



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
AGROECOLOGIA E DESENVOLVIMENTO RURAL**

**PLANTAS DE COBERTURA COMO FACILITADORAS DO CULTIVO DE  
MILHO EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO ORGÂNICO**

**MAIRA ABIGAIL DOS SANTOS SILVA**

**Araras**

**2024**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
AGROECOLOGIA E DESENVOLVIMENTO RURAL**

**PLANTAS DE COBERTURA COMO FACILITADORAS DO CULTIVO DE  
MILHO EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO ORGÂNICO**

**MAIRA ABIGAIL DOS SANTOS SILVA**

**ORIENTADORA: PROF<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. ANASTÁCIA FONTANETTI**

**COORDENADORES: PROF<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. LAURA FERNANDA SIMÕES DA SILVA**

**PROF. DR. VICTOR AUGUSTO FORTI**

Dissertação apresentada ao Programa  
de Pós-Graduação em Agroecologia e  
Desenvolvimento Rural como requisito  
parcial à obtenção do título de MESTRE  
EM AGROECOLOGIA E  
DESENVOLVIMENTO RURAL

Araras

2024

dos Santos Silva, Maira Abigail

Plantas de Cobertura Como Facilitadoras Do Cultivo De Milho Em Sistema De Plantio Direto Orgânico / Maira Abigail dos Santos Silva -- 2024.  
71f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Araras, Araras  
Orientador (a): Anastácia Fontanetti  
Banca Examinadora: Anastácia Fontanetti, Anderson de Souza Gallo, Emerson Trogello  
Bibliografia

1. Agricultura orgânica. 2. Agricultura regenerativa. 3. Plantas de cobertura. I. dos Santos Silva, Maira Abigail.  
II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Helena Sachi do Amaral - CRB/8  
7083



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Agrárias  
Programa de Pós-Graduação em Agroecologia e Desenvolvimento Rural

---

### Folha de Aprovação

---

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Maira Abigail dos Santos Silva, realizada em 26/07/2024.

#### Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Anastacia Fontanetti (UFSCar)

Prof. Dr. Anderson de Souza Gallo (UFSCar)

Prof. Dr. Emerson Trogello (IFGoiano)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Agroecologia e Desenvolvimento Rural.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha mais sincera gratidão à minha amada irmã, Luciana Célia dos Santos Silva, a sua constante confiança em mim e seu apoio incansável têm sido o meu porto seguro diante de todas as adversidades.

É fundamental reconhecer o papel crucial que meu namorado, Miguel Messias, desempenhou para tornar tudo isso uma realidade.

Aos meus pais, Mírian Glauciane dos Santos Silva e Luciano Cardoso de Almeida Silva, expresso minha gratidão pelo apoio ao longo desta jornada.

Quero expressar minha profunda gratidão a todos os meus amigos, cujas presenças constantes ao longo de todo o processo do mestrado foram um estímulo positivo contínuo e um lembrete constante de que eu não estava sozinha nesta jornada.

Agradeço a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e ao Programa de Pós-Graduação em Agroecologia e Desenvolvimento Rural (PPGADR) pela valiosa oportunidade de cursar minha pós-graduação nesta renomada instituição e neste excelente programa. Agradeço a secretária Tereza Cristina pelas orientações e a disposição de ajudar sempre.

À minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Anastácia Fontanetti, dedico a ela meus agradecimentos especiais, a sua paciência, orientação e sabedoria foram elementos cruciais para o meu crescimento acadêmico.

Gostaria também de expressar minha gratidão aos meus coorientadores, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Laura Fernanda Simões da Silva e Prof. Dr. Victor Augusto Forti, pelo apoio e orientação ao longo deste trabalho.

Agradeço à valiosa contribuição de todos os membros do NEPAC (Núcleo de Estudo e Pesquisa em Agricultura da Conservação) na condução do experimento e avaliações

Aos membros da banca por aceitarem fazer parte desse importante processo e pela contribuição para melhorar o trabalho.

