

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

NAIANE ANTUNES ALVES RIBEIRO

**BIOINDICADORES DO SOLO E SUA CORRELAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE
VEGETAL EM FUNÇÃO DO RESIDUAL DA ADUBAÇÃO FOSFATADA E DA
INOCULAÇÃO COM *Azospirillum brasilense***

Ilha Solteira
2024

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

NAIANE ANTUNES ALVES RIBEIRO

**BIOINDICADORES DO SOLO E SUA CORRELAÇÃO COM A
PRODUTIVIDADE VEGETAL EM FUNÇÃO DO RESIDUAL DA
ADUBAÇÃO FOSFATADA E DA INOCULAÇÃO COM *Azospirillum
brasiliense***

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Especialidade: Sistemas de Produção.

Prof. Dr. Marcelo Andreotti
Orientador

Ilha Solteira
2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

R484b Ribeiro, Naiane Antunes Alves.
Bioindicadores do solo e sua correlação com a produtividade vegetal em função do residual da adubação fosfatada e da inoculação com *Azospirillum brasilense* / Naiane Antunes Alves Ribeiro. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
94 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas de Produção, 2024

Orientador: Marcelo Andreotti

Inclui bibliografia

1. Saúde do solo. 2. Sistemas integrados de produção. 3. Manejo conservacionista.


Amanda Sertori dos Santos
Bibliotecária - CRB/8-9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

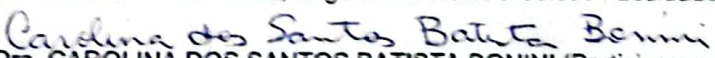
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Bioindicadores e qualidade da matéria orgânica e sua correlação com a produtividade vegetal em função do residual da adubação fosfatada e da inoculação com *Azospirillum brasilense*

AUTORA: NAIANE ANTUNES ALVES RIBEIRO

ORIENTADOR: MARCELO ANDREOTTI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Agronomia, especialidade: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. MARCELO ANDREOTTI (Participação Virtual)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


Profa. Dra. CAROLINA DOS SANTOS BATISTA BONINI (Participação Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas - UNESP

Profa. Dr. ELISANGELA DUPAS (Participação Virtual)
Faculdade de Ciências Agrárias / Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD

Ilha Solteira, 22 de fevereiro de 2024

gov.br

Documento assinado digitalmente
ELISANGELA DUPAS
Data: 22/02/2024 17:26:02-0300
Verifique em <https://validar.jbr.gov.br>

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai Demerval Antunes Ribeiro (in memoriam), a minha mãe Nágina Regina Alves e ao meu irmão José Gonçalves Ribeiro Neto, não só este trabalho, mas emprego a minha vida para zelar a nossa família. Vocês são a razão da minha caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primordialmente à toda minha família e amigos, pelo apoio, carinho e compreensão durante este momento de minha vida.

Agradeço, com carinho, toda a Equipe Andreotti, pelo trabalho duro, dedicação e parceria. Sem o suporte de todos, essa pesquisa não seria possível.

Agradeço em especial ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Andreotti, que me guiou, ensinou, aconselhou e teve o cuidado de me acompanhar pacientemente durante todo esse processo de formação.

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - Código de Financiamento Proc. 2022/07228-6”

“Mas é preciso ter força
É preciso ter raça
É preciso ter gana sempre
Quem traz no corpo a marca
Maria, Maria
Mistura a dor e a alegria

Mas é preciso ter manha
É preciso ter graça
É preciso ter sonho sempre
Quem traz na pele essa marca
Possui a estranha mania
De ter fé na vida”. Elis Regina, 1980.

RESUMO

A pressão sobre os agroecossistemas se intensifica com o aumento da demanda por produtos advindos da agropecuária, com isso a agricultura brasileira vem passando por profundas modificações em busca de sistemas de produção cada vez mais sustentáveis, levando em consideração a saúde e a conservação do solo. Objetivou-se com este estudo determinar a produtividade das culturas em rotação ante ao efeito residual da adubação fosfatada aplicada em 2013 e reaplicada em 2020, com a ausência ou presença da bactéria *Azospirillum brasilense* nas gramíneas produtoras de grãos antecessoras da rotação de culturas desde 2013, em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico na região de Cerrado de baixa altitude que está sob manejo de sistema plantio direto há 20 anos. Conjuntamente foram avaliados os atributos químicos, biológicos e atividade enzimática do solo, das frações do fósforo e sua dinâmica no solo após três anos da reaplicação do fósforo. O delineamento experimental adotado na pesquisa foi o em blocos casualizados (DBC), em esquema fatorial 5x2, sendo 5 (cinco) doses de fósforo 0; 30; 60; 120 e 240 kg ha⁻¹ de P₂O₅ fornecidos via Fosfato Monoamônico (MAP), junto com a inoculação ou não das gramíneas produtoras de grãos da rotação de culturas com a bactéria *A. brasilense*, com quatro repetições por tratamento. Após 20 anos sob sistema conservacionista de produção, adotando práticas que levam em consideração a saúde e qualidade do solo, pelo equilíbrio químico e biológico, houve efeito apenas da inoculação com *A. brasilense*, que devido a maior exportação de matéria seca (MS) e nutrientes, as áreas inoculadas tiveram piora da fertilidade, e menor produção total de MS, mas com ganho na saúde do solo. Para as demais culturas não houve efeito da inoculação, assim como para a adubação fosfatada residual na produtividade das culturas da rotação.

Palavras-chave: saúde do solo; sistemas integrados de produção; manejo conservacionista.

ABSTRACT

The pressure on agroecosystems intensifies with the increase in demand for products from agriculture, with the result that Brazilian agriculture has been undergoing profound changes in search of increasingly sustainable production systems, taking into account soil health and conservation. The objective of this study was to determine the productivity of crops in rotation given the residual effect of phosphate fertilizer applied in 2013 and reapplied in 2020, with the absence or presence of the bacterium *Azospirillum brasilense* in grain-producing grasses that preceded the crop rotation since 2013, in a Dystrophic RED Oxisol in the low-altitude Cerrado region that has been managed by a direct planting system for 20 years. Together, the chemical, biological attributes and enzymatic activity of the soil, phosphorus fractions and their dynamics in the soil were evaluated after three years of phosphorus reapplication. The experimental design adopted in the research was randomized blocks (DBC), in a 5x2 factorial scheme, with 5 (five) doses of phosphorus 0; 30; 60; 120 and 240 kg ha⁻¹ of P₂O₅ supplied via Monoammonium Phosphate (MAP), together with the inoculation or not of grain-producing grasses from the crop rotation with the bacteria *A. brasilense*, with four replications per treatment. After 20 years under a conservationist production system, adopting practices that take into account the health and quality of the soil, through chemical and biological balance, there was an effect only from inoculation with *A. brasilense*, which due to greater export of dry matter (DM) and nutrients, the inoculated areas had worsening fertility, and lower total DM production, but with a gain in soil health. For the other crops there was no effect of inoculation, as well as residual phosphate fertilization on the productivity of rotation crops.

Keywords: soil health; integrated production systems; conservation management.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1	Saúde do solo	14
2.2	Solos Tropicais	15
2.3	Matéria orgânica no solo.....	16
2.4	Sistema Plantio Direto	20
2.5	Sistemas integrados de produção agropecuária.....	21
2.6	Fósforo no sistema solo-planta.....	23
2.7	Microrganismos do solo.....	26
2.8	Bactérias promotoras de crescimento de plantas.....	29
2.8.1	<i>Azospirillum brasilense</i>	30
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	32
4	RESULTADOS	44
5	DISCUSSÃO	72
6	CONCLUSÕES	81
	REFERÊNCIAS.....	82

1 INTRODUÇÃO

A população mundial deve alcançar 9,7 bilhões de pessoas em 2050 e atingirá seu pico no final do século, em 2100, com cerca de 11 bilhões de habitantes (Organização das Nações Unidas – ONU, 2019). Portanto, o desenvolvimento de uma sociedade sólida e estável depende direta e imprescindivelmente da alimentação, sendo esta uma necessidade básica humana que jamais pode ser ignorada. Entretanto, o mundo atual já enfrenta altos índices de fome, que pode ser ainda mais agravado com o incremento populacional, afetando a qualidade de vida da sociedade e impactando direta e indiretamente os recursos naturais mundiais (Carvalho; Castros, 2022).

A pressão sobre os agroecossistemas se intensifica com o aumento da demanda por produtos advindos da agropecuária e a cobrança cada vez maior da comunidade por alimentos de qualidade, produções mais sustentáveis e de menor impacto ambiental que preserve a biodiversidade e o bem-estar da sociedade, gera grande desafio para o setor agrícola mundial, pois os impactos negativos da produção de alimentos para uma população crescente ainda geram desequilíbrios ambientais e ecológicos, colocando em risco a perpetuidade do uso dos recursos naturais globais (Ullah; Salem; Kang, 2023).

Dessa forma, nota-se que a degradação ambiental promovida pelas atividades antrópicas em seus diversos aspectos, como consequência, têm sido reportadas baixas significativas de produtividade e da capacidade dos solos em cumprir suas funções ecológicas (Macedo *et al.*, 2023). A degradação do solo envolve modificações em suas características físicas, químicas e biológicas, como a redução dos teores de nutrientes, matéria orgânica, além de alterações em sua densidade, porosidade, estrutura, estabilidade dos agregados e capacidade de infiltração (Alves *et al.*, 2023).

A falta de cobertura ou cobertura inadequada do solo por período prolongado, tem sido um dos principais fatores que contribuem para a intensificação do esgotamento e degradação dos solos, assim, o Sistema Plantio Direto (SPD) é um manejo conservacionista que aumenta o volume e a qualidade da cobertura do solo, que tem três princípios básicos: o não revolvimento do solo, a rotação de culturas e a cobertura permanente do solo com palha. Portanto, para o sucesso deste sistema, a rotação de culturas deve basear-se em cultivos que proporcionem elevado volume e variedade de resíduos culturais, compensando a rápida decomposição do material orgânico em climas tropicais e subtropicais (Spera *et al.*, 2019).

Para elevar a produção de palhada em áreas sob SPD, indica-se o cultivo de gramíneas na rotação de culturas, deste modo, a adoção de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPAs) se apresentam como alternativa de sucesso, pois consistem na condução de diferentes atividades, como a pecuária, agricultura e silvicultura na mesma área, sendo em consórcio ou rotacionado, beneficiando-se das sinergias entre as atividades, por interações que favorecem a utilização mais eficiente dos fatores bióticos e abióticos disponíveis, elevando a produtividade e rentabilidade das culturas, além de contribuir para melhorias na qualidade do solo, principalmente pelo grande volume de material vegetal residual deixado pelas diversas culturas do sistema (Anjos *et al.*, 2021).

Aliado aos SIPAs em SPD, a inoculação das culturas com Bactérias Promotoras de Crescimento de Plantas (BPCPs) auxiliam no aumento da produtividade. As BPCPs representam vasto grupo de microrganismos que associados às plantas, não causam prejuízos produtivos, e por mecanismos diretos e/ou indiretos promovem melhorias no crescimento e desenvolvimento das culturas. Nas últimas décadas, com o aumento do interesse e preocupação com agricultura mais sustentável e ecológica, houve aumento na busca por práticas de produção com menor uso de fertilizantes minerais e o aumento de práticas como a inoculação por BPCPs (Mendonça *et al.*, 2020).

Entretanto, ainda existem diversos desafios para o aumento e estabilização da produtividade das culturas, pois os solos tropicais, normalmente, possuem baixa concentração de nutrientes, com destaque ao Fósforo (P), que junto com o Nitrogênio (N) são os nutrientes que mais limitam a produção no país (Prado, 2008). O P, além de possuir auto potencial de fixação e imobilização no solo, também tem fontes finitas e não renováveis. Deste modo o debate sobre a incapacidade de atendimento das demandas futuras por alimentos de forma sustentável vem sendo retomada no meio científico (Saath; Fachinello, 2018).

Nesse cenário, há demanda de pesquisa para contornar essas peculiaridades da dinâmica do P no solo e de seu uso em sistemas de manejo mais eficientes, envolvendo a produção, decomposição de resíduos e ciclagem de nutrientes, com o propósito de elevar a produtividade das culturas e as entradas de P no solo, tornando possível o decréscimo no uso de fertilizantes minerais. O setor agrícola, se conduzido de forma responsável, tem o poder de minimizar os danos causados pela produção, auxiliando na conservação do meio ambiente. Portanto, estudos que investiguem manejos e tecnologias ligadas a essa temática são de extrema importância social, econômica e ecológica. Pela importância desses estudos, combinado com o fato de que em sistemas mais complexos de produção, os atributos do solo podem ser usados com segurança para avaliar a qualidade e conservação do solo, e pesquisas que buscam avaliar as características

físicas, químicas e biológicas dos solos em áreas sob SPD e/ou SIPA tem sido de certo ponto negligenciado.

A partir de todo o exposto, a primeira hipótese explorada nesta pesquisa foi a de que os atributos químicos e biológicos do solo são capazes de influir na atividade enzimática, podendo ser alterados pelo sistema de manejo adotado, como o SPD de longa duração. Logo, esses parâmetros podem ser utilizados na avaliação da qualidade e saúde do solo em áreas de produção sob diferentes manejos. A inoculação com a *Azospirillum brasilense* promove modificações na morfologia do sistema radicular, aumentando o número e o diâmetro das raízes, com isso, também trabalhou-se com a hipótese de que devido a esse aumento da superfície de contato radicular, a absorção de nutrientes pouco móveis no solo como o P é melhorada, refletindo positivamente na produtividade de grãos e de palha no sistema, gerando economia na adubação devido ao seu residual aproveitado dos resíduos vegetais mineralizados do sistema.

Assim, objetivou-se com este estudo determinar a produtividade de matéria seca do capim Paiaguás em pousio (safra 2022), os componentes de produção e produtividade da soja (safra 2022/23), do sorgo granífero em consórcio com capim Piatã e a produtividade de matéria seca do capim Piatã em pousio (safrinha 2023), ante ao efeito residual da adubação fosfatada aplicada em 2020, com a ausência ou presença da bactéria *Azospirillum brasilense* nas gramíneas produtoras de grãos antecessoras da rotação de culturas desde 2013, em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico na região de Cerrado de baixa altitude. Avaliou-se também se houve ou não interação entre o residual do fósforo com a inoculação sobre a produção das culturas, e, conjuntamente foram avaliados os atributos químicos, biológicos e atividade enzimática do solo, das frações do fósforo e sua dinâmica no solo após três anos de sua aplicação, por fim identificar se há ou não interferência do manejo conservacionista sob as condições químicas, biológicas e enzimáticas do solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Saúde do solo

A saúde do solo pode ser entendida como a capacidade dele funcionar e prover recursos para o bom desenvolvimento das plantas, animais e seres humanos (Karlen *et al.*, 1997). A avaliação da saúde do solo no Brasil ainda é muito escassa (Simon *et al.*, 2022). Em exemplo, apenas 5% da produção científica nacional abordou temas voltados para a saúde do solo no semiárido do Brasil, que engloba dois biomas, a Caatinga e o Cerrado, que estão presentes em 1/3 do território nacional (Lima, 2022).

Alguns indicadores podem apontar a saúde e a conservação do solo de forma precisa, tais como seus atributos físicos, químicos e biológicos, associados também aos diferentes processos que ali ocorrem, tais como a ciclagem de nutrientes, retenção hídrica, potencial de erosão, potencial de lixiviação, atividade biológica, entre outros. A textura, porosidade, densidade e estabilidade de agregados são os atributos físicos mais usados como indicadores de qualidade do solo. A acidez (pH), salinidade, teor de carbono total ou orgânico, fósforo disponível, capacidade de troca catiônica, entre outros, também são exemplos de atributos avaliados (Oliveira-Silva *et al.*, 2020). Quanto aos atributos biológicos, podem ser citados a abundância e a diversidade de organismos no solo, tais como minhocas, nematoides, térmitas, formigas e actinomicetos, além da análise da biomassa microbiana, atividade enzimática, entre outros (Maia *et al.*, 2013).

A diversidade, estrutura, abundância e composição da comunidade microbiana são importantes aspectos da microbiologia do solo que devem ser levados em consideração na restauração da saúde do solo em áreas degradadas (Coban *et al.*, 2022). As comunidades microbianas residentes no solo são a base trófica da teia alimentar que sustenta a vida terrestre. Os nutrientes liberados na decomposição microbiana, onde moléculas orgânicas convertem-se em inorgânicas, fornecendo matéria prima para a formação e crescimento das plantas (Cavicchioli *et al.*, 2019). Por sua vez, as plantas utilizam e transformam moléculas inorgânicas em moléculas orgânicas fechando um ciclo de nutrientes e energia (Cherlet *et al.*, 2018).

Na agricultura brasileira observa-se o manejo inadequado na aplicação de fertilizantes, podendo este não satisfazer as exigências nutricionais das culturas, limitando assim a produção agrícola. Essa realidade pode ser verificada quando se compara a exigência nutricional das plantas com o consumo médio de fertilizantes utilizados em algumas culturas. Pelos resultados médios encontrados, torna-se possível inferir que é fato a chance de estar ocorrendo esgotamento dos solos cultivados no Brasil (Prado, 2008).

2.2 Solos Tropicais

O solo tropical é um ecossistema diferenciado, que em geral, possui boa agregação, devido à riqueza de sesquióxidos e a presença de matéria orgânica, porém, quando este solo é cultivado e perde a matéria orgânica, decaem grandemente os valores da Capacidade de Troca de Cátions (CTC). Assim, com correção da acidez do solo com a aplicação de calcário disponibiliza-se cargas, ocupadas então por Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e outros nutrientes posteriormente adicionados pela adubação mineral. No entanto, o uso agrícola prolongado, utilizando o revolvimento do solo e a incorporação dos resíduos vegetais, cria condições favoráveis à degradação da matéria orgânica e, conseqüentemente, destruição da bioestrutura, reduzindo drasticamente o potencial produtivo do solo (Ronquim, 2010).

Com relação ao Brasil, seu território encontra-se inserido quase que totalmente no domínio tropical úmido, com exceção da região Sul, de clima subtropical e Nordeste de clima semiárido, abrigando em suas terras uma diversidade considerável de ambientes propícios à condução de atividades agrícolas e pecuárias, tanto em pequena, como em grande escala de produção. Embora os solos tropicais apresentem composição química e fertilidade natural inferior se comparados aos solos de clima temperado, no geral, se bem manejados, podem apresentar bom rendimento agrosilvipastoril. Mas, alguns cuidados devem ser tomados na exploração desses solos de forma intensiva, pois são em sua grande maioria vulneráveis às ações antrópicas mal conduzidas, o que pode levar a sua degradação. Assim, define-se o mundo tropical, que engloba aproximadamente 1/3 das terras do planeta, algo equivalente a aproximadamente 50 milhões de km² (Carvalho Junior *et al.*, 2022).

Como citado, solos cultivados são limitantes para a produção de alimentos, pois os cultivos seguidos tendem a diminuir a fertilidade natural. Nos trópicos, onde a pressão populacional é maior, a expansão agrícola depende essencialmente do cultivo em solos intemperizados, que ficaram muito tempo expostos à ação das chuvas e do sol e conseqüentemente são mais pobres em nutrientes, ácidos e com problemas de deficit hídrico. Por apresentar essas peculiaridades, a agricultura nas regiões tropicais, onde se insere o Brasil, torna necessário o conhecimento detalhado das características e propriedades químicas, físicas e biológicas dos solos, objetivando seu manejo adequado, com uso mais apropriado de insumos para produções mais rentáveis (Ronquim, 2010).

Com base na classificação de solos brasileira, a classe predominante, em termos de ocorrência, é a dos Latossolos, seguido pelos Argissolos, com 31,49 e 26,84%, respectivamente.

Em seguida, com 13,18%, aparece a classe dos Neossolos, as quais juntas perfazem 71,51% do território brasileiro (Santos *et al.*, 2018).

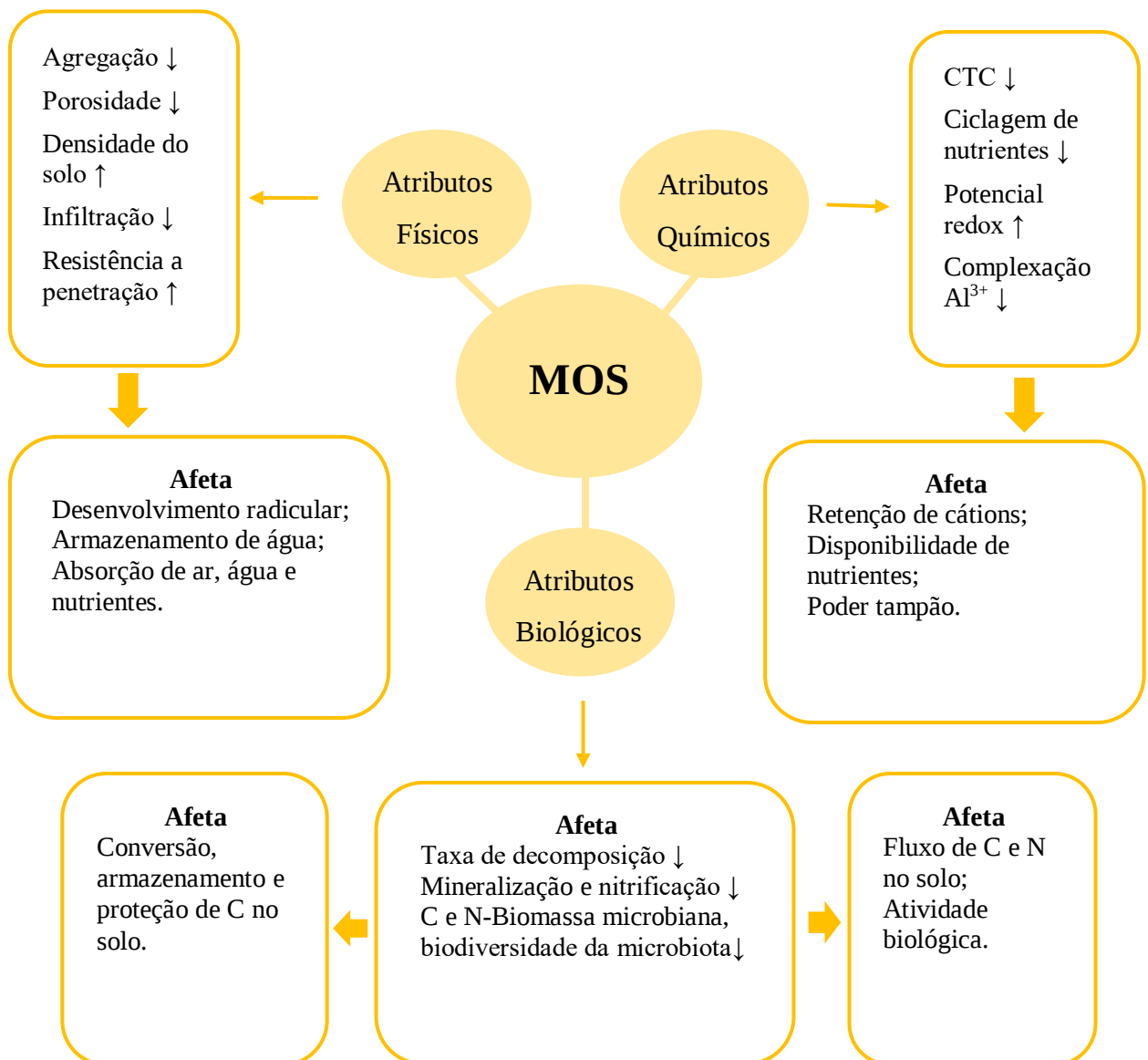
Os Latossolos são profundos e extremamente intemperizados, ácidos e com baixa saturação por bases, além de possuírem predominantemente argilas do tipo 1:1, resultando em solos com baixa CTC e consequentemente baixo potencial produtivo. Em oposição aos solos sob matas, nos solos agrícolas sob condições tropicais também predominam bactérias aeróbias com atividade intensa, tornando a acumulação de húmus ainda mais difícil. Observa-se, portanto, que o aumento do volume e qualidade da matéria orgânica nesses solos são a chave para melhores condições de produção e conservação do solo (Primavesi, 2006).

2.3 Matéria orgânica no solo

O solo é composto por uma fase porosa, preenchida com ar e/ou água, e uma fase sólida que é formada pelas frações minerais, orgânica morta e orgânica viva, esta última denominada biota do solo. A matéria orgânica engloba diferentes elementos em sua composição, mas predominam o Carbono (C), Hidrogênio (H), Oxigênio (O), Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Enxofre (S). Os teores de C na matéria orgânica variam, mas é o elemento presente em maior quantidade. Embora represente uma pequena parte da massa do solo, a Matéria Orgânica do Solo (MOS) controla a qualidade do solo, pois influencia fortemente a produtividade das plantas, condicionando diversas propriedades físicas, químicas e físico-hídricas, tampona a acidez e é substrato para a biota. Isso ocorre porque a MOS interage com a água, com o ar e com os componentes minerais da fase sólida, além de atuar como fonte de nutrientes e de energia para os microrganismos. Em sistema de manejo conservacionista, a MOS pode representar, ainda, importante estratégia para o sequestro e estabilização do C capturado da atmosfera pelas plantas, contribuindo também para a mitigação das mudanças climáticas globais (Lal, 2015).

Como aventado, a matéria orgânica influencia as propriedades do solo, a disponibilidade de nutrientes para a multiplicação de células microbianas e das plantas, e regula a ciclagem do carbono e/ou sua estabilização, portanto, as mudanças no status nutricional do solo, como a redução do conteúdo de matéria orgânica afeta diretamente as propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos (Rasche; Cadish, 2013), tal como ilustrado no Esquema 1.

Esquema 1 – Impacto do decréscimo da matéria orgânica do solo (MOS) em processos e atributos físicos, químicos e biológicos



Em que: setas para baixo: diminui e setas para cima: aumenta.

Fonte: adaptado de Sá *et al.* (2019).

Formas de manejo pouco conservacionistas, sem manutenção da palhada, com revolvimento do solo e com intenso uso de maquinários aceleram a oxidação da matéria orgânica do solo, decorrente do maior acesso dos microrganismos heterotróficos a essas fontes orgânicas que, inicialmente, estavam protegidas em agregados no solo. Esse processo acarreta em grande perda de matéria orgânica do solo a longo prazo. Neste aspecto, a saúde do solo é comprometida, uma vez que condições básicas para manutenção sustentável de processos biológicos são alteradas, tais como a aeração, umidade, temperatura e fontes de C, provocando, muitas vezes, perda de diversidade biológica e metabólica (Cardoso *et al.*, 2013). Além disso,

a exposição direta à luz solar resulta na morte de muitos organismos vivos que antes estavam encobertos pela palhada sobre o solo (Bini; Lopez; Cardoso, 2016).

A distribuição da MOS não é uniforme e varia de acordo com a origem e as propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos solos. A maior atividade biológica do solo situa-se, de modo geral, na camada de 0 a 0,20 m de profundidade, pois aí ocorre maior acumulação da matéria orgânica do solo pela deposição de material vegetal da parte aérea, além do efeito das raízes. Assim, a matéria orgânica e o efeito rizosférico são função da cobertura vegetal do solo e têm influência direta sobre os microrganismos (Rasche; Cadish, 2013).

