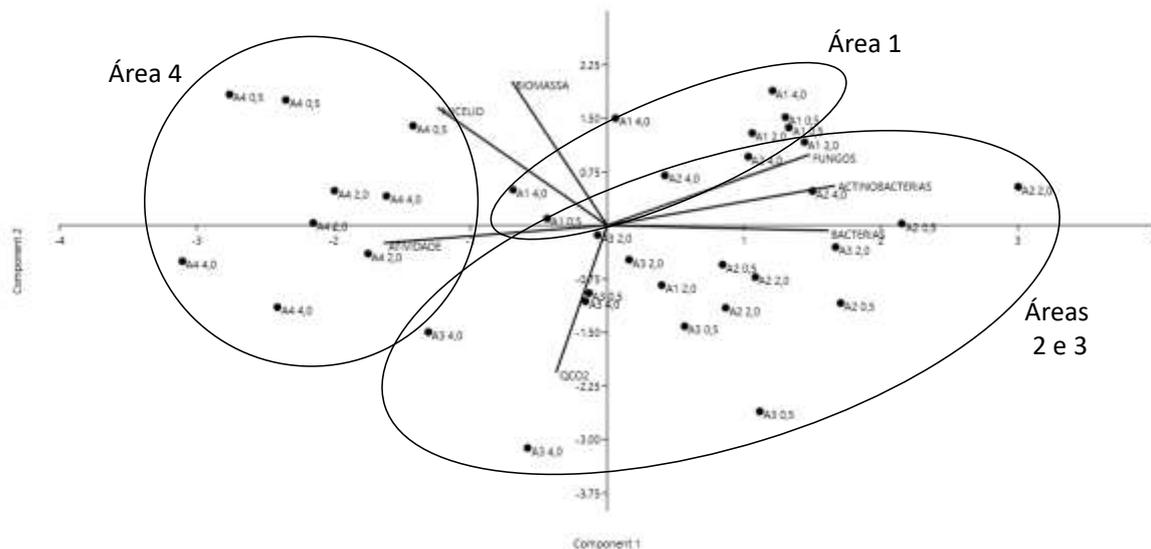


Figura 4. Resultado da análise de componentes principais 1 e 2, considerando todas as variáveis microbiológicas e classes de tamanho de agregados, nas diferentes áreas de estudo. A1 - capoeira baixa; A2 - capoeira alta; A3 - pasto homogêneo; A4 - pasto com mata.

Finalmente, tal resultado evidencia que, em áreas de pastagens abandonadas, o efeito da sucessão secundária é maior na microbiota do solo, dentro de um contexto generalizado, do que, pontualmente, nas classes estudadas de tamanho dos agregados (0,5; 2,0; e 4,0 mm). Dessa forma, estratégias de recuperação de solos de pastagens abandonadas devem priorizar processos de incentivo à ocorrência de sucessão, natural ou artificial, de tal forma que beneficie os micro-organismos e seus processos, e garanta maior sustentabilidade desses ambientes.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pastagens, em diferentes estágios de sucessão, afetam diferentemente os micro-organismos do solo e seus processos.

Com exceção da biomassa microbiana, não houve efeito ou influência do tamanho de agregados para a grande maioria das variáveis microbiológicas (atividade, comprimento de micélio extrarradicular, densidade de bactérias, actinobactérias e fungos totais).

A área em maior estágio de sucessão (A4) possibilitou maior atividade, biomassa e micélio extrarradicular, em relação às demais áreas em transição, que apresentaram maior densidade de bactérias, actinobactérias e fungos totais.

5 AGRADECIMENTO

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio.

REFERÊNCIAS

ABIVEN, S.; MENASSERI, S.; CHENU, C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability - a literature analysis. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 41, n. 1, p. 1-12, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.09.015>.

ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 25, n. 3, p. 393-395, 1993. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90140-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90140-7).

ANTISARI, L. V. *et al.* Soil Biochemical Indicators and Biological Fertility in Agricultural Soils: A Case Study from Northern Italy. **Minerals**, Basel, v. 11, n. 2, p. 219, 2021. <https://doi.org/10.3390/min11020219>.

BARBOSA, M. V. *et al.* Do different arbuscular mycorrhizal fungi affect the formation and stability of soil aggregates? **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 43, 2019. <https://doi.org/10.1590/1413-7054201943003519>.