Este trabalho, que representa um marco em minha trajetória, foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) do Brasil, código de financiamento 001 e pelo Centro de Ciências Agrárias da UFSCar (CCA) - projeto FAI RTI-CCA.

## SUMÁRIO

<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	I
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	II
<b>RESUMO</b> .....	III
<b>ABSTRACT</b> .....	IV
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	01
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	03
2.1 Panorama e desafios tecnológicos da produção de milho em sistema orgânico.....	03
2.2 Potencialidades do sistema de plantio direto e das plantas de cobertura do solo na produção orgânica.....	05
2.3 Exigência nutricional do milho.....	09
2.4 Ciclo do nitrogênio em agroecossistemas.....	11
2.5 Ciclo do fósforo em agroecossistemas.....	13
<b>3 OBJETIVO</b> .....	17
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	17
4.1 Caracterização da área experimental.....	17
4.2 Delineamento experimental e tratamentos.....	19
4.3 Condução do experimento.....	19
4.4 Avaliações.....	20
4.4.1 Plantas de cobertura.....	20
4.4.2 Dinâmica de N e P no solo.....	21
4.4.3 Milho.....	22
4.4.3.1 Índice de clorofila Falker.....	22
4.4.3.2 Características agrônômicas.....	22
4.4.3.3 Estado nutricional.....	22
4.4.3.4 Componentes de produção.....	23
4.5 Análise dos dados.....	23
<b>5 RESULTADOS</b> .....	23
5.1 Plantas de cobertura.....	23
5.2 Dinâmica de N e P no solo.....	25
5.3 Milho.....	30

<b>6</b>	<b>DISCUSSÃO</b> .....	32
	<b>6.1</b> Plantas de cobertura.....	32
	<b>6.2</b> Dinâmica de N e P no solo.....	36
	<b>6.2</b> Milho.....	39
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	40
<b>8</b>	<b>LITERATURA CITADA</b> .....	41

**ÍNDICE DE TABELAS**

	Página
<b>Tabela 1.</b> Temperaturas mínima, média e máxima (°C) e precipitação pluviométrica (mm) registradas durante os meses de condução do experimento. Araras-SP, safra 2022/23.....	17
<b>Tabela 2.</b> Produção de massa de matéria verde, massa de matéria seca e teor de massa seca das plantas de cobertura do solo aos 100 dias após a emergência. Safra 2022/23. Araras, SP.....	24
<b>Tabela 3.</b> Macronutrientes acumulados na massa de matéria seca das plantas de cobertura aos 100 dias após emergência. Safra 2022/23. Araras, SP.....	25
<b>Tabela 4.</b> Índice de clorofila Falker (ICF) foliar nos estádios quatro folhas expandidas (V4) e emissão da espiga (R1), altura de plantas e altura de inserção da espiga de milho em função das coberturas do solo. Safra 2022/23. Araras, SP.....	31
<b>Tabela 5.</b> Teor de macronutrientes foliares no milho em função das plantas de cobertura. Safra 2022/23. Araras, SP.....	31
<b>Tabela 6.</b> Massa de mil grãos e produtividade do milho em função das plantas de cobertura. Safra 2022/23. Araras, SP.....	32



## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
<b>Figura 1.</b> Balanço hídrico mensal para a cultura do milho, no período de março a julho de 2023, Araras/SP, safra 2022/23.....	18
<b>Figura 2.</b> Teor de lignina na massa de matéria seca das plantas de cobertura aos 100 dias após emergência. Safra 2022/23. Araras, SP.....	24
<b>Figura 3.</b> Teor de amônio (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) no solo em função das coberturas e épocas de avaliação: plantas de cobertura aos 90 dias após plantio (DAP), estádios fenológicos de seis folhas expandidas do milho (V6) aos 35 DAP e pendoamento do milho (VT) aos 65 DAP. Safra 2022/23. Araras, SP.....	25
<b>Figura 4.</b> Teor de nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) no solo em função das coberturas e épocas de avaliação: plantas de cobertura aos 90 dias após plantio (DAP), estádios fenológicos de seis folhas expandidas do milho (V6) aos 35 DAP e pendoamento do milho (VT) aos 65 DAP. Safra 2022/23. Araras, SP.....	27
<b>Figura 5.</b> Atividade da enzima fosfatase ácida em função das coberturas do solo e das épocas de avaliação: plantas de cobertura aos 90 dias após plantio (DAP), estádios fenológicos de seis folhas expandidas do milho (V6) aos 35 DAP e pendoamento do milho (VT) aos 65 DAP. Safra 2022/23. Araras, SP.....	28
<b>Figura 6.</b> Atividade da enzima fosfatase alcalina em função das épocas de avaliação: plantas de cobertura aos 90 dias após plantio (DAP), estádios fenológicos de seis folhas expandidas do milho (V6) aos 35 DAP e pendoamento do milho (VT) aos 65 DAP. Safra 2022/23. Araras, SP.....	29
<b>Figura 7.</b> Teor de P disponível no solo em função das plantas de cobertura e épocas de avaliação: plantas de cobertura aos 90 dias após plantio (DAP), estádios fenológicos de seis folhas expandidas do milho (V6) aos 35 DAP e pendoamento do milho (VT) aos 65 DAP. Safra 2022/23. Araras, SP.....	30

## PLANTAS DE COBERTURA COMO FACILITADORAS DO CULTIVO DE MILHO EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO ORGÂNICO

**ORIENTADORA: PROF<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. ANASTÁCIA FONTANETTI**

**COORIENTADORES: PROF<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. LAURA FERNANDA SIMÕES DA SILVA  
PROF. DR. VICTOR AUGUSTO**

### RESUMO

As plantas de cobertura podem atuar como facilitadoras para a produção de milho (*Zea mays* L.) em sistema de plantio direto orgânico. A mistura das espécies e, ou o cultivo isolado, principalmente de leguminosas, podem aumentar a disponibilidade de nitrogênio (N) e fósforo (P) para o milho em sucessão. O objetivo com o estudo foi avaliar o potencial das plantas de cobertura, isoladas e em mistura (mix), na dinâmica de N e P no solo, na nutrição mineral e produção de milho em sistema de plantio direto orgânico. O delineamento foi o de blocos casualizados, com 5 repetições e 4 tratamentos: (1) Mix - *Crotalaria ochroleuca*, guandu-anão (*Cajanus cajan*, L. Millsp.), milheto (*Pennisetum glaucum*, L. R. Brown) e trigo mourisco (*Fagopyrum esculentum* Moench), (2) milheto, (3) *C. ochroleuca* e (4) pousio/vegetação espontânea. Nas plantas de cobertura foram avaliados a produção de massa verde e seca, teor de lignina e acúmulo de macronutrientes. No solo foram avaliados os teores de amônio, nitrato, fósforo (P) disponível e a atividade das enzimas fosfatases ácida e alcalina. Para o milho foram avaliados o índice de clorofila, teor de macronutrientes foliares e a produtividade de grãos. A *C. ochroleuca* contribuiu para o fornecimento de N (amônio e nitrato) em sincronia com a demanda do milho e, apesar de não ter acrescido os teores foliares de N, proporcionou a maior produtividade de grãos do milho. A inclusão de plantas de cobertura com reconhecida eficiência na absorção de P do solo, como o guandu-anão e o trigo mourisco, elevou o acúmulo de P na massa seca do mix. Contudo, não elevou os teores de P do solo, durante o ciclo do milho semeado em sucessão.