Neste contexto, os compartimentos da MOS, incluindo teores de C, índices de biomassa microbiana e atividade enzimática no solo têm sido utilizados como indicadores da qualidade do solo. Esse termo é conceituado como a capacidade do solo em manter a produtividade biológica, a qualidade ambiental e a vida vegetal e animal saudável no sistema terrestre (Mielniczuk, 1999).

Na biosfera, os grandes reservatórios de carbono estão sob a forma de combustíveis fósseis, ou na forma de carbonatos dissolvidos nas águas oceânicas. No entanto, a fração do carbono do solo suscetível a ser utilizada no processo nutricional dos organismos que ocupam este nicho ocorre principalmente sob a forma de carbono orgânico. Os teores de C em formas orgânicas (C orgânico) no solo estão diretamente relacionados à biosfera, sendo originados primariamente por meio do processo da fotossíntese ($6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{energia} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$), são assimilados e posteriormente incorporados à MOS (Campbell, 2000).

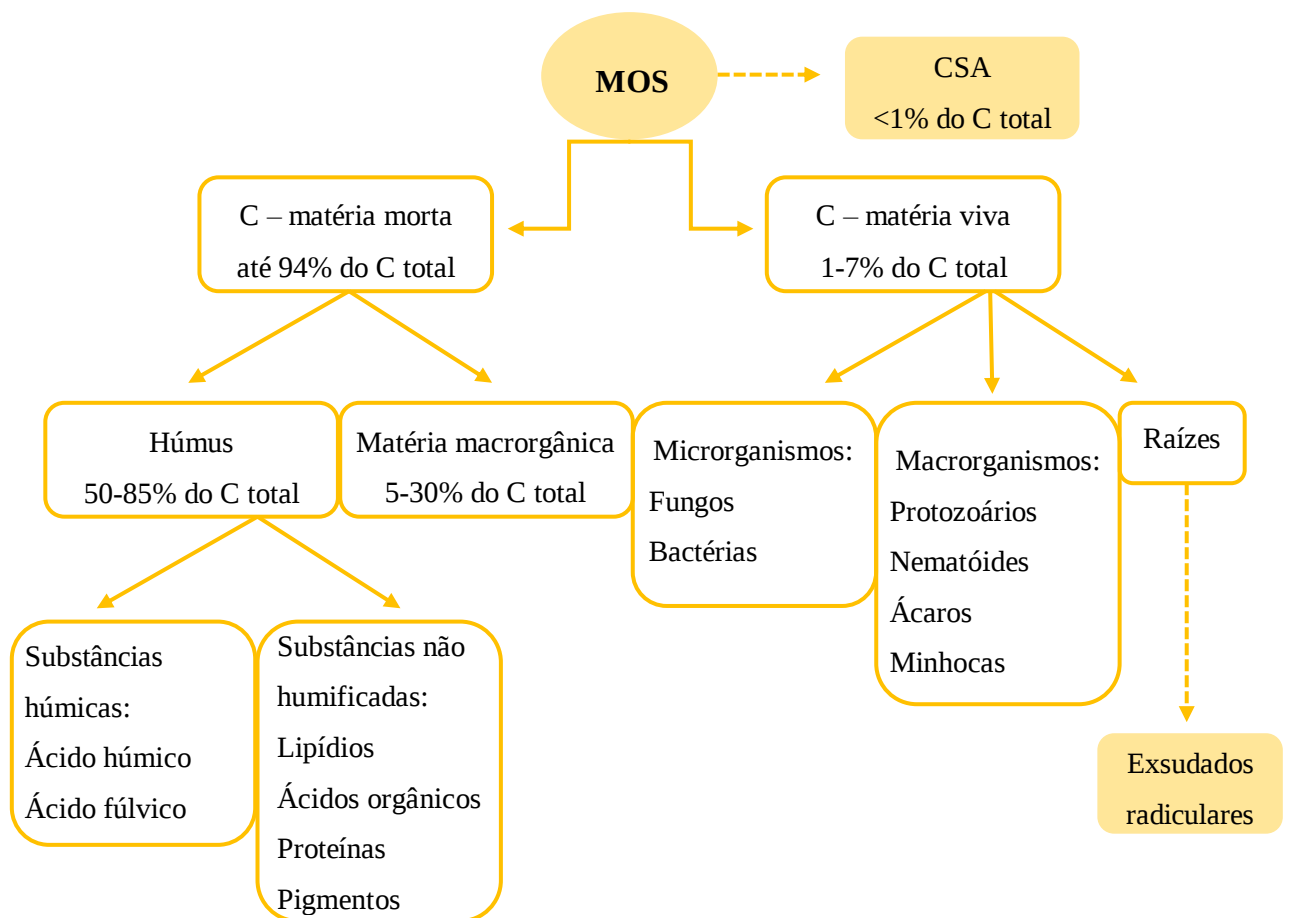
O carbono constitui aproximadamente 58% da composição da MOS (Silva; Mendonça, 2007). Apesar de representar pequena parte (0,5 a 5 %) quando comparada à fração mineral, a MOS é de suma importância para os sistemas agrícolas e florestais. Como propriedade biológica, a maioria dos organismos do solo, os quais constituem quase a totalidade da fração viva da MO, utiliza os compostos orgânicos da MOS como fonte de energia e nutrientes para a realização dos processos de transformação do C, incluindo a mineralização, imobilização e a formação de substâncias húmicas (Moreira; Siqueira, 2006).

As substâncias húmicas representam o maior pool de matéria orgânica do solo, e representam cerca de 50 a 85% do C total, num esquema simplificado de classificação, está presente no solo na forma de ácido fúlvico, ácido húmico e humina (Esquema 2) (Weil; Brady, 2016).

Esquema 2 – Representação dos principais compartimentos de MOS

Em que: CSA: carbono solúvel em água.

Fonte: adaptado de Perminova *et al.* (2019).



A MOS também é fundamental na retenção de cátions no solo, principalmente no ambiente tropical, dado que contribui para a maior proporção da CTC, uma vez que os óxidos, oxi-hidróxidos, hidróxidos de Ferro (Fe) e Alumínio (Al), e a caulinita, predominantes na fração argila de solos muito intemperizados, têm baixa CTC e reduzida superfície específica. Por isso, a construção da fertilidade de solos tropicais tem como pilar o aumento do armazenamento de matéria orgânica e a melhoria da qualidade da matéria orgânica estocada no solo. No Brasil, há uma área expressiva de solos de fertilidade construída à base do aumento da matéria orgânica, como ocorre em áreas sob Sistema Plantio Direto (SPD), Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e Sistemas Agroflorestais (SAFs) (Silva *et al.*, 2023).

Assim, a importância da MOS nos diversos compartimentos do solo, também se justifica no contexto da busca por uma agricultura mais produtiva e sustentável, preconizando a máxima ecológica e o mínimo uso de insumos não renováveis nas lavouras. Para os países localizados em regiões tropicais e subtropicais, como o Brasil, isso é ainda mais relevante, dado que predominam nos solos as argilas com baixa CTC, onde a MOS assume o papel de ser a matriz mais importante para assegurar a retenção de nutrientes no solo e devido a isso, controla o grau

de fertilidade do solo. Nos solos arenosos, degradados ou em via de degradação, o manejo conservacionista e o maior armazenamento de C no solo são críticos para manter a capacidade produtiva e assegurar tetos ainda mais elevados de produtividade dos que os alcançados atualmente nas áreas produtivas do país. No Brasil a grande maioria das áreas dependem da chuva para produzir, portanto aumentar a retenção e a água disponível no solo é outra contribuição relevante da MOS (Martin-Neto *et al.*, 2023).

2.4 Sistema Plantio Direto

Quando se utiliza o termo sustentabilidade na agricultura, deve-se observar a qualidade do solo levando em consideração seus aspectos físicos, químicos e biológicos como um todo. Em contrapartida, a degradação do solo está relacionada a diversos fatores como o monocultivo, manejo inadequado do solo, excesso de tráfego de maquinários, e a adoção de práticas que degradam sua estrutura, como a aração e gradagem (Bertollo; Levien, 2019).

O sistema plantio direto, desde que manejado segundo seus princípios básicos fundamentados em três pilares: a ausência de revolvimento do solo, com perturbação mínima restrita à linha de semeadura, cobertura permanente do solo com palhada ou cobertura viva e diversificação de culturas constituindo uma rotação, promove, com o tempo, a melhoria da qualidade do solo, aumento da produtividade dos cultivos e o maior acúmulo de C no perfil do solo. A estratégia em sistemas de produção em plantio direto que adicionam elevada quantidade de resíduos culturais, com qualidade e frequência, é o principal desafio em desenvolver sistemas sustentáveis que minimizam os riscos de queda da produção, além de promover maior estabilidade e rentabilidade dos empreendimentos agrícolas. Neste contexto, o primeiro passo seria intensificar o sistema de produção visando “fechar as janelas” entre a estação chuvosa e o período seco e, assim, manter permanentemente culturas para cobertura do solo combinadas com culturas comerciais (Tormena *et al.*, 2023).

A palhada mantida na superfície confere cobertura e proteção ao solo, servindo como um herbicida natural ao reduzir a germinação de plantas daninhas, também ameniza o impacto das gotas de chuva, diminuindo erosões, mantém a umidade do solo por um período maior, eleva o acúmulo da matéria orgânica, conseqüentemente também aumenta o fornecimento de nutrientes devido a sua decomposição gradual, entre outros vários benefícios (Pompermayer, 2020).

O efeito do SPD no aumento dos estoques de C orgânico do solo se deve à redução das taxas de decomposição da MOS, o que em grande parte ocorre devido à proteção física deste

proporcionado pelos agregados de solo e ao efeito positivo desta maior permanência aumentando a estabilização da MO por associação com os minerais, mecanismo denominado de interação organo-mineral (Conceição *et al.*, 2013).

Globalmente, cerca de 12% de todo o C do solo é armazenado em áreas agrícolas, num total de 1,87 bilhão de hectares, o que corresponde a, aproximadamente, 12,6% da área terrestre do planeta. De modo geral, há uma maior preservação da MOS em áreas sob vegetação natural, havendo perdas significativas de C quando estas são convertidas em áreas de cultivo agrícola, principalmente devido às operações de revolvimento do solo que ocorrem de forma intensiva nos sistemas convencionais. Este tipo de preparo do solo promove a ruptura de agregados que expõem a matéria orgânica oclusa, disponibilizando-a para microrganismos decompositores, causando assim, as perdas do C em forma de CO₂ para a atmosfera (Balesdent *et al.*, 2018). Essas perdas são mais aceleradas nas regiões de clima tropical, podendo resultar na redução de mais de 50% do estoque de C pré-existente na vegetação nativa em menos de 10 anos após a conversão das áreas de vegetação natural ao uso agrícola (Powlson *et al.*, 2022).

Observa-se portanto, que o SPD comparado a outras formas de manejo agrícola proporciona muitos benefícios para o agroecossistema e seu entorno, tais como: requer menor infra-estrutura de máquinas/equipamentos; requer menor força de trabalho e menor uso de energia fóssil; beneficia a atividade biológica do solo; favorece o controle biológico de pragas, doenças e plantas daninhas; minimiza a erosão; otimiza o uso de fertilizantes; melhora a agregação e o desenvolvimento da estrutura do solo; reduz a taxa de mineralização da matéria orgânica; desacelera a taxa de reciclagem, favorecendo a absorção de nutrientes pelas plantas; potencializa o equilíbrio do agroecossistema, tornando estáveis fluxos de entrada e de saída de energia e de matéria; conserva o potencial biológico do ambiente local; eleva a capacidade de auto-reorganização do sistema solo-planta-atmosfera; permite expressar o potencial genético das espécies cultivadas e; propicia organizar mecanismos sociais e econômicos de transformação, de reorganização e de manutenção da agricultura (Hernani, 2021).

2.5 Sistemas integrados de produção agropecuária

Nas últimas décadas, a agricultura brasileira vem passando por profundas modificações e a adoção de sistemas integrados de cultivo ganha cada vez mais destaque. Estes sistemas integrados são implementados visando aumentar a eficiência produtiva do setor agropecuário e

florestal, além de aumentar a oferta de diversos serviços ecossistêmicos em áreas de pastagens severamente degradadas. A estratégia de integração contempla quatro modalidades de sistemas de cultivo, a Integração Lavoura-Pecuária ou Agropastoril (ILP), Integração Pecuária-Floresta ou Silvipastoril (IPF), Integração Lavoura- Floresta ou Silviagrícola (ILF) e integração lavoura-pecuária-floresta ou Agrossilvipastoril (ILPF) (Balbino; Barcellos; Stone, 2011).

Os sistemas de integração podem ser definidos como estratégias que integram atividades agrícolas, pecuárias e/ou florestais em uma mesma área, em cultivo consorciado, em sucessão ou em rotação, na busca de efeitos sinérgicos entre os componentes do agroecossistema, contemplando a adequação ambiental e a viabilidade econômica (Balbino; Barcellos; Stone, 2011). Esses sistemas integrados de produção promovem a melhoria da qualidade do solo (Santos, 2019) e o aumento dos estoques de C (Almeida *et al.*, 2021), além de reduzirem as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) (TorreS *et al.*, 2014).

A adoção desses sistemas é motivada principalmente pela busca por aumentos de eficácia e pela recuperação de solos degradados. Os resultados indicam aumento da produtividade de grãos e de carne bovina, e melhoria da estrutura do solo em sistemas integrados quando comparados aos não integrados de produção agrícola praticados anteriormente nas empresas pesquisadas (Soares *et al.*, 2015). Tornando-se, portanto, uma estratégia promissora para intensificar a produção com menor impacto ambiental, que recentemente tem sido apontada como essencial para enfrentar a insegurança alimentar e energética, além de poupar áreas de vegetação nativa (Bieluczyk *et al.*, 2020).

O recorrente paradoxo entre aumento de produtividade e preservação ambiental ou entre intensificação da produção e redução de uso dos insumos parece perder importância com o advento dos sistemas integrados de produção, pois a intensificação na produção de alimentos e de uso da terra está na mesma trincheira da sustentabilidade ambiental. Explicando o atual lugar de destaque dos sistemas ILP na pesquisa científica nacional (Soares *et al.*, 2015).

A adoção de sistemas ILP permite a intensificação da produção agropecuária, pois é uma estratégia de uso da terra que visa explorar os recursos disponíveis como nutrientes (adquiridos pela adubação, correção do solo ou fixação biológica), energia solar, ou recursos da propriedade como terras, máquinas, implementos, galpões, de forma mais efetiva possível. Neste conceito de “fechar as janelas”, não há espaço para deixar o solo sem algum cultivo sobre ele, visto que assim que uma cultura sai do campo, imediatamente outra já estará sendo implantada. Para destacar tal prática, quando o solo permanece por três meses sem nenhum cultivo, isso significa um desperdício de aproximadamente 18 milhões MJ/ha de energia solar, entretanto, se houvesse algum cultivo transformando parte dessa energia em energia química,

através da fotossíntese, produzindo alimentos (grãos, verduras, legumes, feno, etc.) ou transformados em produto animal pelo pastejo (leite, carne, couro, etc.), maiores benefícios seriam alcançados em relação ao meio ambiente e à renda do produtor (Soares *et al.*, 2015).

2.6 Fósforo no sistema solo-planta

Os estudos envolvendo a nutrição de plantas é ainda considerado uma ciência historicamente recente, que estabelece quais são os elementos essenciais para o ciclo completo das plantas, como são absorvidos, translocados e acumulados, suas funções, exigências e os distúrbios causados nas plantas quando em quantidades excessivas ou exageradas (Prado, 2008).

Na adubação das culturas existe o fator “f” que corresponde a eficiência dos fertilizantes, que pode ser reduzido por perdas como volatilização, adsorção, lixiviação, erosão entre outros. Especificamente no caso do P, a eficiência é de 20 a 30%, precisando assim de volume 3,3 vezes maior de P para garantir adequada nutrição das culturas. O fósforo é um macronutriente primário, o que significa que é absorvido ou exigido em grande quantidade pelas plantas (Prado, 2008), possui envolvimento direto na produção e composição de ácidos nucleicos, membrana celular, divisão celular, desenvolvimento radicular, entre outros, e envolvido também em processos metabólicos de reações de oxido-redução, como a fotossíntese, respiração e produção de energia por meio da molécula de ATP (Kour *et al.*, 2021).

O solo é a principal fonte de P às plantas, onde pode ser encontrado basicamente em sua forma orgânica e inorgânica, e este último tem sua fração lábil, moderadamente lábil e não lábil no solo (Kalayu, 2019). Os solos de regiões tropicais, habitualmente, apresentam baixa concentração de fósforo e ainda alto potencial de adsorção do P aplicado via fertilizantes. Assim o P, junto com o nitrogênio, constituem os nutrientes que mais limitam a produção no Brasil (Prado, 2008).

Os teores de P do solo dependem inicialmente do material de origem, mas a sua disponibilidade para os organismos vivos é controlada pelos processos biogeoquímicos. Em ecossistemas com solo jovem, pouco intemperizados, o P é encontrado predominantemente em minerais primários, como a fluorapatita. Em solos moderadamente intemperizados, a maior parte do P está sob formas orgânicas, adsorvido fracamente aos minerais secundários. Em solos altamente intemperizados, predominam as formas inorgânicas ligadas com alta energia à fração mineral e às formas orgânicas estabilizadas física e quimicamente. Portanto, o aumento do grau de intemperismo implica na fixação do P na fração mineral do solo, por meio de ligação de alta energia e baixa reversibilidade (Silva *et al.*, 2023).

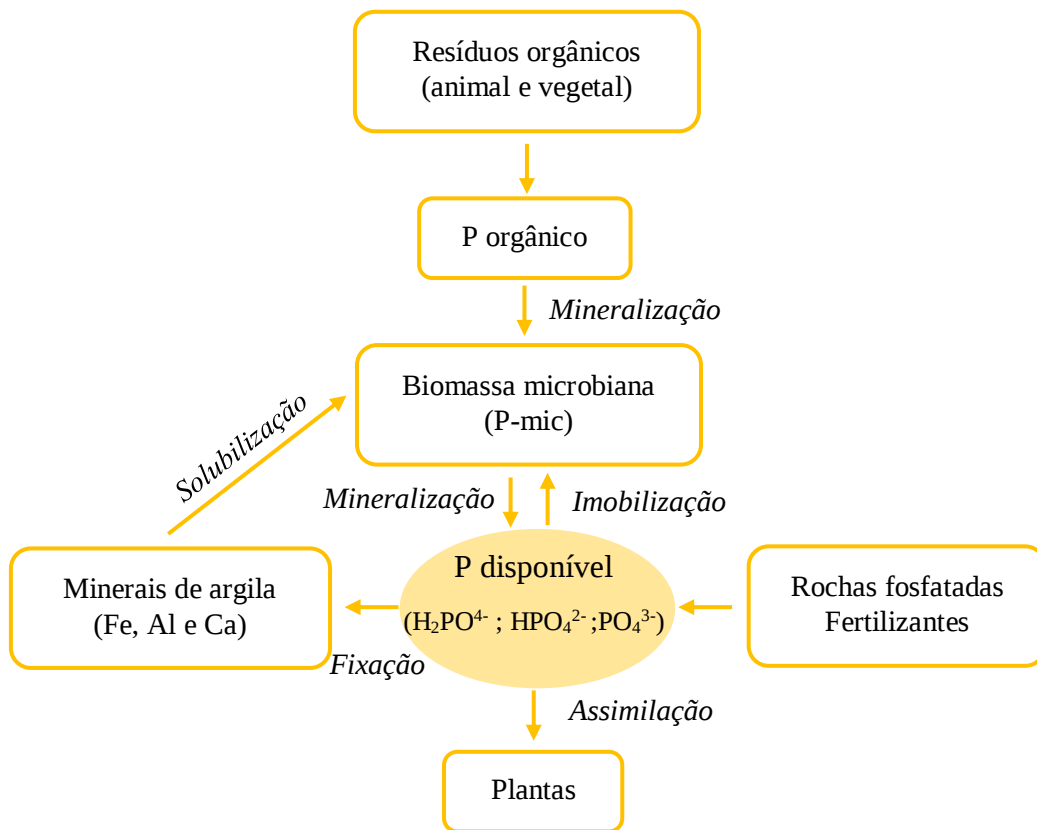
A liberação gradual de P a partir da mineralização de formas orgânicas pode garantir o suprimento, ao menos parcial, desse nutriente durante o ciclo da cultura, uma vez que na maioria das culturas anuais o fertilizante fosfatado é aplicado no plantio. A MOS também pode reduzir a fixação do P na fração mineral em função da competição de compostos orgânicos solúveis pelos sítios de fixação na superfície das argilas ou óxidos e hidróxidos, e pelo revestimento da superfície da argila pela matéria orgânica, considerando o balanço negativo de cargas do húmus (Silva *et al.*, 2023).

Com todas as informações citadas sobre a dinâmica do P no solo, evidencia-se a necessidade do uso de altas doses de fertilizantes fosfatados para obtenção da produtividade desejada das culturas agrícolas. No entanto, há implicações restritivas quanto ao uso desses insumos, que englobam desde questões ambientais até questões econômicas (Pavinato *et al.*, 2020). Com o uso intensivo de fertilizantes e defensivos, como prática costumeira em sistemas de produção agrícola, vem ocorrendo diversos problemas ambientais e ecológicos, como a contaminação de lençol freático, eutrofização de corpos d'água, degradação física, química e biológica do solo e atmosfera, aumento na emissão de gases de efeito estufa e diminuição na biodiversidade dentro dos agroecossistemas (Galindo *et al.*, 2022).

Entretanto, de modo geral, a deficiência de P causa o subdesenvolvimento das plantas, deixando estas com um aspecto de enfezadas, gera coloração verde escuro nas folhas mais velhas, em algumas espécies essa coloração pode ser roxa, também faz que as folhas tenham inserção com ângulo mais estreito, além de provocar decréscimos consideráveis no florescimento, reduzindo a produção de frutos, sementes e de matéria seca. Isso porque toda energia produzida pela fotossíntese e na respiração é armazenada principalmente na forma de trifosfato de adenosina (ATP). A planta utiliza essa energia em seus diversos processos vitais, desde o transporte de solutos pelas membranas das células, trabalho mecânico de penetração da raiz no solo, absorção ativa de nutrientes e até mesmo na síntese de amido. Assim, evidencia-se a participação do P em quase todos os fenômenos biológicos, de forma direta ou indireta (Prado, 2008).

Então há o desafio para que seja possível diminuir a necessidade do uso de fertilizantes fosfatados, sem prejudicar o desenvolvimento e produção das plantas. Assim os microrganismos do solo se mostram como alternativa valiosa, visto que esses processos mediados pela microbiota do solo regulam a dinâmica e distribuição de formas lábeis de P (Esquema 3), sendo a reciclagem de P orgânico e a solubilização de P pouco ou não lábil, importantes fatores na disponibilização desse nutriente às plantas (Kour *et al.*, 2021).

Esquema 3 – Esquema geral da ciclagem de P no solo



Fonte: adaptado de Bini; Lopez (2016).

Observa-se que o P não é encontrado livre na natureza, estando presente somente na litosfera, em rochas sedimentares (85%) e em rochas ígneas (15%). Portanto, não apresenta em sua ciclagem, fases gasosas na atmosfera ou mudanças em seus estados oxidativos, como ocorre com o carbono, nitrogênio e enxofre por exemplo. Dessa forma, a ciclagem do P é um processo biogeoquímico, e não apenas geoquímico, envolvendo os compartimentos do solo, das plantas, e dos macro/microorganismos, passando, portanto, por processos físicos, químicos e biológicos (Tian *et al.*, 2021).

As bactérias presentes no solo mobilizam fosfatos inorgânicos insolúveis da matriz mineral do solo, podendo ser absorvidos pelas raízes das plantas (Lyu *et al.*, 2016), isso ocorre pela liberação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular, que devido aos seus grupos hidróxilo e carbóxilo, quelam cátions ligados ao fosfato, convertendo-os, em formas solúveis (Archana; Buch; Kumar, 2012). A liberação destes compostos também promove a acidificação do solo circundante, resultando na liberação de fósforo de complexos de cálcio de baixa solubilidade (Li *et al.*, 2015).

A MOS também pode ser considerada uma fonte importante de P para as plantas e microrganismos. A utilização do Fósforo Orgânico (Po) como fonte de P pelas plantas pode ser maximizada quando resíduos vegetais são lentamente decompostos, proporcionando sincronismo entre a disponibilidade de Fósforo Inorgânico (Pi) e o crescimento da planta, com menos perdas por adsorção no solo. O processo de mineralização do P consiste na transformação da forma orgânica para fósforo solúvel, promovida pela ação de hidrolases liberadas pelas raízes de plantas e microrganismos, sendo que estas são denominadas fosfatases (Rejsek *et al.*, 2012).

Há também a imobilização de P pelos microrganismos, que gera um compartimento do solo denominado de P microbiano (P-mic). O P absorvido pelos microrganismos tem função essencial na célula relacionada aos processos metabólicos (formação de estruturas orgânicas, fosfolipídios e ácidos nucléicos) e geração de energia via Adenosina Trifosfato (ATP). No solo, o P-mic pode funcionar como um moderador dos fenômenos de adsorção, imobilizando temporariamente o P (Po) e evitando assim sua adsorção específica e mais permanente aos colóides inorgânicos do solo (Martinazzo *et al.*, 2007).

2.7 Microrganismos do solo

Basicamente, dois processos sustentam a vida no planeta, a fotossíntese e a decomposição, que são processos geradores e/ou consumidores de energia celular, assim como de construção e desconstrução de estruturas orgânicas. A maioria dos processos bioquímicos dos microrganismos procariotos, como bactérias e arqueias, também ocorre nos microrganismos eucariotos, fungos e protozoários, similares também nas células dos organismos pluricelulares ou multicelulares, incluindo os seres humanos. No entanto, existem reações únicas para os procariotos, que comumente não são realizadas por outros organismos, como em exemplo, a digestão completa da celulose e do petróleo, fixação biológica de N, desnitrificação e a respiração anaeróbica (Bini; Lopez; Cardoso, 2016).

O solo é um dos principais compartimentos da biosfera em termos de reservatório biológico, mas este também funciona como um importante reservatório de água, suporte essencial para o sistema agrícola e às atividades humanas (Cotta, 2016). Devido a alta diversidade, número de espécies e abundância microbiana que ocorrem no solo, os microrganismos e os outros seres vivos presentes, como as plantas e a fauna, não sobrevivem de forma isolada, ou seja, não se desenvolvem independentemente um do outro. Na realidade, estes estão constantemente interagindo uns com os outros, o que é fundamental para se

sobreviverem num ambiente altamente variável, competitivo e oligotrófico (Hallam; Mccutcheon, 2015).

As comunidades de microrganismos do solo desempenham diversos serviços ecossistêmicos essenciais, tais como a decomposição da matéria orgânica do solo, ciclagem de nutrientes e a regulação de gases de efeito estufa (Bardgett *et al.*, 2008), aumento do reservatório de carbono orgânico, indução de resistência a doenças, remediação de solos contaminados e aumento do crescimento de plantas (Jalal *et al.*, 2023), entretanto, a importância dos microrganismos do solo no processo de recuperação de áreas degradadas tem sido historicamente negligenciada (Coban *et al.*, 2022).

No processo de decomposição, os microrganismos atuam como transformadores, enquanto os macrorganismos, representados especialmente por invertebrados macroscópicos ou microscópicos, atuam como reguladores do processo. Dessa forma, micro e macrorganismos atuam interativamente constituindo a cadeia trófica, em que os reguladores têm a função de trituradores dos materiais orgânicos, atuando como predadores e parasitas, enquanto fungos e bactérias são essencialmente decompositores primários (Santos *et al.*, 2018).