BONETTI, J. A. *et al.* Influência do sistema integrado de produção agropecuária no solo e na produtividade de soja e braquiária. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 1, 2015. <https://doi.org/10.1590/1983-40632015v4529625>.

CARAVACA, F. *et al.* Formation of stable aggregates in rhizosphere soil of *Juniperus oxycedrus*: Effect of AM fungi and organic amendments. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 33, n. 1, p. 30-38, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.09.001>.

CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do solo**. 2^a ed. Piracicaba: ESALQ, 2016. 221p.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 35, p. 3-21, 1994. Special publication. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>.

FERREIRA, A. S.; CAMARGO, F. A. O.; VIDOR, C. Utilização de microondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 991-996, 1999. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000400026>.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>.

FLAUZINO, B. K. *et al.* Mapeamento da capacidade de uso da terra como contribuição ao planejamento de uso do solo em sub-bacia hidrográfica piloto no sul de Minas Gerais. **Geociências**, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 277-287, 2016. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/9025>. Acesso em: 16 maio. 2021.

FRAGOSO, R. O.; CARPANEZZI, A. A. Barreiras ao estabelecimento da regeneração natural em áreas de pastagens abandonadas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 4, p. 1451-1464, 2017. <https://doi.org/10.5902/1980509830331>.

GOSS, M. J.; CARVALHO, M.; BRITO, I. The Significance of an Intact Extraradical Mycelium and Early Root Colonization in Managing Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *In*: GOSS, M. J.; CARVALHO, M.; BRITO, I. (ed.). **Functional Diversity of Mycorrhiza and Sustainable Agriculture. Management to Overcome Biotic and Abiotic Stresses**. London: Academic Press, 2017. p. 111-130, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804244-1.00006-X>.

HAGENBO, A. *et al.* Carbon use efficiency of mycorrhizal fungal mycelium increases during the growing season but decreases with forest age across a *Pinus sylvestris* chronosequence. **Journal of Ecology**, London, v. 107, n. 6, p. 2808-2822, 2019. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13209>.

KORENBLUM, E. *et al.* Rhizosphere microbiome mediates systemic root metabolite exudation by root-to-root signaling. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, n. 7, p. 3874-3883, 2020. <https://doi.org/10.1073/pnas.1912130117>.

LEE, K. H.; JOSE, S. Soil respiration and microbial biomass in a pecan - cotton alley cropping system in Southern USA. **Agroforestry Systems**, v. 58, p. 45-54, 2003. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1025404019211>.

LEHMANN, A. *et al.* Fungal Traits Important for Soil Aggregation. **Frontiers in Microbiology**, Lausanne, v. 10, p. 2904, 2020. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02904>.

LEHMANN, A.; RILLIG, M. C. Understanding mechanisms of soil biota involvement in soil aggregation: A way forward with saprobic fungi? **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 88, 298e302, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.06.006>.

LIMA, O. *et al.* Soil catenas in a pilot sub-basin in the region of Itajubá, Minas Gerais state, Brazil, for environmental planning. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 42, n. 3, suplemento 1, p. 1511-1528, 2021. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2021v42n3Supl1p1511>.

LISBOA, B. B. *et al.* Determinação do fósforo remanescente como método alternativo à textura na indicação da classe de disponibilidade de fósforo em três solos. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 81-84, 2012. Disponível em: <http://revistapag.agricultura.rs.gov.br/ojs/index.php/revistapag/article/view/218?articlesBySa meAuthorPage=2>. Acesso em: 16 maio. 2021.

MALAQUIAS, F. S. S. *et al.* Atlas digital das pastagens brasileiras: dados e informações sobre a maior classe de uso da terra do Brasil. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., 2019, Santos. **Anais [...]**. Santos: INPE, 2019. p. 2299-2302. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2019/10.31.15.41/doc/98053.pdf>. Acesso em: 16 maio. 2021.

MELLONI, R. *et al.* Características biológicas de solos sob mata ciliar e campo cerrado no sul de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 25, n. 1, p. 7-13, 2001. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/Caracteristicas_Biol_Solos_MtCil_Cer_MGID-4meHPpQx4F.pdf. Acesso em: 16 maio. 2021.