**Palavras-chave:** agricultura orgânica, agricultura regenerativa, fósforo, mix de plantas de cobertura, nitrogênio.

## COVER CROPS AS FACILITATORS FOR CORN CULTIVATION IN AN ORGANIC NO-TILL SYSTEM

**ADVISOR: PROF. Dr. ANASTÁCIA FONTANETTI**

**CO-ADVISORS: PROF. Dr. LAURA FERNANDA SIMÕES DA SILVA, PROF. Dr. VICTOR AUGUSTO FORTI**

### ABSTRACT

Cover crops can act as facilitators for the production of maize (*Zea mays* L.) in an organic no-tillage system. The mixture of species and/or isolated cultivation, mainly of legumes, can increase the availability of nitrogen (N) and phosphorus (P) for maize in succession. The aim of this study was to evaluate the potential of cover crops, isolated and in a mixture (mix), on N and P dynamics in the soil, mineral nutrition, and maize production in an organic no-tillage system. The experimental design was a randomized block design with 5 replications and 4 treatments: (1) Mix - *Crotalaria ochroleuca*, dwarf pigeon pea (*Cajanus cajan*, L. Millsp.), pearl millet (*Pennisetum glaucum*, L. R. Brown), and buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench), (2) pearl millet, (3) *C. ochroleuca*, and (4) fallow/spontaneous vegetation. The green and dry mass production, lignin content, and macronutrient accumulation were evaluated in the cover crops. In the soil, ammonium, nitrate, available phosphorus (P) levels, and the activity of acid and alkaline phosphatase enzymes were assessed. For maize, chlorophyll index, foliar macronutrient content, and grain yield were evaluated. *C. ochroleuca* contributed to the supply of N (ammonium and nitrate) in sync with maize demand, and despite not increasing foliar N levels, it provided the highest maize grain yield. The inclusion of cover crops recognized for their efficiency in P absorption from the soil, such as dwarf pigeon pea and buckwheat, increased P accumulation in the dry mass of the mix. However, it did not increase soil P levels during the maize cycle sown in succession.

**Keywords:** organic agriculture, regenerative agriculture, phosphorus, cover crop mix, nitrogen

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de milho, com produção de 111,64 milhões de toneladas de grãos na safra 2023/24 (CONAB, 2024). No entanto, a produção nacional de milho em sistema orgânico é insuficiente para atender as cadeias de produção de proteína animal, onde os grãos do cereal são utilizados para compor as rações e a planta inteira é fornecida como forragem e, ou silagem. Estimulada pelo investimento de grandes empresas do setor, como a Nestlé, com o lançamento do leite orgânico (Lima *et al.*, 2020), a Raiar orgânicos, com a produção de ovos (Cruz, 2024) e a Marfring, no processamento de carnes orgânicas (Florentino, 2023), acredita-se que a demanda por milho orgânico nos próximos anos deverá aumentar. Portanto, justifica-se o desenvolvimento de técnicas e processos de produção para a profissionalização do setor, considerado atraente, rentável e sustentável (Santos; Tivelli, 2017).

Dentre as premissas fundamentais para a produção orgânica, enfatizadas pela Lei n. 10.831, de 23 de dezembro de 2003, estão: a otimização do uso dos recursos naturais, como a utilização adequada do solo, da água e do ar, reduzindo ao mínimo possível a contaminação desses, assegurando o incremento da atividade biológica do solo e empregando, sempre que possível, métodos culturais, biológicos e mecânicos (BRASIL, 2003).

O Sistema de Plantio Direto (SPD), caracterizado pela eliminação do revolvimento e cobertura permanente do solo com palha, por meio da rotação de culturas, alinha-se com as premissas da agricultura orgânica. O SPD promove melhorias nos atributos físicos-hídricos (Ribeiro *et al.*, 2016), químicos (Oliveira *et al.*, 2017 ; Soratto *et al.*, 2012) e biológicos (Ferreira *et al.*, 2019) do solo, reduzindo o processo erosivo (Oliveira *et al.*, 2012 ; Silva; De Maria, 2011) e as emissões de gases de efeito estufa (Besen *et al.*, 2018). A melhoria desses atributos contribuem para o uso eficiente da água e aumento da produtividade das culturas em SPD (Pedrotti *et al.*, 2015).

As plantas de cobertura são importantes componentes do SPD. Elas não apenas protegem o solo contra agentes erosivos, como também desempenham papel fundamental na dinâmica dos nutrientes (Vojnov *et al.*, 2022). A escolha

de espécies que se adequem às condições edafoclimáticas e especificidades dos sistemas de produção são cruciais para o êxito do SPD, sobretudo sob manejo orgânico.