Os fungos são parte importante da microbiota do solo, uma vez que, por serem decompositores, atuam ativamente no aumento da fertilidade do solo, participando ativamente da matéria orgânica e conseqüentemente de nutrientes (Maier *et al.*, 2016). Enquanto que as bactérias, a maior parte dos grupos encontrados nas comunidades de microrganismos, são heterotróficos e decompositores, também contribuindo diretamente com a fertilidade do solo, em que gêneros como os Bacteroidetes e Proteobacteria produzem e secretam exopolissacarídeos (Gundlapally; Garcia-Pichel, 2006).

As enzimas são essenciais nos ciclos dos nutrientes no solo e, como são sintetizadas principalmente pelos organismos que nele crescem, as condições que favorecem a atividade microbiana, como adubação orgânica, presença de vegetação (rizosfera) e rotação de culturas, também favorecem a atividade enzimática que frequentemente se correlaciona positivamente com a produtividade ou qualidade do solo. Por esta razão e por serem muito sensíveis a mudanças no solo, as enzimas são consideradas bons indicadores de qualidade do solo (Cardoso *et al.*, 2013)

A ação de enzimas extracelulares sobre macromoléculas resulta na liberação de substâncias de baixo peso molecular (monômeros) durante os processos de degradação, as quais são absorvidas e metabolizadas por células microbianas, transformando-as em formas inorgânicas. Este processo procede à decomposição, constituindo-se essencialmente na

mineralização da MOS, a qual ocorre simultaneamente com a imobilização de nutrientes minerais, atendendo à demanda nutricional da microbiota (Moreira; Siqueira, 2006).

Nos solos, as raízes da planta crescem e secretam uma matriz diversificada de exsudatos orgânicos que estimulam o crescimento de comunidades microbianas presentes na rizosfera. A abundância e diversidade microbiana está ativamente envolvida no desenvolvimento vegetal, catabolizando a matéria orgânica, e atuando na mineralização de nutrientes, na fixação de nitrogênio, na proteção contra pragas e controle de patógenos. Entretanto, as espécies de plantas, bem como os tipos de comunidades vegetais, podem afetar a diversidade estrutural e funcional da comunidade microbiana da rizosfera, principalmente devido a variações na composição dos exsudatos radiculares e dos sinais bioquímicos neles contidos, que influenciam diretamente o comportamento das bactérias na rizosfera. Os inúmeros processos que ocorrem nesta região são cruciais para a saúde da planta e influenciam diretamente o ecossistema como um todo (Ribeiro; Cardoso, 2012).

Microrganismos benéficos para plantas, atuam por diversos mecanismos, sendo eles diretos ou indiretos, incluindo competição por nutrientes, solubilização de nutrientes, Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN), produção de fitormônios, resistência a fitopatógenos (Grover *et al.*, 2021), redução das concentrações de óxido de etileno, regulação positiva da resposta à desidratação e atividades antioxidantes (Munir *et al.*, 2022). A integração de abordagens para mitigação das dificuldades e ineficácias da produção, particularmente na cadeia de abastecimento e demanda de alimentos, está sendo apontada como crucial para reduzir as mudanças climáticas futuras, que é uma preocupação global (Mbow *et al.*, 2019).

A biomassa microbiana (BM) é a principal constituinte da MOS viva, excluindo as raízes e animais maiores que $5 \times 10 \mu\text{m}$. Corresponde a valores entre 1 e 5 % do Carbono Orgânico Total (COT) em solos tropicais, sendo composta, principalmente, por bactérias, fungos, actinomicetos, nematóides e protozoários (Stevenson, 1994). Essa biomassa microbiana está diretamente relacionada aos teores de MOS e à fertilidade do solo, e por isso responde rapidamente às práticas que levam ao decréscimo ou acréscimo da MOS. No sistema plantio direto, por exemplo, a biomassa microbiana é favorecida pelo aumento do teor de MOS, em função da ausência de revolvimento do solo, pela ênfase à rotação de culturas e à implantação de vegetação de cobertura de solo em períodos em que o solo não é utilizado para culturas comerciais (Silva *et al.*, 2010). Frequentemente estes fatores podem afetar o crescimento vegetal, o qual é normalmente favorecido em condições de baixo revolvimento do solo.

Percebe-se portanto, que a microbiota do solo exerce importante influencia nos ciclos biogeoquímicos, entre outros, de carbono, oxigênio, nitrogênio, fósforo e matéria orgânica,

sendo cruciais para a manutenção da fertilidade e produtividade dos solos, isso porque essa microbiota conta com organismos fotossintetizantes, produtores de exopolissacarídeos, fixadores de nitrogênio, decompositores e mobiliadores de fósforo (Branco; Almeida, 2023).

2.8 Bactérias promotoras de crescimento de plantas

Dentro do grupo de microrganismos associados às plantas existem espécies com capacidade de promoção de crescimento e sanidade de seus hospedeiros, que são denominados Bactérias Promotoras de Crescimento de Plantas (BPCPs) (Kloepper; Schroth, 1981). As BPCPs são capazes de se associar às raízes das plantas e estimular o crescimento e rendimento dos cultivos (Chanway *et al.*, 1989). Podem ser usadas como instrumentos biotecnológicos sustentáveis e eficientes na melhoria do crescimento e produtividade das culturas em diversos ambientes, devido à maior aquisição e aproveitamento de nutrientes (Zhang *et al.*, 2010).

Dentre as funções de promoção de crescimento exercidas por bactérias, estas são classificadas em três categorias: biofertilizante, fitoestimulante e biocontrole (Bhattacharyya; Jha, 2012). Acredita-se que as BPCPs beneficiam o crescimento das plantas por meio da combinação de um ou mais dos seguintes mecanismos, produção de fitohormônios (Souza *et al.*, 2015), FBN, síntese de sideróforos (Pandey *et al.*, 2017), controle biológico de pragas e doenças, solubilização de fósforo inorgânico e outros nutrientes, e a mineralização de fósforo orgânico (Oliveira *et al.*, 2003). Esses mecanismos podem promover o crescimento vegetal atuando simultaneamente ou em cascata (Bashan; De-Bashan, 2010).

O efeito da inoculação de microrganismos no crescimento vegetal, na região da rizosfera e/ou dentro dos tecidos das plantas vem sendo amplamente estudado pela comunidade científica. Esses microrganismos fazem parte de bioinoculantes usados na agricultura, pois podem conter fungos benéficos, como os solubilizadores de fósforo e micorrízicos arbusculares, além de bactérias rizosféricas ou endofíticas (Begum *et al.*, 2022). No que tange à nutrição de plantas e qualidade de produção agrícola, as principais BPCPs estudadas atualmente pertencem aos gêneros *Azospirillum*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Herbaspirillum* e *Burkholderia* (Orozco-Mosqueda *et al.*, 2021). Resultados de pesquisas, em diferentes condições de solo e clima, em diversos ensaios no campo e em casa de vegetação, com diversas espécies de plantas, tem demonstrado a capacidade de algumas BPCPs em aumentar a produção de grãos e/ou biomassa (Begum *et al.*, 2022).

A resposta positiva à inoculação das culturas com BPCPs vem sendo descrita como a teoria dos mecanismos múltiplos, dependendo da interação entre inoculante-planta-ambiente

(Santos *et al.*, 2018). Os mecanismos estimulantes de crescimento são diversos, tais como, a produção e secreção de fitormônios, como exemplo do ácido indol-3-acético (AIA), citocininas, giberelinas e o etileno (Cassán; Diaz-Zorita, 2016), além de outros reguladores de crescimento de plantas, como o ácido abscísico, óxido nítrico, compostos orgânicos voláteis e poliaminas (Timmusk *et al.*, 2014). Elas também atuam como fixadoras de N₂ (Santos *et al.*, 2017), solubilizadoras de fosfato, aumentam a eficiência do aproveitamento de nutrientes oriundos de fertilizantes (Galindo *et al.*, 2016), promovem o biocontrole de fitopatógenos e doenças (Tortora *et al.*, 2011), além de proteger as plantas contra estresse salino e de elementos tóxicos do solo (Cassán; Diaz-Zorita, 2016).

2.8.1 *Azospirillum brasilense*

As bactérias do gênero *Azospirillum* são do tipo gram-negativas, consideradas microrganismos diazotróficos de vida livre, podendo sobreviver sem a presença de um hospedeiro e também se apresentam como endofíticas facultativas. É um gênero amplamente encontrado em quase todos os lugares da Terra. Possui a capacidade de fixar nitrogênio em gramíneas como milho, trigo e arroz. Apresentam boa adaptação em regiões competitivas da rizosfera, por demandarem baixas quantidades de energia (Pedreira *et al.*, 2017).

A *Azospirillum brasilense* é uma rizobactéria diazotrófica endofítica e possui diversos mecanismos relacionados a aquisição de nutrientes, tais como a FBN e produção de fitormônios incluindo giberelina, etileno e ácido abscísico (Orozco-Mosqueda *et al.*, 2021).

Em uma revisão de trabalhos sobre as respostas fisiológicas induzidas por *Azospirillum*, os autores relatam a melhoria em parâmetros fotossintéticos das folhas, incluindo o teor de clorofila e condutância estomática, maior teor de prolina na parte aérea e raízes, melhoria no potencial hídrico, incremento no teor de água do apoplasto, maior elasticidade da parede celular, maior produção de biomassa e maior altura de plantas (Barassi *et al.*, 2008). Além de incremento em vários pigmentos fotossintéticos, tais como clorofila a, b, e pigmentos fotoprotetivos auxiliares, como violaxantina, zeaxantina, atheroxantina, luteína, neoxantina e beta-caroteno, que resultam em plantas mais verdes mais tolerantes ao estresse hídrico (Bashan *et al.*, 2006).

O maior desenvolvimento das raízes pela inoculação com *Azospirillum* pode implicar em vários outros efeitos. Entre os quais, foram relatados incrementos na absorção da água e maior tolerância a estresses por salinidade e seca, resultando em uma planta mais vigorosa e produtiva (Bashan *et al.*, 2004), provavelmente pelo maior crescimento e desenvolvimento

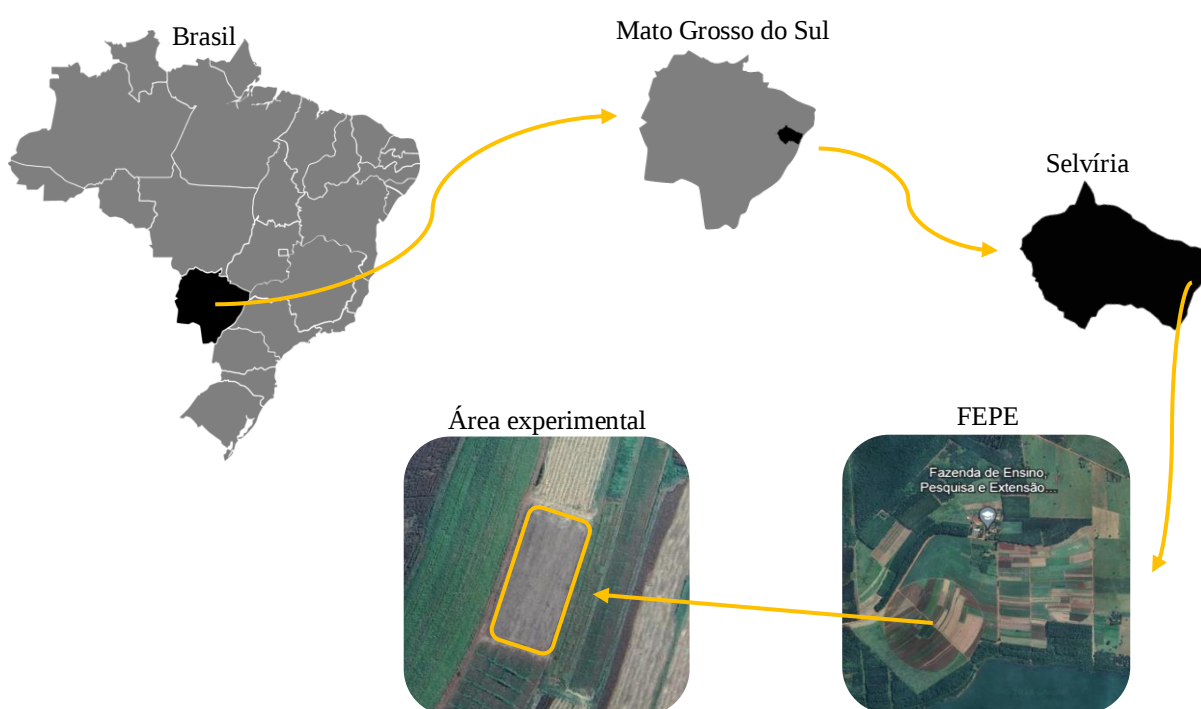
radicular, resultando em uma melhor nutrição das plantas, portanto, de modo geral, a inoculação gera também maior tolerância aos agentes patogênicos de plantas (Correa *et al.*, 2008).

Observa-se que estudos com as bactérias do gênero *Azospirillum* vem sendo amplamente promovidos, seja em foco da capacidade dessa bactéria em colonizar mais de 100 espécies de plantas em diversos tipos e condições de solo, seja pelos diversos resultados positivos obtidos em diversas culturas de interesse econômico, proporcionando maior crescimento, acúmulo de nutrientes e produtividade das culturas (Santos *et al.*, 2021) devido aos múltiplos mecanismos de atuação citados anteriormente.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE) – Setor de Produção Vegetal, pertencente à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS)/Universidade Estadual Paulista (UNESP), localizada no município de Selvíria/MS (Esquema 4), com as coordenadas geográficas 20°20'45''S e 51°24'25''W e altitude de 350 m.

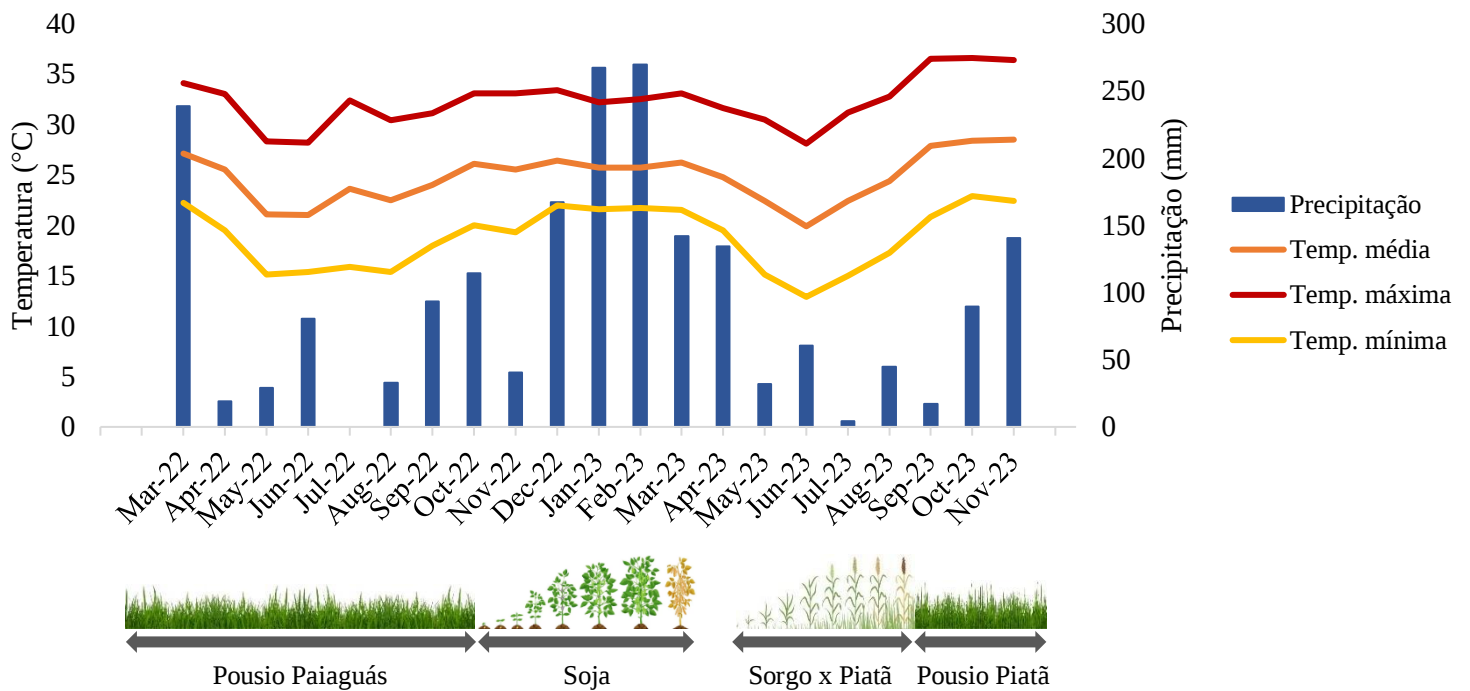
Esquema 4 – Localização da área experimental



Fonte: elaboração da própria autora.

O relevo da área é caracterizado como moderadamente plano, com solo classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (Demattê, 1980), de textura argilosa, atualizado de acordo com a Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos *et al.*, 2018). O tipo climático é o Aw, segundo classificação de Köppen (Alvares *et al.*, 2014), descrito como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno. A precipitação média anual é de 1370 mm e a temperatura média de 23,5 °C (Hernandez; Lemos-Filho; Buzetti, 1995). Durante a condução do experimento foram coletados os dados climáticos junto à estação meteorológica instalada na FEIS (Figura 1).

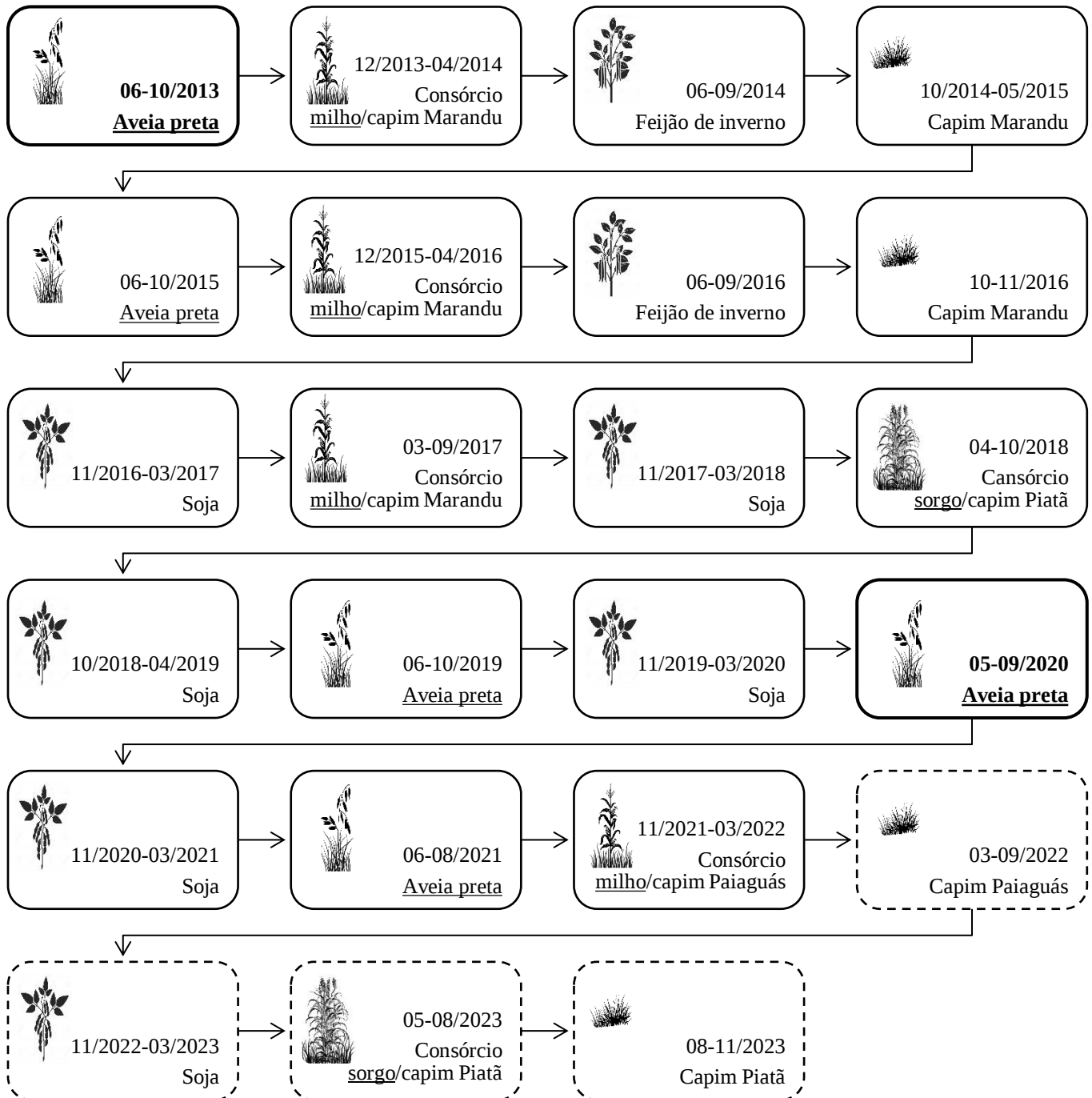
Figura 1 – Médias mensais de precipitação e temperatura mínima, média e máxima do período que compreende a pesquisa, março de 2022 à novembro de 2023. Selvíria/MS



Fonte: adaptado pela própria autora. Estação meteorológica do laboratório de irrigação e drenagem localizado na FE/Unesp-Ilha Solteira.

A área experimental possui histórico de cultivo constituído por culturas anuais em SPD há 20 anos e anteriormente à condução da atual pesquisa houve uma sequência dos seguintes cultivos na rotação de culturas (Esquema 5).

Esquema 5 – Histórico de cultivos da área experimental



Em que: formas e informações de culturas em **negrito**: momento que ocorreram as adubações fosfatadas; culturas sublinhadas: cultivos que foram inoculados com a bactéria *Azospirillum brasilense*; formas pontilhadas: cultivos que constituem a atual pesquisa.

Fonte: elaboração da própria autora.

O delineamento experimental adotado na pesquisa foi o em blocos casualizados (DBC), em esquema fatorial 5x2, sendo 5 (cinco) doses de fósforo 0; 30; 60; 120 e 240 kg ha⁻¹ de P₂O₅ fornecidos via Fosfato Monoamônico (MAP – N: 11%, P: 52%), para observar o efeito da complexação do fósforo em formas assimiláveis. A dose recomendada em análise inicial do solo realizada ano de 2013, de acordo com o Boletim 100, foi de 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅, a partir desta dose padrão, obteve-se as demais doses, sendo: meia dose (30 kg ha⁻¹), dobro da dose padrão (120 kg ha⁻¹), duas vezes o dobro da dose padrão (240 kg ha⁻¹) e a testemunha (0 kg ha⁻¹), a quantidade de nitrogênio (N) nas parcelas foi balanceada com a utilização de ureia, de forma que todos os tratamentos receberam a mesma quantidade de N. A aplicação foi a lanço sem incorporação na semeadura da aveia preta no ano de 2013 e reaplicadas em 2020, junto com a inoculação ou não das gramíneas produtoras de grãos da rotação de culturas (Esquema 5) com a bactéria *Azospirillum brasilense*, com quatro repetições por tratamento. A unidade experimental (parcela) possui 3,2 m de largura e 10 m de comprimento, somando área de 32 m², tendo o experimento quatro blocos para cada área, inoculada e não inoculada, com as cinco doses de P₂O₅ em cada bloco, perfazendo área experimental total de 1280 m².

As avaliações da presente pesquisa iniciaram na área sobre o pousio da *Urochloa brizantha* (BRS Paiaguás) (Figura 2), após a colheita do milho em consórcio, cuja semeadura foi realizada no dia 08/11/2021, mecanicamente com uso de semeadora-adubadora com mecanismo sulcador tipo haste (facão) para SPD, à uma profundidade de aproximadamente 0,07 m, com espaçamento entrelinhas de 0,34 m, e gasto de aproximadamente 7,8 kg de sementes por hectare, com Valor Cultural (VC) de 60% e adubação com 100 kg ha⁻¹ de Cloreto de Potássio (KCl) na semeadura, e com 500 kg ha⁻¹ do formulado 20-00-20 aplicado em cobertura no dia 07/12/2021.

Figura 2 – Pousio de capim Paiaguás, após a colheita do milho em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2022



A: pousio do capim Paiaguás após trinta dias da colheita do consórcio milho x capim Paiaguás; B: capim Paiaguás sete dias após sua dessecação.

Fonte: foto da própria autora.

Durante o período de pousio do capim Paiaguás, afim de avaliar as características de fertilidade do solo nas unidades experimentais, foram coletadas no dia 06/05/22, dez amostras simples para compor uma amostra composta por parcela, para posterior análise dos atributos químicos do solo nas camadas de 0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m.

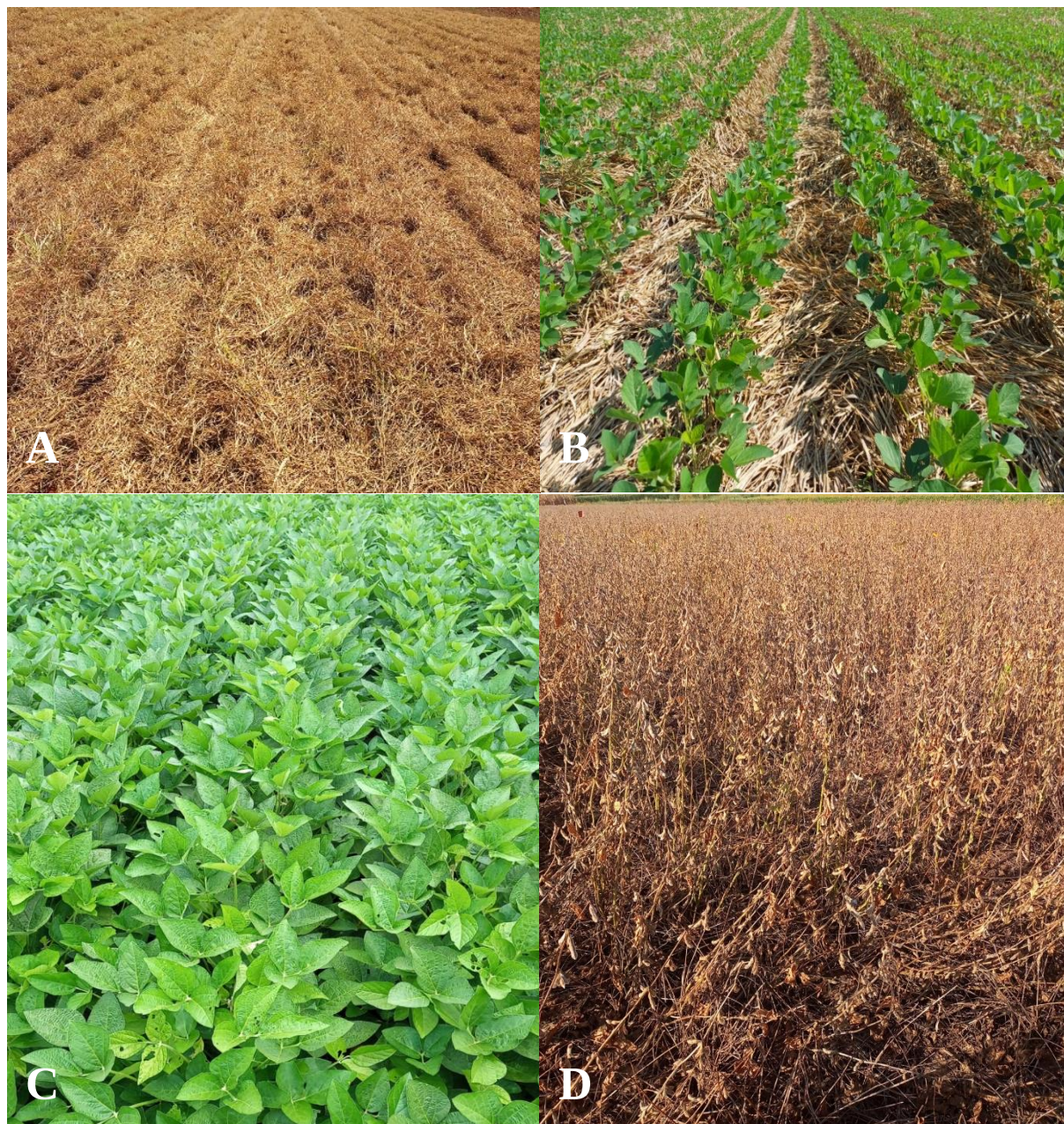
Para determinação da produtividade de matéria seca do capim Paiaguás, no dia 15/10/22, com o auxílio de um quadro amostral de 1,0 x 1,0 m, foram coletadas as plantas dentro de 1m² de cada parcela, as quais foram acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados e pesadas em balança de precisão para a determinação da Matéria Verde (MV), após esse procedimento, foram separadas subamostras, passadas para sacos de papel e levadas à estufa de circulação forçada à 65°C por 72 horas, para a obtenção da Matéria Seca (MS) e posteriormente extrapolado esses valores para produção por hectare. O capim Paiaguás foi dessecado no dia 17/10/22 com a utilização do herbicida Glyphosate (1560 g ha⁻¹ do ingrediente ativo (i.a.)), para seguir com o cultivo seguinte da rotação.