MELLONI, R.; CARDOSO, E. J. B. N. Quantificação de micélio extrarradicular de fungos micorrízicos arbusculares em plantas cítricas - I: método empregado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 1, p. 53-58, jan./mar. 1999. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000100007>.

MELLONI, R.; MELLONI, E. G. P.; VIEIRA, L. L. Uso da terra e a qualidade microbiana de agregados de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1678-1688, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000600024>.

MITSUIKI, C. **Efeito de sistemas de preparo de solo e do uso de Microrganismos Eficazes nas propriedades físicas do solo, produtividade e qualidade de batata**. 2006. 97p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2006.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do solo**. Lavras: Ed. UFLA, 2006.

NOGUEIRA, M. A.; CARDOSO, E. J. B. N. Produção de micélio externo por fungos micorrízicos arbusculares e crescimento da soja em função de doses de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 329-338, 2000. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000200010>.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988.

PELUZIO, T. N. O. *et al.* Regeneração natural de pastagem *versus* fragmento de floresta ombrófila densa Alto Montana. **Nucleus**, Ituverava, v. 15, n. 2, p. 371-382, 2018. <https://doi.org/10.3738/1982.2278.2874>.

PIMENTEL, I. C.; DIONÍSIO, J. A.; SIGNOR, D. Bactérias. In: DIONÍSIO, J. A. *et al.* **Guia prático de biologia do solo**. Curitiba: SBCS/NEPAR, 2016. p. 17-22. Disponível em: http://www.dsea.ufpr.br/publicacoes/guia_pratico_biologia_solo.pdf. Acesso em: 16 maio. 2021.

QIN, M. *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi serve as keystone taxa for revegetation on the Tibetan Plateau. **Journal of Basic Microbiology**, v. 59, n. 6, p. 609-620, 2019. <https://doi.org/10.1002/jobm.201900060>.

RAMOS, A. C.; MARTINS, M. A. Fisiologia de micorrizas arbusculares. In: SIQUEIRA, J. O.; SOUZA, F. A.; CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M. (ed.). **Micorrizas: 30 anos de pesquisas no Brasil**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2010. p. 133-152.

RIBEIRO, P. H. *et al.* Adubação verde, os estoques de carbono e nitrogênio e a qualidade da matéria orgânica do solo. **Revista Verde**, Mossoró, v. 6, n. 1, p. 43-50, 2011. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7429750.pdf>. Acesso em: 16 maio. 2021.

RILLIG, M. C.; MUMMEY, D. L. Mycorrhizas and soil structure. **New Phytologist**, v. 171, n. 1, p. 41-53, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01750.x>.

ROCHA JUNIOR, P. R. *et al.* Soil quality indicators to evaluate environmental services at different landscape positions and land uses in the Atlantic Forest biome. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 7, 100047, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100047>.

SANTOS, R. D. *et al.* (ed.). **Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo**. 5ª ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 102p.

SILVA, J. C. *et al.* Sucessão ecológica no cerrado. **Flovet**, Cuiabá, v. 1, n. 1, p. 33-47, 2012. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/flovet/article/view/788/622>. Acesso em: 16 maio. 2021.

SILVA, M. L. N. *et al.* **Manejo e conservação do solo e da água: guia de estudos**. Lavras: UFLA, 2015.

TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Effects of different management systems on porosity of oxisols in Paraná, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 899-906, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000300031>.

VIEIRA, C. M.; PESSOA, S. V. A. Estrutura e composição florística do estrato herbáceosubarbustivo de um pasto abandonado na Reserva Biológica de Poço das Antas, município de Silva Jardim, RJ. **Rodriguésia**, Rio de Janeiro, v. 52, n. 80, p. 17-30. 2001. <http://dx.doi.org/10.1590/2175-78602001528002>.

WARDLE, D. A.; GHANI, A. A critique of the microbial metabolic quotient (qCO₂) as a bioindicator of disturbance and ecosystem development. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 27, n. 12, p. 1601-1610, 1995. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(95\)00093-T](https://doi.org/10.1016/0038-0717(95)00093-T).

ZHIFANG, L. *et al.* Effects of nitrogen feeding for extraradical mycelium of *Rhizophagus irregularis* maize symbiosis incorporated with phosphorus availability. **Journal of Plant**

Nutrition and Soil Science, v. 182, n. 4, p. 647-655, 2019.
<https://doi.org/10.1002/jpln.201800674>.