No tocante à produção de milho em SPD orgânico, o manejo das plantas daninhas e a nutrição mineral, em especial o fornecimento de nitrogênio (N) e fósforo (P) em quantidades e sincronia com a demanda do milho, estão entre os maiores desafios (Fontanetti *et al.*, 2023).

As leguminosas (*Fabaceae*) são adubos verdes eficientes para culturas exigentes em N, representando uma fonte alternativa aos fertilizantes de origem animal normalmente empregados na agricultura orgânica (Lynge *et al.*, 2023). As gramíneas (*Poaceae*) tem maior potencial para a produção de biomassa, contribuindo para a reciclagem de nutrientes e acúmulo de matéria orgânica no solo (Adetunji *et al.*, 2020). Espécies pertencentes as famílias *Brassicaceae* e *Cruciferae* podem capturar o nitrato dos solos na entressafra, devido a maior densidade de raízes em profundidade (Thomsen; Hansen, 2014), reduzindo a lixiviação e aumentando a sua disponibilidade para a cultura em sucessão (Vojnov *et al.*, 2022). A *Polygonaceae* trigo mourisco (*Fagopyrum esculentum*) é reconhecida pela eficiência na absorção de P, por acidificar a rizosfera (Gerke, 2015), com potencial para solubilizar P de fontes menos solúveis, contribuindo para a ciclagem no agroecossistema.

Nesse contexto, é consenso que as plantas de cobertura cultivadas isoladamente contribuem para o incremento do N e ciclagem de nutrientes nos agroecossistemas. Porém, a combinação de diferentes famílias e espécies em cultivos simultâneos podem potencializar esses efeitos. Leguminosas cultivadas com gramíneas aumentam a diversidade de bactérias fixadoras de N no solo, disponibilizando nutrientes como N e P para as culturas em sucessão (Chen *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2018) e facilitam a transferência do N fixado biologicamente, aumentando a produção de biomassa das gramíneas (Nyfeler *et al.*, 2011). O mix entre leguminosas e crucíferas colaboram tanto para a absorção do nitrato, reduzindo as perdas de N na entressafra, como para o incremento de N no sistema via fixação biológica, além de contribuir com a cobertura e

armazenamento de C no solo, devido a maior produção de biomassa (Couédel *et al.*, 2018).

O desenvolvimento de tecnologias que reduzam o revolvimento dos solos e a dependência de fertilizantes de origem animal, estimulando os processos biológicos que aumentem a disponibilidade de N e P nos agroecossistemas, são necessárias para a expansão da cultura do milho e a melhoria da renda dos agricultores orgânicos.

Diante do exposto, o objetivo com o presente estudo foi compreender como as espécies de plantas de coberturas isoladas ou em misturas podem otimizar o fornecimento de N e P para o milho em SPD orgânico.

As perguntas norteadoras dessa pesquisa foram:

i) Quais as contribuições das plantas de cobertura solteiras e em mix na dinâmica de N e P no sistema solo-planta?

ii) Quais os processos químicos e biológicos envolvidos na dinâmica de N e P no sistema solo-planta? Qual(is) possível(is) contribuições das espécies de plantas de cobertura nesses processos?

iii) As plantas de cobertura solteiras e em mix podem suprir a demanda nutricional do milho por N e P, reduzindo o uso de fertilizante de origem animal?

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Panorama e desafios tecnológicos da produção de milho em sistema orgânico**

Originário do México, o milho se tornou um dos principais alimentos globais, contribuindo com aproximadamente 30% das calorias consumidas por bilhões de pessoas (Subedi; Ma, 2009; Latković *et al.*, 2019). Atualmente é cultivado em 170 regiões, com destaque para as Américas e a Ásia (Wang; Hu, 2021). Os países que detém as maiores produção desse cereal são os EUA, China, Brasil e Argentina (USDA, 2021) e os maiores consumidores são os EUA e a China (Wang; Hu, 2021). No Brasil, a produção de milho para a safra 2023/24 deve alcançar 111,64 milhões de toneladas de grãos (CONAB, 2024).