Em seguida foi implantada a cultura da soja (cultivar 97R50IPRO) (Figura 3), com semeadura no dia 08/11/22, em que as semente foram inoculadas com a bactéria *Bradyrhizobium japonicum* (estirpes SEMIA 5079 e SEMIA 5080) na dose de 185 mL para 50

kg de sementes, momentos antes da semeadura em local sombreado. A semeadura foi realizada de forma mecânica com uso de uma semeadora-adubadora com mecanismo sulcador tipo haste (facão) para SPD, à profundidade de aproximadamente 0,05 m, em espaçamento entrelinhas de 0,45m, com densidade de sementes de aproximadamente 14,4 sementes m^{-1} , e adubação de semeadura com 136 kg ha^{-1} de KCl.

A colheita ocorreu no dia 25/03/23, momentos antes foram realizadas as avaliações morfológicas e de produtividade da cultura, sendo essas: População de Plantas (POP), obtido pela contagem do número de plantas na área útil de cada parcela (3 linhas centrais de 3 metros, totalizando 9 m) e posteriormente convertido no total de plantas por hectare; e a Produtividade de Grãos de Soja (PG), as plantas da área útil das parcelas foram colhidas manualmente, trilhadas e os grãos pesados para determinação da produtividade por parcela, posteriormente foi extrapolada para PG kg ha^{-1} , corrigindo-se a umidade para 13% (base úmida).

Figura 3 – Condução da cultura da soja em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2022/2023



A: soja logo após o plantio; B: trinta dias após o plantio; C: sessenta dias após o plantio; D: dia da colheita.

Fonte: foto da própria autora.

Em dez plantas da área útil por parcela, foram determinadas: Altura de Plantas (ALT), avaliando a distância média compreendida da superfície do solo até a extremidade superior da soja, utilizando-se uma fita graduada; Altura da Inserção da Primeira Vagem (ALTPV), pela distância média compreendida da superfície do solo até a inserção da primeira vagem, utilizando-se uma fita graduada; Número de Vagens por Planta (NVP), por contagem do total

de vagens nas 10 plantas e posteriormente calculada a média por planta; Número de Grãos por Planta (NGP), pela contagem do número de grãos totais das 10 plantas e posteriormente calculada a média por planta; e a Massa de 100 Grãos (M100), obtida pela contagem de cem grãos por parcela em contador eletrônico, determinando a massa de 100 grãos em balança eletrônica de precisão (0,01 g), corrigindo a umidade para 13% (base úmida).

Posteriormente foi implantado o consórcio de sorgo granífero (cultivar 84G05) com *Urochloa brizantha* (BRS Piatã) (Figura 4). A semeadura ocorreu no dia 03/05/2023, em que somente as sementes do sorgo foram inoculadas com a bactéria *A. brasilense* (estirpes Ab-V5 e Ab-V6 com 2×10^8 Unidades Formadoras de Colônias (UFC) mL⁻¹) na dose de 100 mL para 50 kg de sementes, momentos antes da semeadura em local sombreado. A profundidade de semeadura foi de aproximadamente 0,05 m e o espaçamento entrelinhas foi de 0,45 m, com densidade de sementes de aproximadamente 7,9 sementes m⁻¹. Para o capim Piatã, a profundidade de semeadura foi de aproximadamente 0,07 m, em espaçamento entrelinhas de 0,34 m e gasto de aproximadamente 6,0 kg de sementes por hectare, VC de 60%, com a semeadura realizada de forma mecânica, com uso de uma semeadora-adubadora com mecanismo sulcador tipo haste (facão) para SPD e com adubação de cobertura no dia 02/06/23 com 300 kg ha⁻¹ do formulado 20-00-20.

A colheita ocorreu no dia 28/08/23, momento que foram realizadas as avaliações morfológicas e de produtividade das culturas, sendo para a cultura do sorgo: População de Plantas (POP), obtido pela contagem do número de plantas na área útil de cada parcela (3 linhas centrais de 3 metros, totalizando 9 m) e posteriormente convertido no total de plantas por hectare; e a Produtividade de Grãos de Sorgo (PG), as plantas da área útil das parcelas foram colhidas manualmente, trilhadas e os grãos pesados para determinação da produtividade por parcela, posteriormente foi extrapolada para PG em kg ha⁻¹, corrigindo-se a umidade para 13% (base úmida).

Figura 4 – Condução da cultivo de sorgo consorciado com capim Piatã em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2022/2023



A: consórcio logo após o plantio; B: quinze dias após o plantio; C: quarenta e cinco dias após o plantio; D: noventa dias após o plantio.

Fonte: foto da própria autora.

Em dez plantas da área útil por parcela, foram determinadas: Altura de Plantas (ALT), avaliando a distância média compreendida da superfície do solo até a extremidade superior do

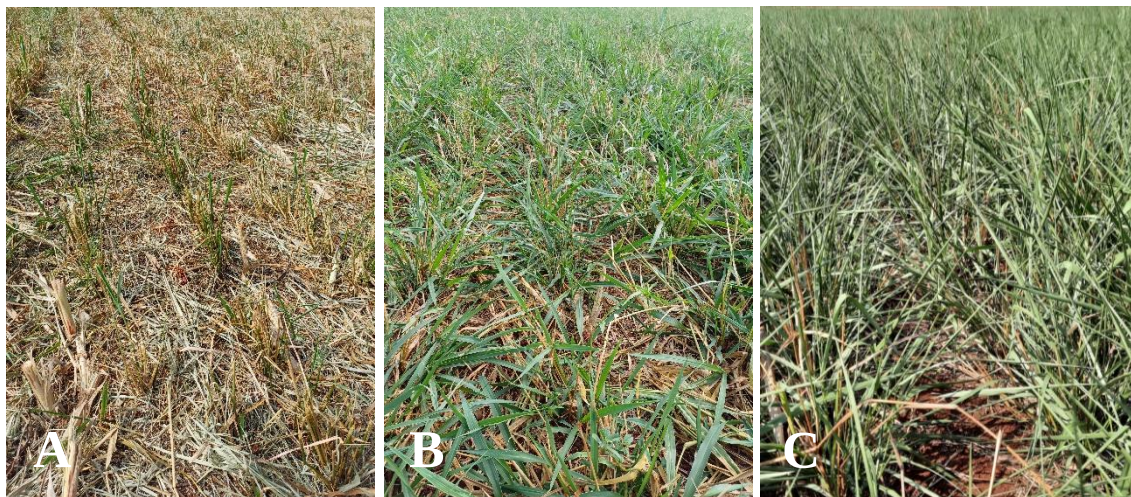
sorgo, utilizando-se uma fita graduada; Comprimento de Panícula (CP), obtido pelo comprimento médio das panículas, mensurados utilizando-se uma fita graduada; Diâmetro Basal do Colmo (DC), por medição do terço basal do colmo da planta utilizando-se um paquímetro graduado em milímetros e posteriormente calculado o diâmetro médio; Massa de 1000 Grãos (M1000), obtida pela contagem de mil grãos por parcela em contador eletrônico, determinando a massa de 1000 grãos em balança eletrônica de precisão (0,01 g), corrigindo a umidade para 13% (base úmida); Produtividade de Matéria Verde (MV) e Matéria Seca (MS) de Folhas, Colmo e Panícula separadamente, das dez plantas da área útil, foram separados manualmente as folhas, o colmo e a panícula, posteriormente, o material vegetal foi pesado para obtenção da MV, passados para sacos de papel e levados à estufa de circulação forçada à 65°C por 72 horas, para a obtenção da MS, cujos valores foram extrapolados para produção por hectare.

Simultaneamente foi avaliado a cultura do capim Piatã em consórcio, para a determinação da produtividade de matéria seca do capim, com o auxílio de um quadro amostral de 1,0 x 1,0 m, foram coletadas as plantas dentro de 1 m² de cada parcela, as quais foram acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados e pesadas em balança de precisão para a determinação da MV. Após esse procedimento, foram separadas subamostras, passadas para sacos de papel e levadas à estufa de circulação forçada à 65°C por 72 horas, para a obtenção da MS e posteriormente extrapolados para produção por hectare.

Para avaliar as características de fertilidade, atributos biológicos, atividade enzimática e as frações do P no solo das unidades experimentais, foram coletadas, no dia 26/09/23, dez amostras simples para compor uma amostra composta por parcela, para posteriores análises nas camadas de 0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m.

Após a colheita do consórcio, a área permaneceu em pousio com o capim Piatã (Figura 5), e no dia 06/10/23, para a determinação da produtividade de matéria seca do capim Piatã, com o auxílio de um quadro amostral de 1,0 x 1,0 m, foram coletadas as plantas dentro de 1m² de cada parcela, as quais foram acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados e pesadas em balança de precisão para a determinação da MV. Novamente, após esse procedimento, foram separadas subamostras, passadas para sacos de papel e levadas à estufa de circulação forçada à 65°C por 72 horas, para a obtenção da MS e posteriormente extrapolados os valores para produção por hectare. O capim Piatã foi dessecado no dia 13/10/23 com a utilização do herbicida Glyphosate (1560 g ha⁻¹ do i.a.), para seguir com o cultivo seguinte da rotação.

Figura 5 – Condução da cultivo de sorgo consorciado com capim Piatã em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2022/2023



A: logo após a colheita do consórcio sorgo x capim Piatã; B: vinte dias de pousio do capim Piatã; C: quarenta dias de pousio do capim Piatã.

Fonte: foto da própria autora.

Nas avaliações dos atributos biológicos do solo, foram determinados a Atividade Respiratória Microbiana (ARM), de acordo com a metodologia proposta por Anderson (1982), Carbono da Biomassa Microbiana (CBM), de acordo com a metodologia proposta por Vance, Brookes e Jenkinson (1987), e ambas as análises (ARM e CBM) foram realizadas no laboratório de Microbiologia do Solo da Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”, Universidade de São Paulo (ESALQ/USP – Piracicaba/SP). O Quociente Metabólico (qCO_2) foi calculado pela razão entre a ARM e o CBM, conforme proposto por Anderson e Domsch (1993), e o Carbono Orgânico Total (COT) foi determinado pelo método proposto por Walkley e Black (1934), realizado no laboratório de Microbiologia do Solo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Cerrados – Brasília/DF).

Para as análises das atividades enzimáticas do solo, β -Glicosidase (β G), Arilsulfatase (AS) e a Fosfatase Ácida (FÁ), foram adotadas as metodologias propostas por Tabatabai (1994), cujas determinações foram realizadas no laboratório de Microbiologia do Solo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Cerrados – Brasília/DF).

Para a avaliação da saúde do solo foi utilizado o modelo de quatro quadrantes proposto por Chaer *et al.* (2023), que visa avaliar as modificações do carbono no solo (perda, ganho ou estabilidade), com base na relação entre o COT e a atividade média das enzimas β G e AS por unidade de COT.

O fracionamento do fósforo do solo, em fósforo lábil (Láb), fósforo moderadamente lábil (Mod láb), fósforo não lábil (N láb), fósforo inorgânico (Pi), fósforo orgânico (Po) e fósforo total (P tot), foi realizado de acordo com a metodologia proposta por Gatiboni e Condrón (2021), com adaptações, e as análises foram feitas no laboratório de Análises Químicas do solo da Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo (ESALQ/USP – Piracicaba/SP).

As análises da fertilidade do solo, constaram dos atributos químicos: teores de fósforo (P), Enxofre (S), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), acidez potencial (H^+Al), valores de soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases (V), saturação por alumínio (m), teor de matéria orgânica (MO) e valores de potencial hidrogeniônico (pH), realizadas conforme metodologia proposta por Raij *et al.* (2001), no laboratório de Fertilidade do Solo da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP – Ilha Solteira/SP).

As coletas de solo foram realizadas com o auxílio de um perfurador de solo Stihl BT 45, onde para os atributos biológicos, atividade enzimática e fracionamento do P, foi coletado solo na camada de 0,00 a 0,10 m, já para os atributos químicos do solo, foi coletado as amostras nas camadas de 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m. As amostras foram colocadas em sacos plásticos, secas ao ar, destorroadas e peneiradas em malha de 05 mm (terra fina seca ao ar), posteriormente foram subdivididas para cada análise.

Para comparação das análises para os atributos químicos do solo entre a safra 2021/2022 e a safra 2023/2024 nas camadas de 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m, afim de observar o comportamento dos elementos no solo, foi realizado cálculo para obter-se a diferença entre os teores das análises e assim calculada a porcentagem de aumento ou decréscimo dos teores dos atributos químicos no solo entre as safras.

Os resultados foram submetidos à análise de variância pelo teste F ($P < 0,05$). Os efeitos de inoculação ou não com *A. brasilense* foram comparados pelo teste t (LSD) ($P < 0,05$). Enquanto que o efeito da adubação fosfatada residual foi avaliado por análise de regressão ($P < 0,05$). As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software SISVAR® (Ferreira, 2011).

4 RESULTADOS

Em análise dos atributos químicos do solo (Tabela 1), na camada de 0,00 a 0,10 m, não houve interação significativas entre as fontes de variação. Para a fonte de variação doses de fósforo, houve ajuste significativo apenas para o P, em uma linha de tendência quadrática (Figura 6), com ponto de máxima calculado de 192,5 kg ha⁻¹ de P₂O₅.

Tabela 1 – Médias dos valores para os atributos químicos do solo na camada de 0,00 a 0,10 m após colheita do milho em consórcio com capim Paiaguás, em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2021/2022

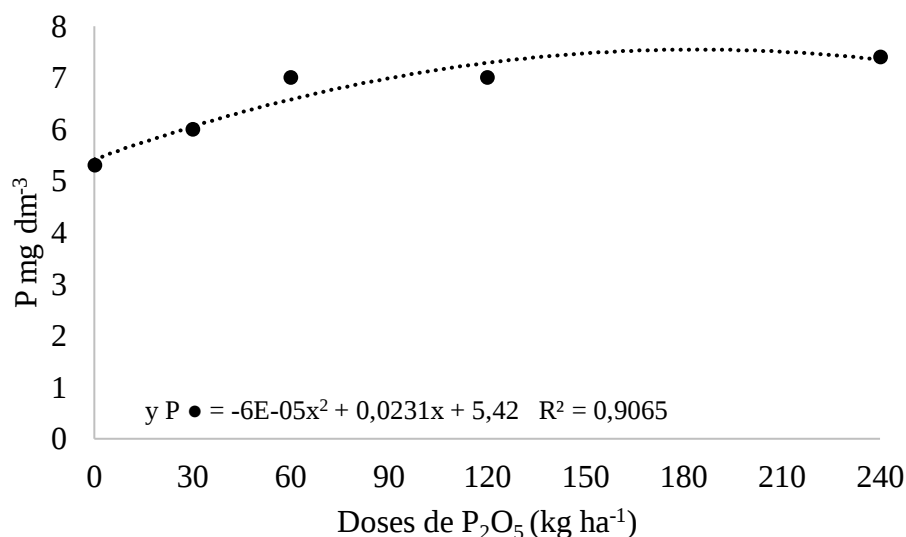
Tratamento	P --- mg dm ⁻³ ---	S	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V	m	MO	pH
					mmol _c dm ⁻³				----- % -----		g dm ⁻³	(CaCl ₂)
Doses de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹) (P)												
0	5	6	3,8	28	20	36	51,3	86,9	59	2	26	4,7
30	6	6	3,9	24	19	37	43,4	80,4	54	3	25	4,5
60	7	6	4,7	28	17	33	50,0	83,5	60	2	27	4,9
120	7	6	4,1	24	16	38	43,4	81,1	54	3	25	4,7
240	7	6	3,7	25	17	37	46,1	83,7	55	3	25	4,5
Inoculação (I)												
Sem	7a	5b	3,9	28a	18a	34b	49,9	83,7	59a	2	25	4,7
Com	6b	7a	4,1	24b	16b	39a	43,8	82,5	53b	3	26	4,6
Teste t - P	0,002*	0,89 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,88 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,60 ^{ns}
Teste t - I	0,001**	0,001**	0,53 ^{ns}	0,001**	0,001**	0,001**	0,83 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,001**	0,09 ^{ns}	0,86 ^{ns}	0,35 ^{ns}
Teste t - PxI	0,08 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,36 ^{ns}	0,41 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,88 ^{ns}	0,30 ^{ns}	0,89 ^{ns}	0,65 ^{ns}	0,96 ^{ns}
CV%	13,6	17,9	18,7	16,7	14,2	11,6	12,8	5,4	9,6	43,4	8,1	10,5

Médias seguidas por letras diferentes na coluna, para tratamentos distintos, diferem entre si pelo Teste t (LSD) a 5% de probabilidade. ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo Teste t (LSD), respectivamente. ^{ns} não significativo. Em que: CV: coeficiente de variação.

Fonte: elaboração da própria autora.

Enquanto que para o fator inoculação, os teores de potássio (K), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por alumínio (m%), matéria orgânica (MO) e o potencial hidrogeniônico (pH) não apresentaram diferenças significativas. Para o fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e saturação por bases (V%) houve incremento nas áreas sem inoculação, e apenas para o enxofre (S) e acidez potencial (H+Al) que a área com inoculação proporcionou maiores médias.

Figura 6 – Análise de regressão para a fonte de variação doses de fósforo para teores de fósforo na camada de 0,00 a 0,10 m do solo em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2021/2022



Fonte: elaboração da própria autora.

Observa-se portanto, ainda na Tabela 1, que as parcelas que tiveram as gramíneas inoculadas na rotação de culturas (Esquema 5), apresentaram teores de P e Ca 14,3% menores que nas parcelas não inoculadas, assim como para o Mg e V% com um decréscimo de 11,1% e 10,2% respectivamente. Enquanto que para os atributos químicos S e H+Al, as parcelas inoculadas tiveram valores maiores, com um aumento por esta ordem de 28,6 e 12,8%. Ainda nesta camada, observa-se que o teor de P se encontrava baixo, enquanto que a CTC estava alta, a MO com níveis médios e o pH baixo, de acordo com o Boletim 200, este também foi utilizado como base para os demais teores de nutrientes no solo.

Na camada de 0,10 a 0,20 m (Tabela 2), para os atributos químicos do solo também não houve interação entre as fontes de variação. Para o fator residual das doses de fósforo, não houve ajuste significativo de regressão. E quanto a inoculação, o P, Ca, Mg, SB e V% tiveram os maiores teores nas áreas sem inoculação, e apenas para o S e H+Al foram constatados os valores superiores nas áreas inoculadas. Os demais atributos não obtiveram efeito da inoculação das gramíneas produtoras de grãos em rotação.

Tabela 2 – Médias dos valores para os atributos químicos do solo na camada de 0,10 a 0,20 m, após colheita do milho em consórcio com capim Paiaguás, em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2021/2022

Tratamento	P	S	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V	m	MO	pH
	----- mg dm ⁻³ -----				mmol _c dm ⁻³ -----				----- % -----		g dm ⁻³	(CaCl ₂)
Doses de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹) (P)												
0	4	6	2,7	16	14	36	33,1	69,2	48	5	19	5
30	4	6	2,3	16	15	37	32,9	69,9	47	3	19	5
60	5	7	2,2	17	14	36	32,4	68,0	48	4	19	5
120	5	7	2,3	18	14	40	34,1	74,2	46	6	19	5
240	5	7	2,3	17	13	37	32,2	68,9	47	7	19	5
Inoculação (I)												
Sem	6a	5b	2,3	18a	15a	35b	35,3a	70,9	50a	5	19	5
Com	3b	8a	2,4	15b	13b	39a	30,6b	68,2	44b	5	19	5
Teste t - P	0,19 _{ns}	0,77 _{ns}	0,58 _{ns}	0,79 _{ns}	0,48 _{ns}	0,36 _{ns}	0,93 _{ns}	0,13 _{ns}	0,95 _{ns}	0,10 _{ns}	0,72 _{ns}	0,42 _{ns}
Teste t - I	0,001**	0,001**	0,86 _{ns}	0,001**	0,001**	0,040*	0,001**	0,28 _{ns}	0,001**	0,06 _{ns}	0,23 _{ns}	0,14 _{ns}
Teste t - PxI	0,17 _{ns}	0,26 _{ns}	0,39 _{ns}	0,29 _{ns}	0,34 _{ns}	0,84 _{ns}	0,38 _{ns}	0,36 _{ns}	0,69 _{ns}	0,12 _{ns}	0,35 _{ns}	0,42 _{ns}
CV%	25,1	20,1	27	17,8	13,3	12,5	13	6,9	11,9	23,8	7,6	3,2

Médias seguidas por letras diferentes na coluna, para tratamentos distintos, diferem entre si pelo Teste t (LSD) a 5% de probabilidade. ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo Teste t (LSD), respectivamente. _{ns} não significativo. Em que: CV: coeficiente de variação.

Fonte: elaboração da própria autora.

Nota-se na Tabela 2, que as parcelas que tiveram as gramíneas inoculadas na rotação de culturas, o teor de P foi 50% menor que nas parcelas não inoculadas, assim como para o Mg e SB com um decréscimo de 13,3%, e o Ca e V% com redução de 16,7 e 12%, respectivamente. Enquanto que para S e H+Al, as parcelas inoculadas tiveram valores maiores, com incremento de 37,5 e 10,2%, respectivamente. Ainda nesta camada, observa-se que o teor de P no solo se encontrava baixo, a CTC estava alta, a MO em níveis médios e o pH baixo.

Contrastando os resultados das duas camadas analisadas, observa-se que os teores de P, K, Ca, Mg, SB, CTC, V% e MO diminuíram em camadas mais profundas, ao contrário do m% e o pH que teve seus teores elevados. Os teores de S foram aumentados nas doses mais altas de P₂O₅ (a partir da dose de 60 kg ha⁻¹) e também em área inoculada. Apenas a H+Al manteve-se constante em ambas as profundidades.

A produtividade de matéria seca do capim Paiaguás não expressou interação ou diferença significativa, para o fator residual das doses de fósforo quanto para a inoculação das gramíneas produtoras de grãos antecessoras na rotação (Tabela 3).

Tabela 3 – Médias dos valores para matéria verde (MV) e matéria seca (MS) do capim Paiaguás, em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2021/2022

Tratamento	MV	MS
	----- kg ha ⁻¹ -----	
	Doses de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹) (P)	
0	11781	4097
30	13849	4938
60	12960	4663
120	13732	4444
240	12979	3814
	Inoculação (I)	
Com	11944	4065
Sem	14176	4717
Teste t - P	0,83 ^{ns}	0,57 ^{ns}
Teste t - I	0,07 ^{ns}	0,17 ^{ns}
Teste t - PxI	0,86 ^{ns}	0,55 ^{ns}
CV%	19,69	13,52

Médias seguidas por letras diferentes na coluna, para tratamentos distintos, diferem entre si pelo Teste t (LSD) a 5% de probabilidade. ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo Teste t (LSD), respectivamente. ^{ns} não significativo. Em que: CV: coeficiente de variação.

Fonte: elaboração da própria autora.

Para os componentes de produção e produtividade da soja (Tabela 4), houve interação significativa entre o residual das doses de P₂O₅ e a inoculação das gramíneas antecessoras (Tabela 4), cujo desdobramento para o NGP (Tabela 5), demonstrou médias superiores nas parcelas não inoculadas e com as doses de 30, 60 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Entretanto, sem modelo de regressão significativo no desdobramento da interação para NVP e NGP, por efeito do residual de fósforo (Tabelas 5 e 6).

Houve diferenças significativas para o fator inoculação na altura de plantas (ALT) e número de vagens por planta (NVP), onde para a ALT a área inoculada obteve as maiores médias, e para o NVP, a área sem inoculação expressou as maiores médias. Para os demais componentes não observou-se diferenças para a fonte de variação inoculação.

Tabela 4 – Médias dos valores para altura de planta (ALT), altura de inserção de primeira vagem (ALTPV), número de grãos por planta (NGP), número de vagens por planta (NVP), população de plantas por hectare (POP), produtividade de grãos (PG) e massa de 100 grãos (M100) da cultura soja, em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2022/2023

Tratamento	ALT	ALTPV	NGP	NVP	POP	PG	M100
	----- cm -----		----- n° -----			kg	g
Doses de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹) (P)							
0	112	25	198	108	117284	3343	16
30	105	23	256	127	114815	3328	16
60	107	26	279	139	118518	3714	16
120	107	25	252	124	101543	3637	16
240	109	25	230	114	117901	3614	17
Inoculação (I)							
Com	112a	25	233	116b	122222	3529	16
Sem	105b	25	253	129a	105802	3526	17
Teste t - P	0,654 ^{ns}	0,535 ^{ns}	0,0001 ^{**}	0,001 ^{**}	0,728 ^{ns}	0,251 ^{ns}	0,567 ^{ns}
Teste t - I	0,012 ^{**}	0,571 ^{ns}	0,066 ^{ns}	0,006 ^{**}	0,075 ^{ns}	0,984 ^{ns}	0,139 ^{ns}
Teste t - PxI	0,963 ^{ns}	0,516 ^{ns}	0,011 [*]	0,026 [*]	0,9857 ^{ns}	0,053 ^{ns}	0,712 ^{ns}
CV%	8,00	11,11	13,69	11,98	24,70	16,80	9,95

Médias seguidas por letras diferentes na coluna, para tratamentos distintos, diferem entre si pelo Teste t (LSD) a 5% de probabilidade. ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo Teste t (LSD), respectivamente. ^{ns} não significativo. Em que: CV: coeficiente de variação.

Fonte: elaboração da própria autora.

Observa-se ainda na Tabela 4, que as parcelas que tiveram as gramíneas inoculadas na rotação de culturas, apresentaram a ALT 6,3% maior que nas parcelas não inoculadas, de maneira oposta, para o NVP houve decréscimo de 10% nas áreas inoculadas.

Tabela 5 – Desdobramento das interações - Doses de P_2O_5 x inoculação, para número de grãos por planta da cultura da soja em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2022/2023

Número de grãos por planta		
TRATAMENTO	Inoculação	
Doses de P_2O_5 (kg ha ⁻¹)	Com	Sem
	----- n° -----	
0	214	183
30	230B	282A
60	251B	309A
120	227B	277A
240	246	215

Médias seguidas de letras distintas maiúsculas na linha diferem entre si, pelo Teste t (LSD) a 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração da própria autora.

Houve interação entre o residual das doses de P_2O_5 e a inoculação das gramíneas antecessoras para o NVP (Tabela 6), e no desdobramento verifica-se médias superiores nas parcelas não inoculadas e com as doses de 30 e 60 kg ha⁻¹ de P_2O_5 .

Tabela 6 – Desdobramento das interações - Doses de P_2O_5 x inoculação, para número de vagens por planta da cultura da soja em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2022/2023

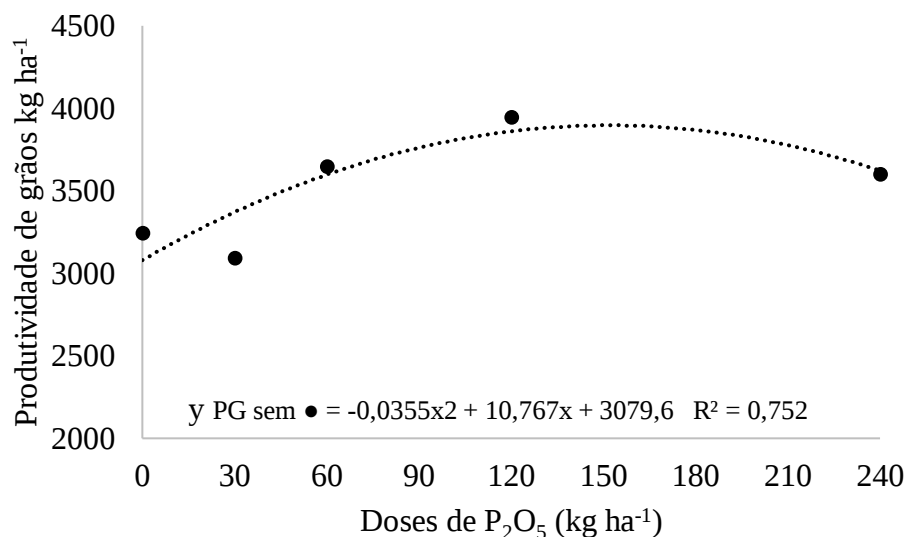
Número de vagens por planta		
TRATAMENTO	Inoculação	
Doses de P_2O_5 (kg ha ⁻¹)	Com	Sem
	----- n° -----	
0	113	102
30	113B	142A
60	123B	155A
120	116	131
240	113	114

Médias seguidas de letras distintas maiúsculas na linha diferem entre si, pelo Teste t (LSD) a 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração da própria autora.

Para o residual de doses de fósforo, em área sem inoculação, houve ajuste quadrático significativo para a produtividade de grãos (Figura 7), com ponto de máxima calculado de 151,6 kg ha⁻¹ de P_2O_5 , enquanto que, para as áreas inoculadas, não houve ajuste de regressão.

Figura 7 – Análise de regressão para o desdobramento de doses de fósforo dentro de inoculação (sem) para produtividade de grãos da cultura da soja em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por A. brasiliense. Selvíria/MS, 2022/2023



Fonte: elaboração da própria autora.

Para os componentes de produção e produtividade do sorgo (Tabela 7) observa-se interação significativa entre o residual das doses de P_2O_5 e a inoculação das gramíneas antecessoras para PG, cujo desdobramento (Tabela 8), expressou médias superiores nas parcelas inoculadas e com as doses de 0 e $240\ kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 . Contudo, não houve ajuste de regressão para doses de fósforo residual, independentemente se em áreas com ou sem inoculação.

Houve diferença significativa para o fator inoculação na produtividade de grãos (PG) e massa de 1000 grãos (M1000). A PG foi maior na área inoculada, enquanto que a M1000 expressou maiores médias na área não inoculada. Para os demais componentes não houve diferenças significativas dos tratamentos.

Ainda na Tabela 7, verifica-se que as parcelas que tiveram as gramíneas inoculadas na rotação de culturas, PG foi 19,4% maior que nas parcelas não inoculadas, de maneira oposta, para a M1000, houve decréscimo de 4,6% nas áreas inoculadas.

Tabela 7 – Médias dos valores para altura de planta (ALT), comprimento de panícula (CP), diâmetro do colmo (DC), população de plantas (POP), produtividade de grãos (PG) e massa de 1000 grãos (M1000) da cultura do sorgo granífero consorciado com capim Piatã, em área sob SPD, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2023

Tratamento	ALT	CP	DC	POP	PG	M1000
	----- cm -----		mm	nº	kg ha ⁻¹	g
Doses de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹) (P)						
0	89	32	15,7	63425	824	186
30	84	29	15,8	73148	960	195
60	86	31	14,7	66203	791	187
120	88	31	16,4	66666	869	190
240	86	32	15,6	70833	855	189
Inoculação (I)						
Com	85	31	15,7	68703	952a	185b
Sem	88	31	15,6	67407	767b	194a
Teste t - P	0,156 ^{ns}	0,072 ^{ns}	0,244 ^{ns}	0,261 ^{ns}	0,470 ^{ns}	0,443 ^{ns}
Teste t - I	0,051 ^{ns}	0,291 ^{ns}	0,841 ^{ns}	0,663 ^{ns}	0,004 ^{**}	0,008 ^{**}
Teste t - PxI	0,524 ^{ns}	0,983 ^{ns}	0,765 ^{ns}	0,480 ^{ns}	0,005 ^{**}	0,686 ^{ns}
CV%	4,50	6,15	9,02	13,70	21,97	5,37

Médias seguidas por letras diferentes na coluna, para tratamentos distintos, diferem entre si pelo Teste t (LSD) a 5% de probabilidade. ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo Teste t (LSD), respectivamente. ^{ns} não significativo. Em que: CV: coeficiente de variação.

Fonte: elaboração da própria autora.

Tabela 8 – Desdobramento das interações - Doses de P₂O₅ x inoculação, para produtividade de grãos (PG) da cultura do sorgo em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2023

Produtividade de grãos do sorgo		
TRATAMENTO	Inoculação	
Doses de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Com	Sem
	----- kg ha ⁻¹ -----	
0	1022A	626B
30	927	994
60	724	857
120	974	764
240	1115A	594B

Médias seguidas de letras distintas maiúsculas na linha diferem entre si, pelo Teste t (LSD) a 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração da própria autora.

Para a produtividade de matéria verde e matéria seca do colmo, folhas e panícula do sorgo (Tabela 9) não houve interação entre os fatores analisados, assim como para o residual das dosagens de fósforo, entretanto para o fator inoculação houve diferença significativa na produtividade de matéria verde e matéria seca da panícula, ambas expressaram com maiores produções na área inoculada, enquanto que para os demais componentes não houve diferenças significativas..

Observa-se ainda na Tabela 9, que as parcelas que tiveram as gramíneas inoculadas na rotação de culturas, apresentaram a MV P e MS P maiores em 15,6 e 17% respectivamente que nas parcelas não inoculadas.

Tabela 9 – Médias dos valores para matéria verde e seca do colmo (MV C e MS C), matéria verde e seca de folhas (MV F e MS F) e matéria verde e seca da panícula (MV P e MS P) respectivamente, da cultura do sorgo granífero consorciado com capim Piatã, em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2023

Tratamento	MV C	MS C	MV F	MS F	MV P	MS P
----- kg ha ⁻¹ -----						
Doses de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹) (P)						
0	4138	991	1743	526	2095	1334
30	4608	1094	1996	629	2198	1396
60	3976	840	1474	474	1893	1161
120	4553	1085	1692	477	2100	1380
240	4743	1069	1747	534	2115	1367
Inoculação (I)						
Com	4384	1014	1650	500	2257a	1451a
Sem	4423	1017	1811	556	1904b	1204b
Teste t - P	0,544 ^{ns}	0,228 ^{ns}	0,060 ^{ns}	0,165 ^{ns}	0,788 ^{ns}	0,400 ^{ns}
Teste t - I	0,905 ^{ns}	0,964 ^{ns}	0,132 ^{ns}	0,189 ^{ns}	0,029*	0,006**
Teste t - P x I	0,226 ^{ns}	0,355 ^{ns}	0,564 ^{ns}	0,683 ^{ns}	0,114 ^{ns}	0,313 ^{ns}
CV%	23,84	24,17	19,11	25,50	23,48	20,03

Médias seguidas por letras diferentes na coluna, para tratamentos distintos, diferem entre si pelo Teste t (LSD) a 5% de probabilidade. ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo Teste t (LSD), respectivamente. ^{ns} não significativo. Em que: CV: coeficiente de variação.

Fonte: elaboração da própria autora.

Para a produtividade de matéria verde e matéria seca do capim Piatã (Tabela 10) houve diferenças significativas para o fator inoculação, e ambas expressaram maiores produções na área não inoculada.

Nota-se na Tabela 10, que houve interação entre o residual das doses de P_2O_5 e a inoculação das gramíneas antecessoras para a produtividade de MV e MS do capim Piatã (Tabela 11 e 12), cujo desdobramento para a MV (Tabela 11), constata-se médias superiores nas parcelas não inoculadas e com as doses de 0 e 60 kg ha⁻¹ de P_2O_5 , entretanto sem ajuste de regressão nas áreas com ou sem inoculação. No desdobramento para a MS, verifica-se médias superiores nas parcelas não inoculadas e com as doses de 0 e 60 kg ha⁻¹ de P_2O_5 (Tabela 12), e como para MV, não houve ajustes significativos de regressão por efeito do residual da adubação fosfatada.

Quanto a inoculação, as parcelas que tiveram as gramíneas inoculadas na rotação de culturas, apresentaram a MV e MS do capim Piatã menores em 14,1 e 12,8%, respectivamente, que nas parcelas não inoculadas. De acordo com o exposto na Tabela 10,

Tabela 10 – Médias dos valores para matéria verde (MV) e matéria seca (MS) do capim Piatã em consórcio com sorgo granífero, em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2023

Tratamento	MV	MS
	----- kg ha ⁻¹ -----	
Doses de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹) (P)		
0	13305	3831
30	13366	3806
60	14741	4092
120	15407	4225
240	18590	5298
Inoculação (I)		
Com	13938b	3960b
Sem	16225a	4541a
Teste t - P	0,009**	0,012**
Teste t - I	0,023*	0,046*
Teste t - PxI	0,045*	0,012**
CV%	20,13	20,88

Médias seguidas por letras diferentes na coluna, para tratamentos distintos, diferem entre si pelo Teste t (LSD) a 5% de probabilidade. ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo Teste t (LSD), respectivamente. ^{ns} não significativo. Em que: CV: coeficiente de variação.

Fonte: elaboração da própria autora.

Tabela 11 – Desdobramento das interações - Doses de P₂O₅ x inoculação, para massa verde (MV) do capim Piatã em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2023

Massa verde do capim Piatã		
TRATAMENTO	Inoculação	
Doses de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Com	Sem
	----- kg ha ⁻¹ -----	
0	9825B	16785A
30	14472	12260
60	12470B	17012A
120	15190	15625
240	17735	19445

Médias seguidas de letras distintas maiúsculas na linha diferem entre si, pelo Teste t (LSD) a 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração da própria autora.

Tabela 12 – Desdobramento das interações - Doses de P_2O_5 x inoculação, para massa seca (MS) do capim Piatã em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2023

Massa seca do capim Piatã		
TRATAMENTO	Inoculação	
Doses de P_2O_5 ($kg\ ha^{-1}$)	Com	Sem
	----- $kg\ ha^{-1}$ -----	
0	2798B	4864A
30	4248	3363
60	3280B	4903A
120	4279	4172
240	5193	5403

Médias seguidas de letras distintas maiúsculas na linha diferem entre si, pelo Teste t (LSD) a 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração da própria autora.

Em análise dos atributos químicos do solo (Tabela 13) na camada de 0,00 a 0,10 m, houve interação significativa entre o residual das doses de P_2O_5 e a inoculação das gramíneas antecessoras para os teores de P, Ca e m%, no desdobramento para o P (Tabela 14), constataram-se médias superiores nas parcelas não inoculadas e com as doses de 120 e 240 $kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 . Para os teores de cálcio no solo (Tabela 15), verifica-se maiores teores nas parcelas não inoculadas e com a dose de 30 $kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 . Cabe salientar, que tanto para os teores de P, quanto para Ca, não houve ajustes de regressão para das doses de fósforo nas áreas com ou sem inoculação por *A. brasilense*. Para a saturação por alumínio (Tabela 16) observa-se médias superiores nas parcelas não inoculadas, nas doses de 0 e 60 $kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 . Para as áreas inoculadas, as médias foram superiores nas doses de 30, 120 e 240 $kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 , e novamente sem modelo de regressão significativo dentro do desdobramento.

Tabela 13 – Médias dos valores para os atributos químicos do solo na camada de 0,00 a 0,10 m após a dessecação do capim Piatã, em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2023/2024

Tratamento	P ----- mg dm ⁻³ -----	S	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V	m	MO	pH
					mmol _c dm ⁻³				----- % -----		g dm ⁻³	(CaCl ₂)
Doses de P ₂ O ₅ (P)												
0	10	5	4,1	25	17	33	46,4	79,3	59	4	28	5,1
30	13	5	4,1	28	19	33	51,2	83,7	60	4	28	5,1
60	11	5	4,2	23	16	33	44,2	77,8	57	4	28	5,1
120	12	5	4,1	23	15	33	42,3	75,2	56	6	27	5,1
240	20	5	4,1	28	17	34	47,1	81,0	58	4	29	5,1
Inoculação (I)												
Sem	16a	5	4,6a	26	18	33	48,9	82,2a	59	4,1b	29	5,1
Com	11b	5	3,8b	24	16	33	43,6	76,8b	57	4,8a	28	5,1
Teste t - P	0,0001**	0,986 ^{ns}	0,962 ^{ns}	0,102 ^{ns}	0,483 ^{ns}	0,976 ^{ns}	0,545 ^{ns}	0,259 ^{ns}	0,886 ^{ns}	0,007**	0,311 ^{ns}	0,948 ^{ns}
Teste t - I	0,0001**	0,283 ^{ns}	0,000**	0,072 ^{ns}	0,225 ^{ns}	0,811 ^{ns}	0,127 ^{ns}	0,028*	0,474 ^{ns}	0,038*	0,352 ^{ns}	0,510 ^{ns}
Teste t - P x I	0,0001**	0,359 ^{ns}	0,915 ^{ns}	0,018**	0,279 ^{ns}	0,590 ^{ns}	0,339 ^{ns}	0,357 ^{ns}	0,453 ^{ns}	0,0001**	0,651 ^{ns}	0,760 ^{ns}
CV%	20,44	20,15	14,09	16,02	23,24	13,9	23,33	9,79	13,21	22,77	8,27	4,61

Médias seguidas por letras diferentes na coluna, para tratamentos distintos, diferem entre si pelo Teste t (LSD) a 5% de probabilidade. ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo Teste t (LSD), respectivamente. ^{ns} não significativo. Em que: CV: coeficiente de variação.

Fonte: elaboração da própria autora.

Para o fator inoculação, os teores de enxofre (S), cálcio (Ca), magnésio (Mg), acidez potencial (H+Al), valores de soma de bases (SB), saturação por bases (V%), teores de matéria orgânica (MO) e o valores de potencial hidrogeniônico (pH) não apresentaram diferença significativas. Enquanto que para o fósforo (P), potássio (K) e capacidade de troca catiônica (CTC) houve incremento nas áreas sem inoculação, e apenas para saturação por alumínio (m%) que a área com inoculação proporcionou maiores médias.

Observa-se portanto, que as parcelas que tiveram as gramíneas inoculadas na rotação de culturas, apresentaram teor de P 31,2% menor que nas parcelas não inoculadas, assim como para o K e a CTC com um decréscimos de 17,4 e 6,6%, respectivamente. Enquanto que para a m%, as parcelas inoculadas tiveram valores maiores, com um aumento de 14,6%. Ainda nesta camada, observa-se que o teor de P se encontrava baixo, exceto nas com as doses de 30 e 240 kg ha⁻¹, onde tinham níveis médios. A CTC estava alta, a MO com níveis médios e o pH baixo.

Tabela 14 – Desdobramento das interações - Doses de P_2O_5 x inoculação, para teores de fósforo no solo, na camada de 0 a 0,10 m do solo em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2023/2024

Teores de fósforo no solo na camada de 0 a 0,10 m		
TRATAMENTO	Inoculação	
Doses de P_2O_5 (kg ha ⁻¹)	Com	Sem
	----- mg dm ⁻³ -----	
0	11,0	9,5
30	12,7	13,7
60	9,2	11,7
120	9,7B	13,7A
240	11,2B	29,5A

Médias seguidas de letras distintas maiúsculas na linha diferem entre si, pelo Teste t (LSD) a 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração da própria autora.

Tabela 15 – Desdobramento das interações - Doses de P_2O_5 x inoculação, para teores de cálcio no solo, na camada de 0 a 0,10 m do solo em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2023/2024

Teores de cálcio no solo na camada de 0 a 0,10 m		
TRATAMENTO	Inoculação	
Doses de P_2O_5 (kg ha ⁻¹)	Com	Sem
	----- mmolc dm ⁻³ -----	
0	26,5	23,5
30	22,5B	33,2A
60	23,7	22,7
120	21,7	23,7
240	24,2	27,2

Médias seguidas de letras distintas maiúsculas na linha diferem entre si, pelo Teste t (LSD) a 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração da própria autora.

Tabela 16 – Desdobramento das interações - Doses de P_2O_5 x inoculação, para saturação por alumínio (m%) no solo, na camada de 0 a 0,10 m do solo em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2023/2024

Saturação por alumínio no solo, na camada de 0 a 0,10 m		
TRATAMENTO	Inoculação	
Doses de P_2O_5 (kg ha ⁻¹)	Com	Sem
	----- % -----	
0	3,5B	5,0A
30	5,7A	3,0B
60	3,5B	5,2A
120	6,5A	5,0B
240	5,0A	2,5B

Médias seguidas de letras distintas maiúsculas na linha diferem entre si, pelo Teste t (LSD) a 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração da própria autora.

Na camada de 0,10 a 0,20 m (Tabela 17), observa-se desdobramento entre o residual das doses de P_2O_5 e a inoculação das gramíneas antecessoras para a saturação por alumínio (Tabela 18) que a apresentou médias superiores nas parcelas não inoculadas, nas doses de 0 e 240 kg ha⁻¹ de P_2O_5 . Para as áreas inoculadas, as médias foram superiores na dose de 120 kg ha⁻¹ de P_2O_5 . Ainda conforme a Tabela 17, para as doses de fósforo nas áreas sem inoculação (desdobramento), houve ajuste exponencial positivo para os teores de P (Figura 8), entretanto, sem ajuste nas áreas inoculadas.

Quanto ao fator inoculação, apenas o K teve maior valor nas áreas sem inoculação, enquanto que nas áreas inoculadas, apenas a MO apresentou maiores valores. Os demais atributos não tiveram efeito significativo da inoculação das gramíneas em rotação.

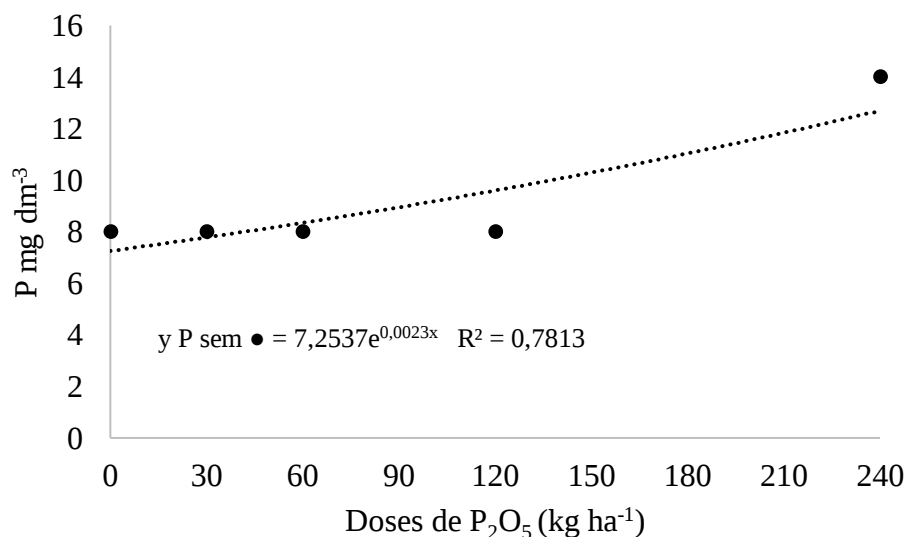
Tabela 18 – Desdobramento das interações - Doses de P_2O_5 x inoculação, para o atributo químico saturação por alumínio do solo, na camada de 0,10 a 0,20 m do solo em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2023/2024

Saturação por alumínio do solo na camada de 0,10 a 0,20 m		
TRATAMENTO	Inoculação	
Doses de P_2O_5 ($kg\ ha^{-1}$)	Com	Sem
	----- % -----	
0	5,0B	7,5A
30	7,2	7,5
60	6,5	7,5
120	9,7A	7,5B
240	3,7B	7,2A

Médias seguidas de letras distintas maiúsculas na linha diferem entre si, pelo Teste t (LSD) a 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração da própria autora.

Figura 8 – Análise de regressão para o desdobramento das doses de fósforo dentro de inoculação (sem) para teores de P no solo, na camada de 0,10 a 0,20 m do solo em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2023/2024



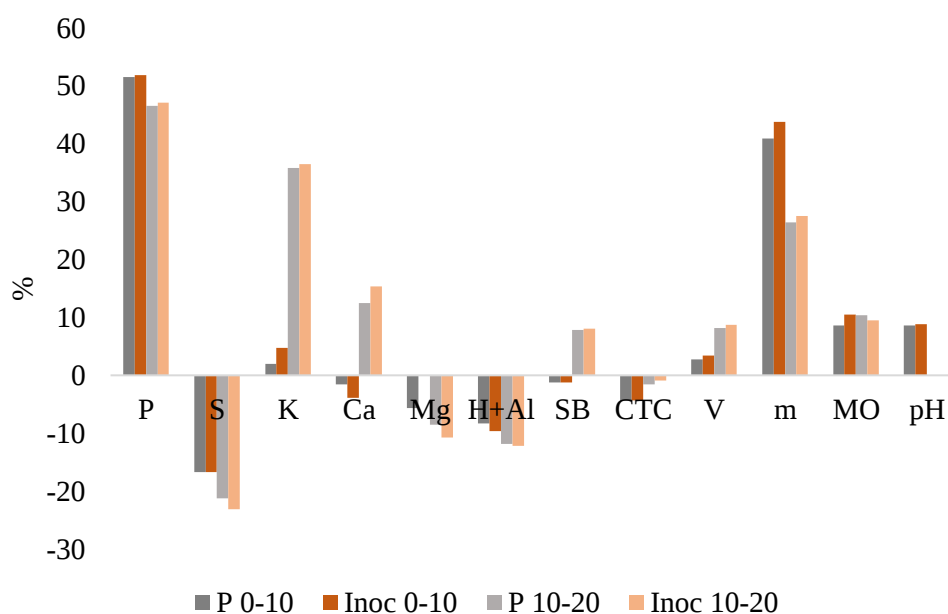
Fonte: elaboração da própria autora.

Contrastando os resultados das duas camadas analisadas, observa-se que os teores de P, K, Ca, Mg, SB, CTC, V% e MO diminuíram em camadas mais profundas, ao contrário do m% e o pH que tiveram seus teores elevados. Os teores de S foram aumentados com as doses de P_2O_5 .

Apenas o S, com e sem inoculação, e o H+Al mantiveram-se constantes em ambas as profundidades do solo.

Em uma comparação entre as análises para os atributos químicos do solo na safra 2021/2022 e a safra 2023/2024 nas camadas de 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m, observa-se comportamento semelhante dos elementos no solo (Figura 9).

Figura 9 – Médias dos atributos químicos do solo nas safras 2021/2022 e 2023/2024 para a fonte de variação residual de P_2O_5 (P) e inoculação das gramíneas (Inoc) nas camadas de 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m do solo em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2023/2024



Fonte: elaboração da própria autora.

Houve incremento para P, K, V%, m% e MO para ambas as fontes de variação e camadas do solo da safra 2021/2022 para a safra 2023/2024. Para os teores de Ca e valor de SB observa-se aumento apenas na camada de 0,10 a 0,20 m, enquanto que na camada mais superficial houve decréscimo por efeito dos tratamentos. Verifica-se que S, Mg, H+Al e CTC foram reduzidos entre as safras.

As diferentes frações de P foram classificadas segundo a labilidade em cada extrator. Para o P lábil foi considerado as frações de P_i extraído pela RTA e as frações de P_i e P_o extraído pelo bicarbonato de sódio. Para o P moderadamente lábil, considerou-se os teores de P_i e P_o

extraídos pelo NaOH 0,1 mol L⁻¹ junto ao P inorgânico extraído com HCl. Enquanto que o fósforo não lábil foi constituído pela soma do Pi e Po extraído pelo NaOH 0,5 mol L⁻¹ e o Pi e Po residual.

Dessa forma, em análise das frações do fósforo no solo (Tabela 19), observa-se desdobramento da interação, para doses residuais de fósforo nas áreas sem inoculação, houve ajuste significativo para a fração P lábil e P moderadamente lábil no solo, ambas com incremento exponencial (Figura 10). Este mesmo tipo de ajuste exponencial também foi verificado na fração inorgânica de P no solo, na áreas sem inoculação (Figura 11), enquanto que nas áreas inoculadas não houve ajustes significativos para P Láb, P Mod láb e Pi.

Tabela 19 – Médias dos valores para o fracionamento do fósforo do solo na camada de 0,00 – 0,10 m, fósforo lábil (Láb), fósforo moderadamente lábil (Mod láb), fósforo não lábil (N láb) fósforo inorgânico (Pi), fósforo orgânico (Po), fósforo total (P tot), após o pousio do capim Piaã, em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2023/2024

Tratamento	Láb	Mod láb	N láb	Pi	Po	P tot
----- mg kg ⁻¹ -----						
Doses de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹) (P)						
0	13,09	149,68	224,95	42,88	96,99	387,72
30	14,33	149,31	228,21	46,53	92,14	393,77
60	13,78	148,32	220,37	43,72	94,80	382,45
120	15,12	150,92	224,06	48,14	91,74	390,41
240	26,01	167,01	223,43	57,29	98,30	415,40
Inoculação (I)						
Com	13,26b	150,48	217,34	45,54	94,10	381,17
Sem	19,66a	155,61	231,06	49,88	95,49	406,33
Teste t - P	0,0001**	0,014**	0,994 ^{ns}	0,003**	0,394 ^{ns}	0,521 ^{ns}
Teste t - I	0,0001**	0,170 ^{ns}	0,227 ^{ns}	0,069 ^{ns}	0,583 ^{ns}	0,053 ^{ns}
Teste t - PxI	0,0001**	0,017**	0,785 ^{ns}	0,002**	0,850 ^{ns}	0,774 ^{ns}
CV%	19,49	07,55	15,73	15,26	8,39	10,06

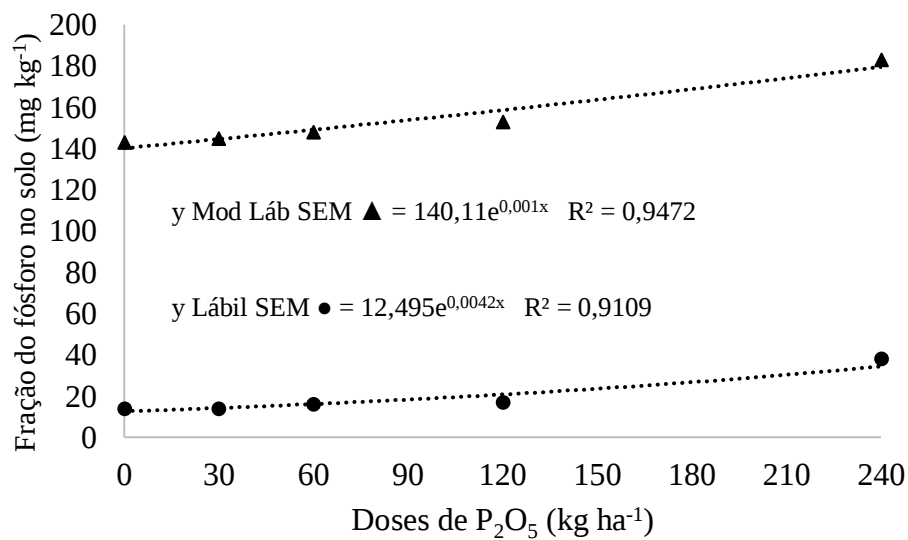
Médias seguidas por letras diferentes na coluna, para tratamentos distintos, diferem entre si pelo Teste t (LSD) a 5% de probabilidade. ** e * : significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo Teste t (LSD), respectivamente. ^{ns} não significativo. Em que: CV: coeficiente de variação.

Fonte: elaboração da própria autora.

Para o fator inoculação, a porção lábil teve distinção estatística entre as médias, havendo maiores teores de P lábil nas áreas sem inoculação, entretanto, para as demais formas de P no solo, não ou houve efeito deste fator. Nota-se ainda na Tabela 19, que as parcelas que tiveram

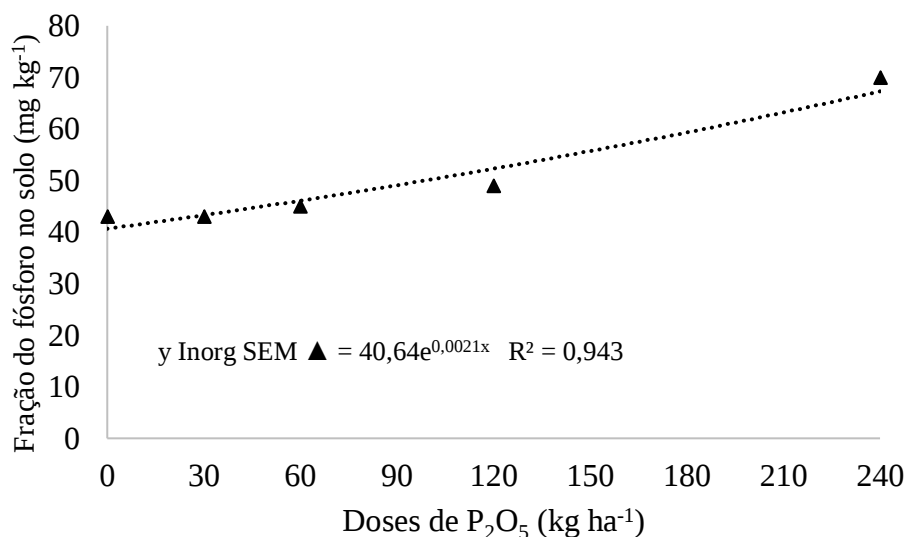
as gramíneas inoculadas na rotação de culturas, apresentaram teor de P lábil 32,5% menor que nas parcelas não inoculadas.

Figura 10 – Análise de regressão para o desdobramento das doses de fósforo dentro de inoculação (sem) para a fração do fósforo moderadamente lábil (Mod láb) e lábil (Láb) no solo, na camada de 0 a 0,10 m do solo em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2023/2024



Fonte: elaboração da própria autora.

Figura 11 – Análise de regressão para o desdobramento das doses de fósforo dentro de inoculação (sem) para a fração P inorgânica (Inorg) no solo, na camada de 0 a 0,10 m do solo em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2023/2024



Fonte: elaboração da própria autora.

Em análise da atividade enzimática do solo (Tabela 20), não houve interação entre os fatores analisados, assim como para o fator isolado dos residuais da adubação fosfatada. Entretanto houve efeito da inoculação por *A. brasilense*, para as enzimas arilsulfatase (AS) e β -glicosidase (β G), com maior atividade em áreas não inoculadas. Para a fosfatase ácida (FÁ), não houve diferenças significativas para o fator inoculação.

Tabela 20 – Médias dos valores para atividade enzimática do solo na camada de 0,00 – 0,10 m, arilsulfatase (AS), β -glicosidase (β G) e fosfatase ácida (FÁ), após o pousio do capim Piatã, em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2023/2024

Tratamento	AS	ßG	FÁ
	----- µg PNP g ⁻¹ solo h ⁻¹ -----		
Doses de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹) (P)			
0	141	145	313
30	136	137	311
60	128	143	316
120	136	138	289
240	148	155	339
Inoculação (I)			
Com	127b	127b	319
Sem	148a	159a	308
Teste t - P	0,558 ^{ns}	0,675 ^{ns}	0,568 ^{ns}
Teste t - I	0,008 ^{**}	0,0001 ^{**}	0,587 ^{ns}
Teste t - PxI	0,103 ^{ns}	0,315 ^{ns}	0,504 ^{ns}
CV%	17,41	18,90	18,34

Médias seguidas por letras diferentes na coluna, para tratamentos distintos, diferem entre si pelo Teste t (LSD) a 5% de probabilidade. ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo Teste t (LSD), respectivamente. ^{ns} não significativo. Em que: CV: coeficiente de variação.

Fonte: elaboração da própria autora.

Nota-se ainda na Tabela 20, que as parcelas que tiveram as gramíneas inoculadas na rotação de culturas, a atividade da AS e da β G foram 14,2 e 20,1% menor que nas parcelas não inoculadas.

Em análise dos atributos biológicos do solo (Tabela 21), também não houve interação entre os fatores analisados, assim como para o fator isolado dos residuais da adubação fosfatada. Para a inoculação, observou-se diferença entre as médias da atividade respiratória microbiana (ARM) e do quociente metabólico (qCO_2), tendo as maiores médias em áreas não inoculadas. Para os demais atributos biológicos do solo, não houve diferenças significativas para inoculação. As parcelas que tiveram as gramíneas inoculadas na rotação de culturas, apresentaram ARM e qCO_2 22,2 e 23,1% menor que nas parcelas não inoculadas.

Tabela 21 – Médias dos valores para os atributos biológicos do solo na camada de 0,00 – 0,10 m, atividade respiratória microbiana (ARM), carbono da biomassa microbiana (CBM), carbono orgânico total (COT) e quociente metabólico (qCO_2), após o pousio do capim Piatã, em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2023/2024

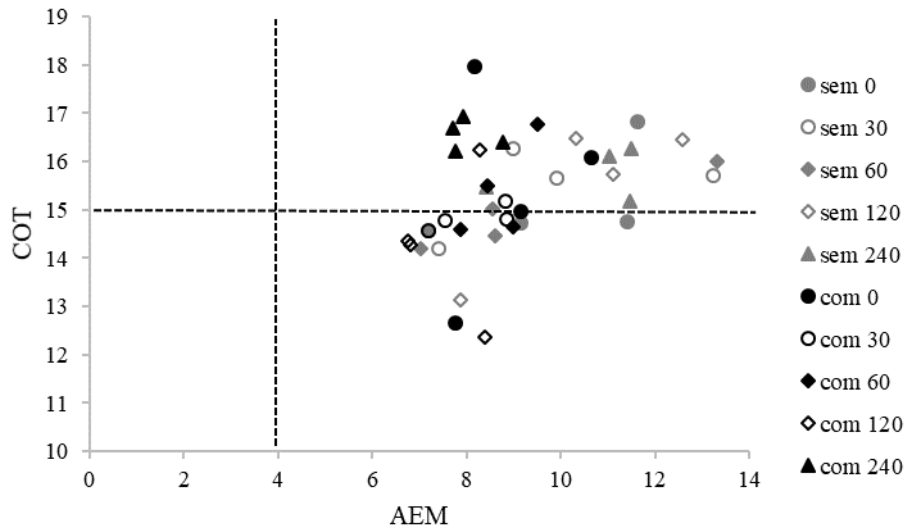
Tratamento	ARM	CBM	COT	qCO_2
	mg CO_2 g ⁻¹ dia ¹	mg C g ⁻¹	g kg ¹	μg C- CO_2 μg ⁻¹ CBM dia ⁻¹
Doses de P_2O_5 (kg ha ⁻¹) (P)				
0	0,71	0,24	15	2,9
30	0,62	0,28	15	2,2
60	0,50	0,30	15	1,7
120	0,60	0,31	15	1,9
240	0,75	0,28	16	2,7
Inoculação (I)				
Com	0,56b	0,28	15	2,0b
Sem	0,72a	0,28	15	2,6a
Teste t - P	0,538 ^{ns}	0,080 ^{ns}	0,273 ^{ns}	0,341 ^{ns}
Teste t - I	0,000 ^{**}	0,821 ^{ns}	0,872 ^{ns}	0,008 ^{**}
Teste t - PxI	0,082 ^{ns}	0,246 ^{ns}	0,468 ^{ns}	0,141 ^{ns}
CV%	11,39	10,23	7,71	16,03

Médias seguidas por letras diferentes na coluna, para tratamentos distintos, diferem entre si pelo Teste t (LSD) a 5% de probabilidade. ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo Teste t (LSD), respectivamente. ^{ns} não significativo. Em que: CV: coeficiente de variação.

Fonte: elaboração da própria autora.

Na Figura 12 é possível verificar as tendências para carbono no solo dentro dos tratamentos adotados na pesquisa, onde nota-se que tanto para o fator inoculação, quanto para o residual das doses de P_2O_5 propoacionaram teores elevados e estáveis com base no COT e AEM.

Figura 12 – Tendências de carbono no solo (atividade enzimática específica média (AEM) versus carbono orgânico total (COT)) em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2023/2024

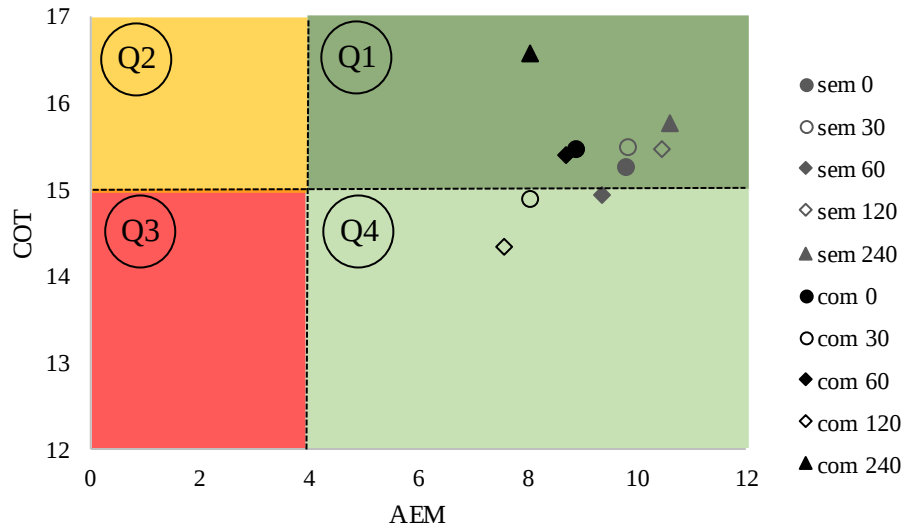


$AEM = ((\beta G / COT) + (AS / COT)) / 2$. Em que: βG : β -glicosidase, AS: arilsulfatase, COT: carbono orgânico total e AEM: atividade enzimática específica média. Em que: sem: área sem inoculação, com: área com inoculação e 0, 30, 60, 120, 240: doses de fósforo em quilogramas por hectare.

Fonte: adaptado Chaer, *et al.* (2023).

Ainda em análises das tendências de carbono no solo nas parcelas experimentais, nota-se com as médias do COT e AEM dos tratamentos que, tanto para o fator inoculação, quanto para o residual das doses de P_2O_5 , ambos estão com valores dentro dos quadrantes 1 (Q1) e quadrante 4 (Q4) que correspondem, respectivamente, em solo saudável e solo em recuperação (Figura 13).

Figura 13 – Saúde do solo, por médias das tendências de carbono no solo em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2023/2024



COT: carbono orgânico total, AEM: atividade enzimática específica média, Q1: solo saudável, Q2: solo adoecendo, Q3: solo doente, Q4: solo em recuperação. Em que: sem: área sem inoculação, com: área com inoculação e 0, 30, 60, 120, 240: doses de fósforo em quilogramas por hectare.

Fonte: adaptado Chaer, *et al.* (2023).

A produtividade de matéria seca do capim Piatã em pousio após a colheita do consórcio, não houve interação entre os fatores, também não expressou diferença significativa individualmente para o residual das doses de fósforo e para a inoculação das gramíneas produtoras de grãos antecessoras na rotação (Tabela 22).

Tabela 22 – Médias dos valores para matéria verde (MV) e matéria seca (MS) do capim Piatã em pousio após a colheita do sorgo granífero em consórcio, em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2023

Tratamento	MV	MS
	----- kg ha ⁻¹ -----	
Doses de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹) (P)		
0	15962	5562
30	17156	6150
60	15553	5515
120	13928	5029
240	15020	5123
Inoculação (I)		
Com	14806	5176
Sem	16242	5776
Teste t - P	0,441 ^{ns}	0,388 ^{ns}
Teste t - I	0,195 ^{ns}	0,128 ^{ns}
Teste t - PxI	0,791 ^{ns}	0,277 ^{ns}
CV%	22,06	22,15

Médias seguidas por letras diferentes na coluna, para tratamentos distintos, diferem entre si pelo Teste t (LSD) a 5% de probabilidade. ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo Teste t (LSD), respectivamente. ^{ns} não significativo. Em que: CV: coeficiente de variação.

Fonte: elaboração da própria autora.

A produtividade de matéria seca total do sistema, durante a condução da pesquisa, não expressou interação entre o residual da adubação fosfatada e a inoculação, assim como para o residual da adubação de forma isolada, entretanto, quanto a inoculação, obteve-se maior produtividade nas áreas sem a inoculação das gramíneas produtoras de grãos antecessoras na rotação (Tabela 23). As parcelas que tiveram as gramíneas inoculadas na rotação de culturas, apresentaram a MS total menor em 9,1% que nas parcelas não inoculadas.

Tabela 23 – Médias dos valores de produção de matéria seca (MS) do capim Paiaguás, capim Piatã 1º corte, capim Piatã 2º corte e do sorgo (colmo, panícula e folhas), em área sob sistema plantio direto, por efeito do residual da adubação fosfatada e inoculação das gramíneas antecessoras por *A. brasilense*. Selvíria/MS, 2021/2023

Tratamento	MS
	--- kg ha ⁻¹ ---
Doses de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹) (P)	
0	16193
30	18222
60	17245
120	17204
240	18143
Inoculação (I)	
Com	16575b
Sem	18227a
Teste t - P	0,183 ^{ns}
Teste t - I	0,007 ^{**}
Teste t - PxI	0,329 ^{ns}
CV%	10,43

Médias seguidas por letras diferentes na coluna, para tratamentos distintos, diferem entre si pelo Teste t (LSD) a 5% de probabilidade. ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo Teste t (LSD), respectivamente. ^{ns} não significativo. Em que: CV: coeficiente de variação.

Fonte: elaboração da própria autora.

Em suma, a inoculação diminui o aporte de nutrientes nas camadas do solo, não proporcionou diferenças na produção de matéria seca do capim Paiaguás e na produtividade de grãos da soja, porém aumentou a produtividade de grãos e de matéria seca da panícula na cultura do sorgo em consórcio com o capim Piatã, este que por sua vez teve sua produção de matéria seca reduzida nas áreas inoculadas, onde também teve menor teor de P lábil no solo, assim como para a atividade das enzimas arilsulfatase e β-glicosidase, e também para os atributos biológicos da atividade respiratória microbiana e do quociente metabólico. Por fim, a inoculação das gramíneas produtoras de grãos também proporcionou menor produção de matéria seca total durante a condução da pesquisa.

O residual das doses de P₂O₅ resultaram no acréscimo da concentração deste nutriente no solo, de acordo com o aumento da dose residual, entretanto, também não surtiu diferença na produção de matéria seca do capim Paiaguás, assim como para a produtividade de grãos da cultura da soja e da cultura do sorgo. Entretanto, para a produtividade de matéria seca do capim Piatã houve maior produtividade com as maiores doses residuais de P₂O₅, assim como para os

teores de P lábil, P moderadamente lábil e P inorgânico, Para as atividades enzimáticas e atributos biológicos do solo, as doses residuais de fósforo no solo não resultaram em diferenças significativas.

Contudo, observa-se que tecnologias e manejos como estes apresentados na presente pesquisa, podem contribuir para práticas agrícolas mais resilientes e sustentáveis, com o aumento da produtividade e diminuição da pressão sobre as áreas de produção. Isso é importante considerando cenários futuros, em que haverá aumento na demanda mundial por alimentos e produtos advindos da agropecuária, em um sistema agrícola altamente dependente de fertilizantes.

5 DISCUSSÃO

O pH do solo, de forma isolada, é o fator que mais interfere na disponibilidade de P no solo, pois valores próximo a 6,5 é o que promove a maior disponibilidade deste nutriente na solução do solo. A presença de outros íons no solo também pode apresentar interferência na absorção do P, o Mg por exemplo, possui efeito sinérgico para a absorção do P, visto que o Mg funciona como carregador para o P, isso pela ativação da ATPase nas membranas e também pela geração de ATP na fotossíntese e respiração (Malavolta, 1980).

Este efeito do pH auxília na interpretação dos resultados da baixa disponibilidade de P (média de 8 mg dm^{-3}) nas análises de fertilidade do solo na atual pesquisa (Tabelas 1, 2, 13 e 17), pois a os valores de pH ficaram próximos à 5,2. Em contrapartida, os valores para Mg estão altos (média de $15 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), o que pode ter aumentado a absorção de P pelas culturas, imobilizando temporariamente o elemento na massa vegetal.

Isso porque em sistemas integrados de produção, o aporte de material orgânico no solo é maior que em sistemas convencionais, o que está intimamente ligado à população de microrganismos no solo, componente este de suma importância nas transformações da matéria orgânica, pois estes utilizam a palhada como fonte de energia e nutrientes para a formação e o desenvolvimento celular, fazendo assim, com que ocorra a imobilização temporária de carbono, nitrogênio, cálcio, magnésio, fósforo, enxofre e micronutrientes, os quais após a morte dos microrganismos, serão disponibilizados novamente para as plantas (Chaves *et al.*, 2022), dessa forma, respalda-se também as menores médias de P, Ca, Mg e consequentemente de SB e V% observadas nas áreas inoculadas da pesquisa.

Ainda no processo de decomposição e mineralização da matéria orgânica do solo há a liberação de íons H^+ , ácidos orgânicos e S, resultando em maior acidez no solo (Barrera, 2020), esclarecendo as médias mais elevadas para a acidez potencial e do enxofre nas áreas inoculadas. Também deve ser salientado que, a produção de matéria seca (palhada) foi maior na área inoculada durante todo o período de rotação de culturas anterior a esta pesquisa (Dickmann *et al.*, 2022), o que no processo de decomposição aumentou a acidez do solo nestas áreas, e pela maior produtividade de grãos, a exportação de nutrientes também foi maior, o que explica os menores teores de nutrientes no solo destas áreas inoculadas por *A. brasilense*.

Estudos que avaliaram a relação de doses de fósforo ($52,32$ e $4,36 \text{ mg dm}^{-3}$ de P), realizado em vaso, sem adubação de manutenção, em Neossolo Quartzarênico, quanto ao desenvolvimento do sistema radicular de plantas do gênero *Urochloa*, constataram que doses mais elevadas do nutriente resultam em incremento médio de 172,5% na massa de raízes

(Almeida *et al.*, 2019). Assim como em experimento realizado em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, onde testou-se doses de fósforo (0,0; 277,5; 555,0; 832,5 e 1.110,0 kg ha⁻¹ de superfosfato simples) para a produtividade de matéria seca do milho houve maior produção nas doses mais elevadas (Cabral *et al.*, 2020). Esse maior desenvolvimento e produção das culturas com o fornecimento de maiores doses de fósforo é proporcionado pelo crescimento radicular mais eficiente, elevando o aporte de água e nutrientes devido a maior área de solo explorado, resultando em melhor distribuição de fósforo na planta, podendo ser translocado e armazenado em raízes mais superficiais e parte aérea (Flores *et al.*, 2008).

Nesse contexto, o incremento de P no solo gera maior produtividade de matéria seca das culturas, com destaque para pastagens em razão da sua dependência por este nutriente para maior perfilhamento e desenvolvimento radicular (Cecato *et al.*, 2008). Entretanto, na presente pesquisa, não houve diferença significativa de produtividade entre a testemunha (0 kg ha⁻¹) e a maior dose residual (240 kg ha⁻¹) (Tabelas 3 e 22), o que pode ser atribuído à área estar há 20 anos em SPD estabilizado, sob rotação de culturas diversificada, com diferentes tipos e tamanhos de raízes além de distintas necessidades nutricionais das plantas que consequentemente eleva a eficiência na ciclagem de nutrientes, os quais são absorvidos em diferentes profundidades do solo, acumulados no tecido vegetal e redepositados no solo após mineralização do material, sendo assim capazes de suprir a necessidade da cultura por fósforo (Pereira *et al.*, 2010).

A bactéria *A. brasilense* coloniza o interior e a superfície das raízes, denominados diazotrofos endofíticos facultativos e além de fixar nitrogênio, pode também auxiliar no desenvolvimento da planta, pela solubilização do fosfato, produção de fitormônios promotores de crescimento (auxinas, giberelina e citocinina) e, estimular o metabolismo das raízes (Freitas *et al.*, 2019). Esse microrganismo beneficia as gramíneas auxiliando, principalmente, no desenvolvimento radicular, que por consequência favorece o aproveitamento da superfície de contato do solo para absorção de água e nutrientes (Nakao *et al.*, 2018). Isso reforça os resultados encontrados em pesquisa que ao usarem *A. brasilense* favoreceram o desenvolvimento das plantas de *Cynodon* (Croastcross) durante o verão do segundo ano de produção, após um ano de sua utilização (Aguirre *et al.*, 2018). Entretanto, para o atual experimento, a ausência ou presença da bactéria *A. brasilense* não resultou em diferença significativa quanto a produtividade do capim Paiaguás (Tabela 3), sendo este efeito, possível resultado do grande aporte de resíduos vegetais pós colheita, gerado pelo longo período de adoção do sistema plantio direto. Isso porque este material orgânico em abundância no solo,

disponibiliza nutrientes suficientes para um adequado desenvolvimento da cultura (Bettiol *et al.*, 2023).

A deficiência de fósforo resulta em baixa produtividade e porte reduzido das plantas, e em se tratando da soja, o mesmo reduz o potencial da espécie nos estádios iniciais reprodutivos, pela redução de produção e maior abortamento de flores (Genari *et al.*, 2021), entretanto, na atual pesquisa não houve diferença na produtividade de grãos nas parcelas com os diferentes residuais da adubação (Tabela 4).

No trabalho de Silva *et al.*, (2015), a adubação fosfatada proporcionou ajuste quadrático para a produtividade da soja, sendo crescente produtivamente em doses mais baixas e com queda nas maiores doses de P_2O_5 , corroborando em parte, com os resultados do presente experimento, onde mesmo sem ajuste de regressão, observou-se também esse mesmo comportamento por efeito do residual das doses de P_2O_5 . Em condições de excesso desse nutriente, há efeito atenuante do P sobre a absorção de micronutrientes catiônicos pelas plantas, em especial o zinco (Zn), mas também o cobre (Cu), ferro (Fe) e manganês (Mn). A utilização do P em excesso também pode diminuir a fixação de CO_2 e a síntese de amido (Marschner, 1997), sendo esse desequilíbrio na absorção de outros nutrientes a possível razão pela diminuição dos atributos morfológicos e de produtividade das culturas na maior dose residual ($240 \text{ kg ha}^{-1} P_2O_5$).

Contudo, em condições de deficiência de P, as plantas expressam maior acúmulo de açúcares, uma forma de energia química potencial, entretanto, ao mesmo tempo as plantas sofrem com falta de energia (ATP), comprometendo os processos de biossíntese da planta, com decréscimo na síntese de RNA, amido e lipídios, desencadeando deficiência proteica acentuado acúmulo de compostos nitrogenados solúveis, diminuindo o desenvolvimento vegetativo das plantas. O P também atua como regulador da fotossíntese e de metabolismos de carboidratos, atenuando a limitação no desenvolvimento da planta (Prado, 2008), indicando que a cultura da soja não sofreu deficiência do nutriente durante seu desenvolvimento, visto que houve uma produtividade uniforme dentre os tratamentos de P_2O_5 residual.

Em outro estudo realizado testando o efeito de doses de fósforo (40, 80, 120 e 160 kg ha^{-1} de P_2O_5) aplicadas à lanço, no desenvolvimento e produtividade da soja, constatou-se que não houve diferenças significativas entre os tratamentos sobre a produtividade de grãos da soja (Benedet, 2021). Entretanto, esses resultados justificam-se pelas condições climáticas não favoráveis durante a condução da referida pesquisa.

A bactéria *Azospirillum brasilense*, possui capacidade de fixação biológica de nitrogênio (FBN) modesta comparada à do *Bradyrhizobium*, porém, o principal processo

microbiano do *Azospirillum* está ligado na produção de fitormônios que promovem o crescimento vegetal, sobretudo do sistema radicular, favorecendo a nodulação e a FBN realizada pelo *Bradyrhizobium*, além de outros benefícios, como o aumento do volume de raízes, o que amplia a superfície de contato destas no solo. Assim, as plantas de soja coinoculadas indiretamente com *Bradyrhizobium* nas sementes e *Azospirillum* no solo (efeito residual das gramíneas antecessoras da rotação) proporcionam maior e antecipada nodulação (Hungria *et al.*, 2015), com média de acréscimo na produtividade de 16% (Hungria *et al.*, 2013).

Em estudo conduzido por Barbosa *et al.* (2021), reporta-se também que a coinoculação com *Bradyrhizobium* sp. e *A. Azospirillum* na soja promoveu aumento de 11% na massa seca de raízes, 5,4% no número de nódulos, 10,6% na massa seca de nódulos e 3,2% na produtividade de grãos, em comparação com a inoculação convencional com *Bradyrhizobium* sp.

Todavia, os resultados obtidos na presente pesquisa, sem diferenças significativas na produtividade das áreas inoculadas e não inoculadas, possivelmente são explicados também pelas condições químicas favoráveis do solo, resultado do manejo empregado na área, adoção do sistema plantio direto e rotação de diferentes espécies vegetais, que também resultam na formação de bioporos, sendo reaproveitados pelas culturas implantadas em sucessão, ocasionando em menor gasto energético para a planta em seu desenvolvimento radicular (Oliveira, 2021), além de possibilitar maior aprofundamento de raízes, convertendo-se em maior volume de solo explorado, proporcionando adequada nutrição e produção da cultura.

Com todo o exposto, infere-se que a não existência de diferença entre os tratamentos pode ser atribuída a alta quantidade e qualidade de material orgânico na área, advindo de SPD consolidado sob manejo integrado de produção agropecuária, pois o equilíbrio químico e biológico proporcionado por estes, fez com que as condições do solo fossem estabilizadas e com isso os efeitos dos tratamentos fossem pouco pronunciados.

Pelo fato que até 80% do P total nos solos ser oriundo dos resíduos vegetais remanescentes (palhada) e da biomassa microbiana, que após serem decompostos pela microbiota do solo, converte o P orgânico em P mineral pela mineralização (Romagnoli; Andreote, 2016), torna-se este, a provável razão pelo qual a produtividade do sorgo não apresentou diferenças significativas referentes às doses residuais de P_2O_5 no presente trabalho (Tabela 7), isso devido ao P absorvido pelas culturas da rotação e o acúmulo de grande volume de material vegetal, que ao decorrer de sua decomposição disponibiliza o P necessário para o pleno desenvolvimento da cultura.

Além da disponibilização de nutrientes, a MOS pode reter maior massa de água do que a sua própria massa, o que significa que pequenos incrementos de MOS podem significar ganhos expressivos na quantidade de água disponível para a cultura, auxiliando na tolerância a períodos de estresse hídrico. Tanto a maior retenção e disponibilidade de água, em função do conteúdo orgânico, quanto a menor densidade do solo, que permite o aprofundamento do sistema radicular, favorecem a capacidade da cultura em superar períodos secos, com menor comprometimento da colheita (Bettiol *et al.*, 2023). Visto que nessa pesquisa houve pouca precipitação durante a condução desse consórcio (Figura 1), o pouco comprometimento da produtividade pode ser também atribuída a quantidade e qualidade da MOS.

A inoculação por *A. brasilense* também tem efeitos positivos quanto a tolerância à seca, pois ela melhora as características morfológicas da planta, como ramificação de raízes, aumento de biomassa radicular e aumento da densidade de pelos radiculares, resultando na melhor exploração do perfil do solo em busca de água, além da FBN e produção de fitormônios (Hungria, 2011). Todos esses fatores resultaram em uma maior produtividade de grãos de sorgo e matéria seca de panícula, entretanto, para a produção do capim Piatã em consórcio observou-se decréscimo nas áreas inoculadas, isso pela provável competição entre as culturas, visto que apenas o sorgo foi inoculado, tendo este se sobressaído à forrageira.

Em contrapartida, o residual das doses de fósforo proporcionou aumento de produção para o capim Piatã. O P é um nutriente limitante para atingir maior produtividade, e segundo a lei do mínimo de Liebig, para pastagens esse efeito é ainda mais evidente, pois a deficiência deste macronutriente resulta em menor desenvolvimento das raízes, tornando as plantas menos tolerantes à seca e com menor possibilidade de absorção de nutrientes do solo, resultando em uma menor taxa de perfilhamento, consequentemente reduzida produção de massa de forragem (Soares *et al.*, 2001).

O aumento da concentração de P no solo pode ocorrer tanto pela adubação mineral, disponibilizando imediatamente o nutriente para a cultura, quanto de forma orgânica, onde o P só se tornará disponível após a ação de microrganismos, que após mineralizarem a matéria orgânica (MOS), liberam os íons fosfato inorgânico (P disponível) (Richardson; Simpson, 2011), portanto, em áreas com maior volume de material orgânico e de MOS, naturalmente, terão maiores níveis de P lábil, corroborando com o resultado obtido na pesquisa, onde na área sem a inoculação, onde teve maior produção de matéria seca (Tabela 23) teve teor 32,5% maior da fração lábil do P no solo (Tabela 19).

As plantas absorvem apenas o P presente na solução do solo, onde a forma iônica deste pode ser o H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} e PO_4^{3-} predominando em solos brasileiros a primeira forma iônica

apresentada, devido ao baixo pH dos solos (Prado, 2008). Quanto maior a disponibilidade do nutriente, maior a absorção pela planta, e em áreas inoculadas por *A. brasilense*, devido ao maior volume radicular, a absorção e a imobilização temporária dos nutrientes no corpo vegetal também é mais elevada, esclarecendo o menor conteúdo de P lábil nas áreas inoculadas da pesquisa.

O processo de mineralização de P orgânico em P inorgânico está relacionada com as enzimas microbianas e vegetais envolvidas nesse processo de ciclagem, que atuam sobre a matéria orgânica do solo. No entanto, existe uma dinâmica entre a mineralização e a imobilização do P pelos microrganismos (P da biomassa microbiana), o que os torna fonte e por vezes dreno de P de rápida ciclagem (Richardson; Simpson, 2011). Este efeito pode ser observado na relação entre a maior atividade das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase (Tabela 20) nas áreas sem a inoculação, devido ao maior volume de MS (Tabela 23), resultando na maior quantidade de P lábil nas áreas não inoculadas e no desdobramento da fração lábil, moderadamente lábil (Figura 10) e do P inorgânico (Figura 11), indicando que o maior volume de MS, resulta na maior atividade enzimática, implicando na maior disponibilidade das frações de P supracitadas, enquanto que nas parcelas inoculadas, com maior estabilidade, essa atividade enzimática foi menor, e sem efeito no fracionamento de P existente da degradação anterior do material orgânico da área.

O P da biomassa microbiana (P-mic), constitui uma fração muito variável de Po do solo, a qual representa, em média, de 1 a 10% do P total, e de 2 a 24% do Po. Muitas formas de Po encontradas no solo, como fosfolipídios e ácidos nucleicos, são de origem microbiana (Kaschuk *et al.*, 2010). Porém, mesmo que o P-mic não está prontamente disponível para as plantas, este é um reservatório dinâmico do P nos solos tropicais pela importância na decomposição acelerada da MOS. Assim, quanto mais pobre em P disponível for o sistema, maior é a dependência das formas orgânicas, sobretudo do P armazenado na biomassa microbiana que absorve e imobiliza P da solução do solo e o libera gradativamente (Gatiboni *et al.*, 2008). Ressaltando a importância que a MOS representou para a uniformidade da produção das culturas na rotação da presente pesquisa, nas áreas com as culturas não inoculadas por *A. brasilense*, para a melhor exploração do solo, e consequente maior absorção de P, o maior aporte de material orgânico foi o propulsor no fornecimento do nutriente em quantidades adequadas para o desenvolvimento (desdobramentos das Figuras 10 e 11), enquanto que nas áreas inoculadas, pelo efeito hormonal da *A. brasilense* (Orozco-Mosqueda *et al.*, 2021), mesmo com menor aporte de MS total, o maior crescimento de raízes e melhor exploração do solo, nutriu adequadamente as culturas da rotação.

A taxa de imobilização de P vai depender da qualidade do resíduo em decomposição e da disponibilidade de carbono e nitrogênio no solo. Se a concentração de P no resíduo exceder à demanda celular observa-se um aumento de Pi disponível através da mineralização (Bini; Lopez, 2016), corroborando com o aumento exponencial do Pi nas áreas com as doses residuais mais altas (240 kg ha^{-1} de P_2O_5) (Tabela 19) e nas áreas sem a inoculação (Figura 11), lembrando que estas proporcionaram maior produtividade de MS total (Tabela 23). Por outro lado, se este resíduo apresentar concentrações de P abaixo dos valores requeridos para a construção da biomassa microbiana, este deve ser suprido pelo Pi disponível na solução do solo, o que vai empobrecer a solução do solo em P (Bini; Lopez, 2016), indicando que não houve deficiência de P na área experimental, independente dos tratamentos, pois a cultura obteve a quantidade adequada de P para seu desenvolvimento e produção, seja pela maior eficiência de absorção do P por conta dos efeitos da inoculação (área inoculada), seja pelo maior volume de MS das áreas não inoculadas.

A produção das fosfatases é resultado de modificações bioquímicas a nível celular, desencadeadas primordialmente pela diminuição da absorção de P pelos microrganismos, o que explica o aumento da sua atividade no solo quando os sistemas têm baixos teores de P disponível (Conte, 2001), indicando dessa forma, que não houve deficiência do elemento para a microbiota do solo na atual pesquisa. Visto que cerca de 30 a 50% dos isolados de microrganismos do solo apresentam atividade de fosfatase. Por exemplo, bactérias fixadoras de N, como os rizóbios do feijão, apresentam grande capacidade de produzir fosfatases, quando em condições de deficiência de P, a fim de manter altas concentrações de P nos nódulos em virtude da alta necessidade desse nutriente para a fixação biológica de nitrogênio (Araújo *et al.*, 2008).

Quanto a atividade das enzimas arilsulfatase (AS) e β -glicosedase (β G), nas áreas sem inoculação foram mais ativas, esse comportamento pode ser devido ao maior teor de MOS nessas parcelas já citado anteriormente, aumentando o volume e diversidade da microbiota do solo, porém há a hipótese de competição entre os microrganismos nativos do solo e o introduzido via inoculação. Basicamente existem dois fatores que são reconhecidos como as principais causas de redução ou extinção de espécies, sendo estas a perda de habitat original e a introdução de espécies invasoras. No primeiro caso, de perda de habitat, a alta complexidade da estrutura e composição do solo acaba promovendo uma proteção considerável à microbiota do solo, já no segundo caso, a introdução de espécies, está mais associado as práticas agrícolas, pois a utilização de insumos orgânicos e inorgânicos, o manejo do solo e a introdução de espécies vegetais podem incorporar novas espécies microbianas (Tscharrntke *et al.*, 2012).

Os microrganismos em solos em recuperação apresentam interações mais complexas que em áreas degradadas, inferindo-se uma maior estabilidade e resiliência ambiental em solos recuperados (Pereira *et al.*, 2022), demonstrando que a menor atividade enzimática nas áreas inoculadas podem também apontar a estabilização e equilíbrio dos componentes físicos, químicos e biológicos das parcelas.

A determinação das atividades enzimáticas fornece informações preciosas sobre a saúde do solo, isso devido ao fato de que a atividade das enzimas são alteradas pelo estoque de carbono do solo e pelas mudanças de seu uso (Mello *et al.*, 2014). Com isso, considerando um gráfico de dispersão contendo a relação entre a atividade enzimática e o COT torna possível definir quatro estados de saúde do solo, representados em quatro quadrantes distintos (Chaer *et al.*, 2023). Avaliando-se a Figura 13, verifica-se que a área experimental está em sua maioria no quadrante 1 (Q1), representando solos de alta qualidade, indicando que a adoção de boas práticas de manejo por um longo período traz bons resultados na recuperação, equilíbrio e resiliência do solo.

A Atividade Respiratória Microbiana (ARM) é definida como a soma total de todas as funções metabólicas nas quais o CO₂ é produzido. Bactérias e fungos são os principais responsáveis pela liberação de CO₂ via degradação da matéria orgânica do solo (MOS). A ARM possui estreita relação com as condições abióticas do solo, entre elas a umidade, temperatura, aeração (Silva; Azevedo; De-Polli, 2007) e disponibilidade de substrato no solo (MOS), estes também influenciam o Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) (Cattelan; Vidor, 1990). Devido ao grande volume MS da área experimental geral (Tabela 23), o conteúdo de MOS na camada de 0,00 – 0,10 m estão em níveis medianos, com média de 28 g dm⁻³ (Tabela 13), com isso houve uma estabilização do COT e do CBM nas parcelas experimentais (Tabela 21).

A ARM em associação com o CBM torna possível obter o Quociente Metabólico (qCO₂), pela razão entre a ARM por unidade de CBM e tempo, usado para estimar a eficiência do uso de substrato pelos microrganismos do solo, sendo este utilizado como um sensível indicador de estresse quando o CBM é afetado, sendo ambas as ferramentas importantes no entendimento das transformações e perdas nos compartimentos orgânicos do solo (Anderson; Domsch, 1993).

Com tudo, ao analisar a ARM juntamente com os outros indicadores de qualidade do solo (Tabela 21), observa-se maior ARM nas parcelas que não receberam inoculação com *A. brasilense*, o que caracterizaria um sistema com maior perda de CO₂ pela maior atividade de microrganismos, como também houve estabilidade do CBM e do COT entre as áreas inoculadas e não inoculadas, e queda no quociente metabólico da área inoculada, indica menor perda de

CO₂, resultado este interessante em processos metabólicos de ciclagem de nutrientes e sequestro de carbono no solo.

6 CONCLUSÕES

Após 20 anos sob sistema conservacionista de produção, adotando práticas que levam em consideração a saúde e qualidade do solo, pelo equilíbrio químico e biológico, houve efeito apenas da inoculação com *A. brasilense*, que devido a maior exportação de matéria seca (MS) e nutrientes, as áreas inoculadas tiveram piora da fertilidade, e menor produção total de MS, mas com ganho na saúde do solo. Para as demais culturas não houve efeito da inoculação, assim como para a adubação fosfatada residual na produtividade das culturas da rotação.

As áreas sem inoculação por *A. brasilense*, embora com maior aporte de palha teve comportamento da atividade enzimática e microbiana na degradação do material orgânico que culminou em maior quociente metabólico, indicando perda de CO₂ e menor sequestro de carbono.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, A. T. E.; GONÇALVES, C.; PATERNIANI, M. E. A. G. Z.; TUCCI, M. L. S'A.; CASTRO, C. E. F. **Instruções Agrícolas para as Principais Culturas Econômicas**. Campinas, ed. 7, 2014. (IAC. Boletim Técnico, 200).
- AGUIRRE, P. F.; OLIVO, C. J.; RODRIGUES, P. F.; FALK, D. R.; ADAMS, C. B.; SCHIAFINO, H. P. Forage yield of Coastcross-1 pastures inoculated with *Azospirillum brasilense*. **Acta Scientiarum: Animal Sciences**. Santa Maria, v. 40, n. 1, p. 1 – 8, 2018. DOI: 10.4025/actascianimsci.v40i1.36392.
- ALMEIDA, E. M.; MONTAGNER, D. B.; ARAUJO, A. R.; MACEDO, M. C. M.; FERREIRA, D. P.; DIFANTE, G. F.; SCARIOT, C. **Massa de raízes de forrageiras submetidas a doses de fósforo e nitrogênio em Neossolo Quartzarênico órtico da região de Campo Grande-MS**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. Campo Grande, 2019. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1117893/1/Massaderaizesdeforrageiras.pdf>. Acesso em: 13/05/2023.
- ALMEIDA, L. L. S.; FRAZÃO, L. A.; LESSA, T. A. M.; FERNANDES, L. A.; VELOSO A. L. C.; LANA, A. M. Q.; SOUZA, I. A.; PEGORARO, R. F.; FERREIRA, E. A. Soil carbon and nitrogen stocks and the quality of soil organic matter under silvopastoral systems in the Brazilian Cerrado. **Soil and Tillage Research**. [S. l.], v. 205, p. 104 – 785, 2021. DOI: 10.1016/j.still.2020.104785
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Piracicaba, v. 22, n. 6, p. 711 – 728, 2014. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507
- ALVES, E. A. C.; SAMPAIO, P. V.; LEMOS, L. S.; PASSOS, M. M. Soil Degradation: environmental impacts and analysis methodologies. **Territorium Terram**. [S. l.], v. 6, n. 8, p. 28 – 45, 2023. Disponível em: http://seer.ufsj.edu.br/territorium_terram/article/view/5244/3093. Acesso em: 21/01/2024.
- ANDERSON, J. P. E.; PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, D. R. Soil Respiration. In: Page, A. L., Ed., **Methods of Soil Analysis** [S. l.], Part 2, 2nd Edition, ASA and SSSA, Madison, 831 – 871, 1982.
- 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**. Braunschweig, v. 25, n. 3, p. 393 – 395, 1993.
- ANJOS, M. M.; PAZDIORA, R. D.; ANDRADE, E. R.; VIEIRA, A. S.; BARBOZA, B. N.; TURCANO, C. S.; ALVES, C. D.; MACHADO, P. C. Integrated agricultural production systems and the effects of the animal component. **Research, Society and Development**. [S. l.] v. 10, n. 16, p. 1 – 15, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i16.24014

ARAUJO, A. P.; PLASSARD, C.; DREVON, J. J. Phosphatase and phytase activities in nodules of common bean genotypes at different levels of phosphorus supply. **Plant and Soil**. [S. l.], v. 312, p. 129 – 138, 2008.

ARCHANA, G.; BUCH, A.; KUMAR, G. N. Pivotal role of organic acid secretion by rhizobacteria in plant growth promotion. In.: SATYANARAYANA, T., JOHRI, B. N., ANIL P. Microorganisms in sustainable agriculture and biotechnology. **Springer**. [S. l.], p. 35 – 53, 2012.

BALBINO, L.C.; BARCELLOS, A.O.; STONE, L.F. (Ed.). **Marco referencial: integração lavoura-pecuária-floresta**. Embrapa. Brasília, ed. 1, 2011.

BALESDENT, J.; BASILE-DOELSCH, I.; CHADOEUF, J.; CORNU, S.; DERRIEN, D.; FEKIAKOVA, Z.; HATTÉ, C. Atmosphere–soil carbon transfer as a function of soil depth. **Nature**. [S. l.], v. 559, p. 599 – 602, 2018. DOI: 10.1038/s41586-018-0328-3

BARASSI, C. A.; SUELDO, R. J.; CREUS, C. M.; CARROZZI, L. E.; CASANOVAS, W. M.; PEREYRA, M. A. Potencialidad de *Azospirillum* en optimizar el crecimiento vegetal bajo condiciones adversas. In.: CASSÁN, F. D.; GARCIA DE SALAMONE, I. *Azospirillum* sp.: cell physiology, plant interactions and agronomic research in Argentina. **Revista Argentina de Microbiología**. [S. l.], p. 49 – 59, 2008.

BARBOSA, J. Z.; MARIANGELA, H.; SENA, J. V. S.; POGGERE, G.; REIS, A. R.; CORRÊA, R. S. Meta-analysis reveals benefits of co-inoculation of soybean with *Azospirillum brasilense* and *Bradyrhizobium* spp. in Brazil. **Applied Soil Ecology**. [S. l.], v. 163, p. 103 – 913, 2021. DOI: 10.1016/j.apsoil.2021.103913

BARDGETT, R.; FREEMAN, C.; OSTLE, N. Microbial contributions to climate change through carbono cycle feedbacks. **ISME Journal**. [S. l.], v. 2, p. 805 – 814, 2008. DOI: 10.1038/ismej.2008.58

BARRERA, G. A. I. **Potencial de liberação de fosfato pela microbiota do solo suprida com diferentes fontes de carbono**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2020.

Disponível em:

<https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/27933/3/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 06/06/2023.

BASHAN, Y.; BUSTILLOS, J. J.; LEYVA, L. A.; HERNANDEZ, J. P.; BACILIO, M. Increase in auxiliary photoprotective photosynthetic pigments in wheat seedlings induced by *Azospirillum brasilense*. **Biology and Fertility of Soils**. [S. l.], v. 42, p. 279 – 285, 2006. DOI: 10.1007/s00374-005-0025-x

BASHAN, Y.; DE-BASHAN, L. E. How the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* promotes plant growth—a critical assessment. **Advances in Agronomy**. [S. l.], v. 108, 77 – 136, 2010. DOI: 10.1016/S0065-2113(10)08002-8.

BASHAN, Y.; HOLGUIN, G.; DE-BASHAN, L. E. *Azospirillum*-plant relations physiological, molecular, agricultural, and environmental advances (1997-2003). **Canadian Journal of Microbiology**. [S. l.], v. 50, p. 521 – 577, 2004. DOI: 10.1139/w04-035

BEGUM, N.; WANG, L.; AHMAD, H.; AKHTAR, K.; ROY, R.; KHAN, M. I.; ZHAO, T. Co-inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and the plant growth-promoting rhizobacteria improve growth and photosynthesis in tobacco under drought stress by up-regulating antioxidant and mineral nutrition metabolism. **Microbial Ecology**. [S. l.], v. 83, n. 4, p. 971 – 988, 2022. DOI: 10.1007/s00248-021-01815-7

BENEDET, G. **Adubação fosfatada para a cultura da soja em solos com concreções**. Universidade Federal do Tocantins. Tocantins, 2021. Disponível em: <https://repositorio.uft.edu.br/bitstream/11612/3130/1/Gustavo%20Benedet..pdf>. Acesso em: 28/08/2023.

BERTOLLO, A. M.; LEVIEN, R. Compactação do solo em Sistema de Plantio Direto na palha. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**. [S. l.], v. 25, p. 208 – 218, 2019.

BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C. A. Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. **Embrapa Meio Ambiente**. [S. l.], 2023. Disponível em: <http://cadernos.aba-agroecologia.org.br/cadernos/article/view/3739>. Acesso em: 27/03/2023

BHATTACHARYYA, P. N.; JHA, D. K. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in agriculture. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**. [S. l.], v. 28, n. 4, p. 50 – 1327, 2012. DOI: 10.1016/S0065-2113(10)08002-8

BIELUCZYK, W.; PICCOLO, M. C.; PEREIRA, M. G.; MORAES, M. T.; SOLTANGHEISI, A.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; MOREIRA, M. Z.; CAMARGO, P. B.; DIAS, C. T.; BATISTA, I.; CHERUBIN, M. R.; Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil, **Geoderma**. [S. l.], v. 371, 2020. 10.1016/j.geoderma.2020.114368

BINI, D.; LOPEZ, M. V. Transformações Microbianas do Fósforo. In.: CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do Solo**. Piracicaba, ed. 2. cap. 10. 2016.

BINI, D.; LOPEZ, M. V.; CARDOSO, E. J. B. N. Metabolismo Microbiano. In.: CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do Solo**. Piracicaba, ed. 2. cap. 5. 2016.

BRANCO, L. H. Z.; ALMEIDA, G. C. Crostas biológicas de solo: conceitos, diversidade, e importância na proteção e recuperação de áreas. In.: **Tópicos em Ciência do Solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. [S. l.], v. 12, p. 27 – 53, 2023.

CABRAL, F. L.; BASTOS, A. V. S.; TEIXEIRA, M. B.; SILVA, E. C.; SOARES, F. A. L.; SANTOS, L. N. S. Levels of mineral and organomineral phosphorus fertilization in corn culture. **Brasilian Journal of Development**. [S. l.], v. 6, n. 6, p. 36414 – 36426, 2020.

CAMPBELL, M. K. Bioquímica. 3. ed. Tradução de FERREIRA, H. B. **Artes Médicas Sul**. [S. l.], p. 751, 2000.

CARDOSO, E. J. B. N.; VASCONCELLOS, R. L. F.; BINI, D.; MIYAUCH, M. Y. H.; SANTOS, C. A.; ALVES P. R. L.; PAULA, A. M.; NAKATANI, A. S.; PEREIRA, J. M.; NOGUEIRA, M. A. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to

assess the effects of use and management on soil health? **Scientia Agricola**. [S. l.], v. 70, n. 4, p. 274 – 289, 2013.

CARVALHO JUNIOR, W.; CALDERANO FILHO, B.; BHERING, S. B.; PEREIRA, N. R.; CHAGAS, C. S. Distribution of tropical soils: a view according to free data access. **Brazilian Journal of Development**. [S. l.], v. 8, n. 8, p. 54835 – 54848, 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n8-009

CARVALHO, A. C.; CARVALHO, D. F.; CASTRO, A. C. Análise sobre crescimento populacional e transição demográfica: limites e divergências. **Conjecturas**. [S. l.], v. 22, n. 2, p. 845 – 859, 2022. DOI: 10.53660/CONJ-751-C12

CASSÁN, B.; DIAZ-ZORITA, M. *Azospirillum* sp. In current agriculture: from the laboratory to the field. **Soil Biol Biochem**. [S. l.], 2016. DOI: 10.1016/j.soilbio.2016.08.020

CATTELAN, A. J.; VIDOR, C. Flutuações na biomassa, atividade e população microbiana do solo, em função de variações ambientais. **Revista Brasileira de Ciência do solo**. [S. l.], v. 14, n. 2, p. 133 – 142, 1990.

CAVICCHIOLI, R.; RIPPLE, W. J.; TIMMIS, K. N.; AZAM, F.; BAKKEN, L. R.; BAYLIS, M.; WEBSTER, N. S. Scientists' warning to humanity: microorganisms and climate change. **Nature Reviews Microbiology**. [S. l.], v. 17, p. 569 – 586, 2019. DOI: 10.1038/s41579-019-0222-5.

CECATO, U.; SKROBOT, V. D.; FAKIR, G. R.; BRANCO, A. F.; GALBEIRO, S.; GOMES, J. A. N. Perfilhamento e características estruturais do capim-Mombaça, adubado com fontes de fósforo, em pastejo. **Acta Scientiarum**. Animal Sciences. [S. l.], v. 30, n. 1, p. 1 – 7, 2008.

CHAER, G. M.; MENDES, I. C.; DANTAS, O. D.; MALAQUIAS, J. V.; REIS JUNIOR, F. B.; OLIVEIRA, M. I. L. Evaluating C trends in clayey Cerrado oxisols using a four-quadrant model based on specific arylsulfatase and β -glucosidase activities. **Applied Soil Ecology**. [S. l.], v. 183, p. 104 – 742, 2023. DOI: 10.1016/j.apsoil.2022.104742

CHANWAY, C. P.; HYNES, R. K.; NELSON, L. M. Plant growth-promoting rhizobacteria: effects on growth and nitrogen fixation of lentil (*Lens esculenta* Moench) and pea (*Pisum sativum* L.). **Soil Biology and Biochemistry**. [S. l.], p. 511 – 517, 1989. DOI: 10.1016/0038-0717(89)90123-5.

CHAVES, J. S.; SILVA, L. S.; MATOS, S. M.; PEREIRA, H. R.; MELO, J. J. S.; SILVA, A. F.; SANTOS, E. J.; SILVA R. P.; BRITO W. A.; LEITE, J. L. Parâmetros microbiológicos do solo em sistema de produção consorciado sob manejo orgânico. **Research, Society and Development**. [S. l.], v. 11, n.10, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i10.32643

CHERLET, M.; HUTCHINSON, C.; REYNOLDS, J.; HILL, J.; SOMMER, S.; VON MALTITZ, G. World atlas of desertification. rethinking land degradation and sustainable land management. **Publication Office of the European Union**. [S. l.], ed. 3, 2018. DOI: 10.2760/9205

COBAN, O.; DE DEYN, G. B.; PLOEG, M. Soil microbiota as game-changers in restoration of degraded lands. **Science**. [S. l.], 2022. DOI: 10.1126/Science.abe0725

CONCEIÇÃO, P. C.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization. **Soil & Tillage Research**. [S. l.], v. 129, p. 40 – 47, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.01.006>.

CONTE, E. **Atividade de fosfatase ácida e formas de acumulação de fosfato em solo no sistema plantio direto**. 2001. p. 65. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

CORREA, O. S.; ROMERO, A. M.; SORIA, M. A.; DE ESTRADA, M. *Azospirillum brasilense*-plant genotype interactions modify tomato response to bacterial diseases, and root and foliar microbial communities. In: CASSÁN, F. D.; GARCIA DE SALAMONE, I. *Azospirillum* sp.: cell physiology, plant interactions and agronomic research in Argentina. **Asociación Argentina de Microbiología**. [S. l.], p. 87 – 95, 2008.

COTTA, S. R. O Solo como Ambiente para a Vida Microbiana. In: CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do Solo**. [S. l.], ed. 2. cap. 2. 2016.

DEMATTE, J. L. I. **Levantamento detalhado dos solos do "Campus" experimental de Ilha Solteira**, ESALQ-USP. Piracicaba, p. 131, 1980.

DICKMANN, L.; NAKAO, A. H.; MODESTO, V. C.; SANCHES, I. R.; ANDREOTTI, M. Residual da adubação fosfatada e efeito da inoculação com *Azospirillum brasilense* em milho verão consorciado com gramínea em região de cerrado. **Research, Society and Development**. [S. l.], v. 11, n. 3, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i3.26134

FERREIRA, D. F. Sisvar: A computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**. [S. l.], v. 35, n. 6, p. 1039 – 1042, 2011. DOI: 10.1590/S1413-70542011000600001

FLORES, J. P. C.; CASSOL, L. C.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F. Atributos químicos do solo em função da aplicação superficial de calcário em sistema de integração lavoura-pecuária submetido a pressões de pastejo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. [S. l.], v. 32 n. 6, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000600017

FREITAS, P. V. D. X.; TOMAZELLO, D. A.; ISMAR, M. G.; MACIEL, T. T. B. A. F. R. A. A. L. P.; FIRMINO, A. E.; NETO, C. M. S.; FRANÇA, A. F. S. Produção de gramíneas forrageiras inoculadas com *Azospirillum brasilense* associada à adubação nitrogenada. **Revista Científica Rural**. [S. l.], v. 21, 2019. DOI: 10.30945/rcr-v21i2.2707

GALINDO, F. S.; RODRIGUES, W. L.; FERNANDES, G. C.; BOLETA, E. H.; JALAL, A.; ROSA, P. A.; BUZETTI, S.; LAVRES, J.; TEIXEIRA FILHO, M. C. Enhancing agronomic efficiency and maize grain yield with *Azospirillum brasilense* inoculation under Brazilian savannah conditions. **European Journal of Agronomy**. [S. l.], 2022. DOI: 10.1016/j.eja.2022.126471

GALINDO, F. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; BUZETTI, S.; SANTINI, J. M. K.; ALVES, C. J.; NOGUEIRA, L. M.; LUDKIEWICS, M. G. Z.; ANDREOTTI, M.; BELLOTE, J. L. M.; Corn yield and foliar diagnosis affected by nitrogen fertilization and inoculation with

Azospirillum brasilense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. [S. l.], 2016. DOI: 10.1590/18096657rbcs20150364

GATIBONI, L. C.; CONDRON, L. M. A rapid fractionation method for assessing key soil phosphorus parameters in agroecosystems. **Geoderma**. [S. l.], v. 385, 2021. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114893

GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; BRUNETTO, G. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatases ácidas durante a diminuição do fósforo disponível no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. [S. l.], v. 43, n. 8, p. 1085 – 1091, 2008. DOI: 10.1590/S0100-204X2008000800019

GENARI, D. A.; PALIN, D.; TAKAHARA, L. H.; FRANCISCO, J. P.; LOPES, A. D. Adubação fosfatada em soja: Potencialidades de diferentes fontes. **Research, Society and Development**. [S. l.], v. 10, n. 5, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i5.14970

GROVER, M.; BODHANKAR, S.; SHARMA, A.; SHARMA, P.; SINGH, J.; NAIN, L. PGPR mediated alterations in root traits: toward sustainable crop production. **Frontiers in Sustainable Food Systems**. [S. l.], 2021. DOI: 10.3389/fsufs.2020.618230

GUNDLAPALLY, S. R.; GARCIA-PICHEL, F. The community and phylogenetic diversity of biological soil crusts in the Colorado Plateau studied by molecular fingerprinting and intensive cultivation. **Microbial Ecology**. [S. l.], 2006. DOI: 10.1007/s00248-006-9011-6

HALLAM, S. J.; MCCUTCHEON, J. P. Microbes don't play solitaire: how cooperation trumps isolation in the microbial world. **Environmental Microbiology Reports**. [S. l.], v. 7, n. 1, p. 26 – 28, 2015. DOI: 10.1111/1758-2229.12248

HERNANDEZ, F. B. T.; LEMOS FILHO, M. A. F.; BUZETTI, S. **Software HIDRISA e o balanço hídrico de Ilha Solteira**. Ilha Solteira: UNESP/FEIS/Área de Hidráulica e Irrigação, 1995.

HERNANI, L. C. **Sistema Plantio Direto**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/sistema-plantio-direto/fundamentos/benefícios>.

HUNGRIA, M. Inoculação com *Azospirillum brasilense*: inovação em rendimento a baixo custo. **Embrapa Soja**. [S. l.], 36 p. 2011. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/29676/1/Inoculacao-com-azospirillum.pdf>. Acesso em: 28/08/2023.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Co-inoculation of soybeans and common beans with rhizobia and *Azospirilla*: strategies to improve sustainability. **Biology and Fertility of Soils**. [S. l.], v. 49, p. 791 – 801, 2013.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Soybean seed co-inoculation with *Bradyrhizobium* spp. and *Azospirillum brasilense*: a new biotechnological tool to improve yield and sustainability. **American Journal of Plant Sciences**. [S. l.], v. 6, p. 811 – 817, 2015. DOI: 10.4236/ajps.2015.66087

JALAL, A.; OLIVEIRA, C. E. S.; GALINDO, F. S.; ROSA, P. A. L. GATO, I. M. B.; LIMA, B. H.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. Regulatory mechanisms of plant growth-promoting rhizobacteria and plant nutrition against abiotic stresses in brassicaceae Family. **Life**. [S. l.], 2023. DOI: 10.3390/life13010211

KALAYU, G. Phosphate solubilizing microorganisms: promising approach as biofertilizers. **Agronomy**. [S. l.], 2019. DOI: 10.1155/2019/4917256

KARLEN, D. L.; MAUSBACH, M. J.; DORAN, J. W. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation (A guest editorial). **Soil Science Society of America Journal**. [S. l.], 1997. DOI: 10.2136/sssaj1997.036159950006100010001x

KASCHUK, G.; ALBERTON, O.; HUNGRIA, M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. **Soil Biology and Biochemistry**. [S. l.], v. 42, n. 1, p. 1 – 13, 2010. DOI: 10.1016/j.soilbio.2009.08.020

KLOEPPER, J.W.; SCHROTH, M.N. Relationship of in vitro antibiosis of plant growth-promoting rhizobacteria to plant growth and the displacement of root microflora. **Phytopathology**. [S. l.], v. 71, p. 1020 – 1024, 1981. DOI: 10.1094/Phyto-71-1020

KOUR, D.; RANA, K. L.; KAUR, T.; YADAV, A. N.; KUMAR, M.; KUMAR, V.; DHALIWAL, H. S.; SAXENA, A. K. Biodiversity, current developments and potential biotechnological applications of phosphorus-solubilizing and mobilizing microbes: A review. **Elsevier**. [S. l.], v. 31, p. 43 – 75, 2021. DOI: 10.1016/S1002-0160(20)60057-1

LAL, R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. **Sustainability**. [S. l.], v. 7, n. 5, 2015. DOI: 10.3399/su7055875

LI, X.; LUO, L.; YANG, J.; LI, B.; YUAN, H. Mechanisms for solubilization of various insoluble phosphates and activation of immobilized phosphates in different soils by an efficient and salinity-tolerant *Aspergillus niger* strain An2. **Applied Biochemistry and Biotechnology, United States**. [S. l.], v. 175, n. 5, p. 2755 – 2768, 2015. DOI: 10.1007/s12010-014-1465-2

LIMA, A. Y. V. **Soil health assessment in Brazilian dryland region (Caatinga biome)** [dissertação]. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2022.

LYU, Y.; TANG, H.; LI, H.; ZHANG, F.; RENGEL, Z.; WHALLEY, W. R.; SHEN, J. Major crop species show differential balance between root morphological and physiological responses to variable phosphorus supply. **Frontiers of Plant Science**. [S. l.], v. 7, p. 1939 – 1939, 2016. DOI: 10.3389/fpls.2016.01939

MACEDO, R. S.; MORO, L.; LAMBAIS, E. O.; LAMBAIS, G. R.; BAKKER, A. P. Effects of degradation on soil attributes under Caatinga in the Brazilian semi-arid. **Árvore**. [S. l.], v. 47, e. 4702, p. 01 – 11, 2023. DOI: 10.1590/1806-908820230000002

MAIA, C. E. Qualidade ambiental em solo com diferentes ciclos de cultivo do meloeiro irrigado. **Ciência Rural**. [S. l.], v. 43, p. 603 – 609, 2013. DOI: 10.1590/S0103-84782013000400007

MAIER, S.; MUGGIA, L.; KUSKE, C. R.; GRUBE, M. Bacteria and non-lichenized fungi within biological soil crusts. *In*: BELNAP, J.; WEBER, B.; BÜDEL, B. Biological soil crusts: An organizing principle in drylands. **Springer**. [S. l.], p. 81 – 100, 2016.

MALAVOLTA, E. Elementos de nutrição de plantas. **Agronômica Ceres**. [S. l.], p. 251, 1980.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. [S. l.], ed. 2, p. 313 – 404, 1997.

MARTINAZZO, R.; SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; KAMINSKI, J. Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto em resposta à adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. [S. l.], v. 31, p. 563 – 570, 2007. DOI: 10.1590/S0100-06832007000300016

MARTIN-NETO, L.; TADINI, A. M.; BENTO, C. R.; SANTOS, J. V.; MILORI, D. M. B. P. *In*: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C. A. **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. [S. l.], ed. 1. cap. 5. 2023.

MBOW, C.; ROSENZWEIG, C.; BARIONI, L. G.; BENTON, T. G.; HERRERO, M.; KRISHNAPILLAI, M.; LIWENGA, E.; PRADHAN, P.; RIVERA-FERRE, M. G.; SAPKOTA, T.; TUBIELLO, F. N. Food security. *In*: SHUKLA, P. R.; SKEA, J.; CALVO, BUENDIA, E. **Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. IPCC. [S. l.], p. 437 – 550, 2019.

MELLO, F. F. C.; CERRI, C. E. P.; DAVIES, C. A.; HOLBROOK, N. M.; PAUSTIAN, K.; MAIA, S. M. F.; GALDOS, M. V.; BERNOUX, M.; CERRI, C. C. Payback time for soil carbon and sugar-cane ethanol. **Nature Climate Change**. [S. l.], 2014. DOI: 10.1038/nclimate2239

MENDONÇA, J. J.; JUNIOR, M. A. L.; CARVALHO, E. X.; FRACETTO, G. G. M.; FRACETTO, F. J. C.; ALVES, M. J. G.; OLIVEIRA, J. P. Diversidade, mecanismos de atuação e potencial agrícola de bactérias promotoras de crescimento de plantas, usando milho como cultura exemplo. **Pesquisa Agropecuária Pernambucana**. [S. l.], v. 25, n. 2, 2020. DOI: 10.12661/pap.2020.010

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. *In*: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). Fundamentos da matéria orgânica do solo. **Genesis**. [S. l.], p. 1 – 8, 1999.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. [S. l.], ed. 2. Ed. UFLA, p. 626, 2006.

MUNIR, N.; HANIF, M.; ABIDEEN, Z.; SOHAIL, M.; EL-KEBLAWY, A.; RADICETTI, E.; MANCINELLI, R.; HAIDER, G. Mechanisms and strategies of plant microbiome interactions to mitigate abiotic stresses. **Agronomy**. [S. l.], v. 12, n. 9, 2022. DOI: 10.3390/agronomy12092069

NAKAO, A. H.; ANDREOTTI, M.; SOARES, D. A. MODESTO, V. C.; DICKMANN. Intercropping *Urochloa brizantha* and sorghum inoculated with *Azospirillum brasilense* for silage. **Revista Ciência Agronômica**. [S. l.], v. 49, n. 3, 2018. DOI: 10.5935/1806-6690.20180057.

OLIVEIRA, A. L. M. D.; CANUTO, E. D. L.; REIS, V. M.; BALDANI, J. I. Response of micropropagated sugarcane varieties to inoculation with endophytic diazotrophic bacteria. **Brazilian Journal of Microbiology**. [S. l.], p. 59 – 61, 2003. DOI: 10.1590/S1517-83822003000500020

OLIVEIRA, I. R. **Avaliação de bioporos em diferentes manejos em solo subtropical**. Universidade Federal da Fronteira Sul, 2021. Disponível em: <https://rd.uffs.edu.br/bitstream/prefix/4630/1/OLIVEIRA.pdf>. Acesso em: 28/08/2023.

OLIVEIRA-SILVA, M.; VELOSO, C. L.; NASCIMENTO, D. L.; OLIVEIRA, J.; PEREIRA, D. F.; COSTA, K. D. S. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**. [S. l.], v. 6, n. 7, p. 47838 – 47855, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n7-431

ONU. **População mundial deve ter mais 2 bilhões de pessoas nos próximos 30 anos**. 2019. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2019/06/1676601>.

OROZCO-MOSQUETA, M. C.; FLORES, A.; ROJAS-SÁNCHEZ, B.; URTIS-FLORES, C. A.; MORALES-CEDENO, L. R.; VALENCIA-MARIN, M. F.; CHÁVEZ-AVILA, S.; ROJAS-SOLIS, D.; SANTOYO, G. Plant growth-promoting bacteria as bioinoculants: attributes and challenges for sustainable crop improvement. **Agronomy**. [S. l.], 2021. DOI:10.3390/agronomy11061167

PANDEY, P. K.; SINGH, M. C.; SINGH, S. S.; KUMAR, A. K.; PATHAK, M. M.; SHAKYWAR, R. C.; PANDEY, A. K. Inside the plants: endophytic bacteria and their functional attributes for plant growth promotion. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**. [S. l.], p. 11 – 21, 2017. DOI: 10.20546/ijcmas.2017.602.002

PAVINATO, P. S.; CHERUBIN, M. R.; SOLTANGHEIS, A.; ROCHA, G. C.; CHADWICK, D. R.; JONES, D. L. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Nature**. [S. l.], 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-72302-1

PEDREIRA, B.C.; BARBOSA, P.L.; PEREIRA, L.E.T.; MOMBACH, M.A.; DOMICIANO, L.F.; PEREIRA, D.H.; FERREIRA, A. Tiller density and tillering on *Brachiaria brizantha* cv. Marandu pastures inoculated with *Azospirillum brasilense*. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**. [S. l.], p. 1039 – 1046, 2017. DOI: 10.1590/1678-4162-9034.

PEREIRA, A. P. A.; MENDES, L. W.; OLIVEIRA, F. A. Z.; MELO, V. M. M.; ARAÚJO, A. S. F. Land degradation affects the microbial communities in the Brazilian Caatinga biome. **Catena**. [S. l.], 2022. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105961

PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; BEUTLER, S. J.; TORRES, J. L. R. Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. **Pesquisa**

agropecuária brasileira, Brasília. [S. l.], v. 45, n. 5, p. 508 – 514, 2010. DOI: 10.1590/S0100-204X2010000500010

PERMINOVA, I. V.; GARCÍA-MINA, J. M.; KNICKER, H.; MIANO, T. Humic substances and nature-like Technologies. **Journal of Soils and Sediments.** [S. l.], v. 19, p. 2663 – 2664, 2019. DOI: 10.1007/s11368-019-02330-6.

POMPERMAYER, G. V. **Adubação fosfatada em sistemas de produção de soja.** 2020. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal) – Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2020.

POWLSON, D. S.; POULTON, P. R.; GLENDINING, M. J.; MACDONALD, A. J.; GOULDING, K. W. T. Is it possible to attain the same soil organic matter content in arable agricultural soils as under natural vegetation? **Outlook on Agriculture.** [S. l.], v. 51, p. 91 – 104, 2022. DOI: 10.1177/00307270221082113

PRADO, R. M. Fósforo. In.: PRADO, R. M. **Nutrição de plantas.** Editora UNESP. [S. l.], 2008. cap. 6. p. 139 – 160.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais.** [S. l.], 18. ed. Nobel, 549 p. 2006.

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais.** Campinas, Instituto Agrônômico, 285p. 2001.

RAIJ, B. Van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo.** Campinas, ed. 2, 1996. (IAC. Boletim Técnico, 100).

RASCHE, F.; CADISCH, G. The molecular microbial perspective of organic matter turnover and nutrient cycling in tropical agroecosystems. What do we know? **Biology and Fertility of Soils.** [S. l.], v. 49, p. 251 – 262, 2013.

REGINA, E. Maria Maria (canção). Album: **Saudade do Brasil**, 1980.

REJSEK, K. VRANOVA, V.; PAVELKA, M.; FORMANEK, P. Acid phosphomonoesterase (E.C. 3.1.3.2) location in soil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science.** [S. l.], v. 175, n. 2, p. 196 – 211, 2012. DOI: 10.1002/jpln.201000139

RIBEIRO, C. M.; CARDOSO, E. J. B. N. Isolation, selection and characterization of root-associated growth promoting bacteria in Brazil Pine (*Araucaria angustifolia*). **Microbiological research.** [S. l.], v. 16, n. 2, p. 69 – 78, 2012. DOI: 10.1016/j.micres.2011.03.003

RICHARDSON, A. E.; SIMPSON, R. J.; Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus. **Plant Physiol.** [S. l.], 2011. DOI:10.1104/pp.111.175448

ROMAGNOLI, E. M.; ANDREOTE, F. D. Rizosfera. *In*: CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do Solo**. [S. l.], ed. 2. cap. 4. 2016.

RONQUIM, C. C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. **EMBRAPA, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 8**. [S. l.], ed. 1, 2010.

SÁ, J. C. M.; SANTOS, J. B.; CANALLI, L. B.; INAGAKI, T. M.; GONÇALVES, D. R. P.; ROMANIW, J.; OLIVEIRA FERREIRA, A.; BRIEDIS, C. Sistema plantio direto. *In*: BERTOL, O. J.; COLOZZI FILHO, A.; BARBOSA, G. M. C.; SANTOS, J. B. dos; GUIMARÃES, M. F. Manual de manejo e conservação do solo e da água para o Estado do Paraná. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. [S. l.], ed. 1, p. 105 – 110, 2019.

SAATH, K. C. O.; FACHINELLO, A. L. Crescimento da Demanda Mundial de Alimentos e Restrições do Fator Terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**. [S. l.], v. 56, n. 2, p. 195 – 212, 2018. DOI: 10.1590/1234-56781806-94790560201

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. [S. l.], 5. ed. rev. e ampl. Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2018.

SANTOS, K. F. D. N.; MOURE, V. R.; HAUER, V.; SANTOS, A. R. S.; DONATTI, L.; GALVÃO, C. W.; PEDROSA, F. O.; SOUZA, E. M.; WASSEM, R.; STEFFENS, M. B. R. Wheat colonization by na *Azospirillum brasilense* ammonium excreting strain reveals upregulation of nitrogenase and superior plant growth promotion. **Plant Soil**. [S. l.], 2017. DOI: 10.1007/s11104-016-3140-6

SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Outstanding impact of *Azospirillum brasilense* strains Ab-V5 and Ab-V6 on the Brazilian agriculture: Lessons that farmers are receptive to adopt new microbial inoculants. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. [S. l.], 2021. DOI: 10.36783/18069657rbcS20200128

SANTOS, T. C. **Impactos das mudanças de uso da terra e manejo nos estoques de carbono do solo em diferentes biomas brasileiros**. 2019. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal) – Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo.

SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; ANDRADE, C. A.; MARTIN-NETO, L.; BETTIOL, W. Matéria orgânica do solo: Ciclos, compartimentos e funções. *In*: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C. A. **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. [S. l.], ed. 1. cap. 1. 2023.

SILVA, E. E.; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO₂). **Comunicado Técnico 99 - Embrapa Agrobiologia**. [S. l.], 2007.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. *In*: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). Fertilidade do solo. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. [S. l.], 2007. p. 275 – 374, 2007.

SILVA, R. R.; LEITE, R. C.; FREITAS, G. A.; SILVA, P. S. S.; CARNEIRO, J. S. S. Eficiência de fertilizante fosfatado na cultura da soja no cerrado baiano. **Agropecuária Científica no Semiárido**. [S. l.], v. 11, n. 4, p. 13 – 22, 2015. Disponível em: <http://revistas.ufcg.edu.br/acsa/index.php/ACSA/article/view/655>. Acesso em: 27/03/2023

SILVA, R. R.; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L.; MOREIRA, F. M. S.; CURI, N.; ALOVISI, A. M. T. Biomassa e atividade microbiana em solo sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica Campos das Vertentes - MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1585 – 1592, 2010. DOI: 10.1590/S0100-06832010000500011

SIMON, C. P.; GOMES, T. F.; SOLTANGHEISI, A.; BIELUCZZYK, W.; CAMARGO, P. B.; MARTINELLI, L. A.; CHERUBIN, M. R.; Soil quality literature in Brazil: A systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. [S. l.], v. 46, 2022. DOI: 10.36783/18069657rbc20210103

SOARES, A. B.; AIOLFI, R. B.; BORTOLLI, M. A.; ASSMANN, T. S.; ZATTA, A. C. Produção animal e vegetal em sistemas integrados de produção agropecuária. In.: PARIS, W.; CECATO, U.; DANIELCE, M. M.; MARI, G. C. **III simpósio de produção animal a pasto**. [S. l.], ed. 2, p. 139 – 175, 2015.

SOARES, W. V.; LOBATO, E.; SOUSA, D. M. G.; VILELA, L. Adubação fosfatada para manutenção de pastagens de *Brachiaria decumbens* no Cerrado. **Embrapa Cerrados**. Brasília, n. 53, p.1 – 5, 2001.

SOUZA, R.; AMBROSINI, A.; PASSAGLIA, L. M. P. Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. **Genetics and Molecular Biology**. [S. l.], v. 38, n. 4, p. 401 – 419, 2015. DOI: 10.1590/S1415-475738420150053.

SPERA, S. T.; MAGALHÃES, C. A. S.; DENARDIN, J. E.; TARDIN, F. D.; MATOS, E. S.; SOUVO, L. H. C. Produção de grãos e de palhada em diferentes rotações de culturas manejadas com sistema plantio direto. In.: SILVA, A. J. R. et al. **Embrapa Agrossilvipastoril - Primeiras contribuições para o desenvolvimento de uma Agropecuária Sustentável**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2019. cap. 4. p. 47 – 51. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1103775/1/2019cpamtagrossilvipastorilpart1cap4producaoagraospalhadadiferentesrotacoesculturassistemaplantiodireto4751.pdf>. Acesso em: 27/03/2023

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. John Wiley. [S. l.], ed. 2, 1994.

TABATABAI, M. A. Soil Enzymes. In: WEAVER, R. W.; ANGLE, S.; BOTTOMLEY, P.; BEZDICEK, D.; SMITH, S.; TABATABAI, A.; WOLLUM, A. Methods of soil analysis. Part 2. **Microbiological and biochemical properties**. Madison, WI, SSSA. [S. l.], p. 775 – 833, 1994.

TIAN, J.; GE, F.; ZHANG, D.; LIU, X. Roles of phosphate solubilizing microorganisms from managing soil phosphorus deficiency to mediating biogeochemical P cycle. **Biology**. [S. l.], v. 10, n. 2, 2021. DOI: 10.3390/biology10020158

TIMMUSK, S.; ABD EL-DAIM, I. A.; COPOLOVICI, L.; TANILAS, T.; KÄNNASTE, A.; BEHERS, L.; NEVO, E.; SEISENBAEVA, G.; STENSTRÖM, E.; NIINEMETS, Ü. Drought-tolerance of wheat improved by rhizosphere bacteria from harsh environments: enhanced biomass production and reduced emissions of stress volatiles. **PLoS One**. [S. l.], v. 9, n. 5, 2014. DOI: 10.1371/journal.pone.0096086

TORMENA, C. A.; SÁ, J. C. M.; FIGUEIREDO, G. C.; SEVERIANO, E. C.; GUIMARÃES, R. M. L.; LINA, R. P. Relações da matéria orgânica com atributos físicos de solos de regiões subtropicais e tropicais brasileiras. In.: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C. A. **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. [S. l.], ed. 1. cap. 3. 2023.

TORRES, C. M. M. E.; JACOVINE, L. A. G.; OLIVEIRA NETO, S. N.; BRIANEZI, D.; ALVES, E. B. B. M. Sistemas agroflorestais no Brasil: uma abordagem sobre a estocagem de carbono. **Pesquisa Florestal Brasileira**. [S. l.], v. 34, p. 235 – 244, 2014. DOI: 10.4336/2014.pfb.34.79.633

TORTORA, M.; DIAZ-RICCI, J. C.; PEDRAZA, R. *Azospirillum brasilense* siderophores with antifungal activity against *Colletotrichum acutatum*. **Archives of Microbiology**. [S. l.], v. 193, n. 4, p. 86 – 275, 2011. DOI: 10.1007/s00203-010-0672-7

TSCHARNTKE, T.; TYLIANAKIS, J. M.; RAND, T. A.; DIDHAM, R. K.; FAHRIG, L.; BATÁRY, P.; BENGTTSSON, J. CLOUGH, Y.; CRIST, T. O.; DORMANN, C. F.; EWERS, R. M.; FRÜND, J.; HOLT, R. D.; HOLZSCHUH, A.; KLEIN, A. M.; KLEIJN, D.; KREMEN, C.; LANDIS, D. A.; LAURANCE, W.; LINDENMAYER, D.; SCHERBER, C.; SODJI, N.; STEFFAN-DEWENTER, I.; THIES, C.; VAN DER PUTTEN, W. H.; WESTPHA, C. Landscape moderation of biodiversity patterns and processes – eight hypotheses. **Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society**. [S. l.], v. 87, n. 3, p. 85 – 661, 2012. DOI: 10.1111/j.1469-185X.2011.00216.x

ULLAH, A.; SALEM, S.; KANG, S. The impact of agroecosystem on ecological footprint: Fresh evidence in the perspective of existing agriculture and green Pakistan. **Ciência Rural**, Rio Grande do Sul/RS, v. 53, n. 1, p. 01 – 13, 2023. DOI: 10.1590/0103-8478cr20210617

VANCE, E. D.; BROOKES.; P. C. JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**. [S. l.], v. 19, n. 6, p. 703 – 707, 1987. DOI: 10.1016/0038-0717(87)90052-6

WALKLEY, A. J.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**. [S. l.], v. 37, p. 29 – 38, 1934. DOI: 10.1097/00010694-193401000-00003

WEIL, R. R.; BRADY, N. C. The nature and properties of soils. **Columbus: Pearson**. [S. l.], ed. 14, p. 1104, 2016.

ZHANG, F.; SHEN, J.; ZHANG, J.; ZUO, Y.; LI, L.; CHEN, X. Rhizosphere processes and management for improving nutrient use efficiency and crop productivity: implications for China. **Advances in Agronomy**. [S. l.], v. 107, p. 1 – 32, 2010. DOI:10.1016/S0065-2113(10)07001-X