Apesar da escassez de dados estatísticos sobre a produção de milho em sistema orgânico, sabe-se que a área mundial cultivada com cereais orgânicos

em 2022 foi de 5.641.202 ha<sup>-1</sup>, e o Brasil foi responsável por apenas 0,002% (525 ha) desse total (Willer; Trávníček; Schlatter, 2024).

Uma pesquisa realizada pelo IBD (Associação de Certificação Instituto Biodinâmico) revelou que a produção de milho orgânico equivaleu a 0,03% do que foi produzido nacionalmente na safra 2015/16, correspondendo a aproximadamente 20.000 toneladas (Santos; Tivelli, 2017). Em 2022, aproximadamente 7.787 unidades produtoras de milho orgânico no país estavam cadastradas no Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA), com maior representação na Região Sudeste, que abrigava 1.823 propriedades, sendo 987 no estado de São Paulo (MAPA, 2022).

O aumento da produção de milho orgânico é especialmente relevante para as cadeias agroalimentares de ovos, leite e carnes orgânicas (bovina e aves), uma vez que o milho é um dos componentes essenciais na ração desses animais (Landau; Campanha; Matrangolo, 2021).

Dentre os principais desafios tecnológicos para a expansão da agricultura orgânica mundialmente estão o manejo das plantas daninhas (Rajkovic *et al.*, 2021) e o fornecimento de nutrientes em quantidade e sincronia com a demanda das culturas (Sorensen; Thorup-Kristensen, 2011).

No Brasil, o manejo de plantas daninhas em sistema orgânico é realizado majoritariamente por capina manual (Spagnolo *et al.*, 2017). De acordo com Carr (2017), o controle mecânico das espécies daninhas no sistema orgânico estimula o revolvimento do solo, podendo comprometer a sua qualidade devido ao processo erosivo e perda de matéria orgânica, contrariando as metas de sustentabilidade.

A situação é agravada, quando os agricultores orgânicos dependem do uso de fertilizantes de origem animal, incluindo excrementos, compostos e biofertilizantes. Apesar da legislação brasileira autorizar o uso de excrementos de animais advindos do sistema convencional em caso de limitação na região (BRASIL, 2014), o volume demandado é alto e pode inviabilizar a produção orgânica. De acordo com a pesquisa de Towett *et al.* (2020), os fertilizantes orgânicos geralmente têm concentrações de nutrientes substancialmente menores em comparação aos fertilizantes sintéticos, o que implica no uso de

elevados volumes, onerando os custos com transporte e aplicação (Arruda *et al.*, 2011). Fato preocupante diante da renda bruta predominante nos estabelecimentos que praticam pecuária e/ou agricultura orgânica no Brasil, que é no máximo de dois salários-mínimos (Souza; Gomes; Gazzola, 2021).

O N está entre os nutrientes mais limitantes para a produção em sistema orgânico (Muller *et al.*, 2017). Fernandes, Uhde e Wunsch (2007), avaliando a fertilidade dos solos em áreas de produção orgânica de soja e milho, identificaram um déficit de 150 kg ha<sup>-1</sup> de N, por ser o elemento exportado em maior quantidade em relação aos demais. Da mesma forma, o P é um nutriente escasso e com baixa disponibilidade em muitos solos (Novais; Smyth, 1999), principalmente em regiões de domínio tropical.

## **2.2 Potencialidades do sistema de plantio direto e das plantas de cobertura do solo na produção orgânica**

A agricultura orgânica e a agricultura de conservação destacam-se como modelos agrícolas que adotam práticas sustentáveis (Anghinoni; Vezzani, 2021). A agricultura de conservação estrutura-se em três princípios: mínima perturbação do solo, cobertura do solo e rotação de culturas (Hobbs *et al.*, 2008). Entre as práticas destacam-se o preparo reduzido, a semeadura/plantio direto e a adubação verde/plantas de cobertura do solo.

O sistema de plantio direto (SPD) destaca-se como uma das tecnologias mais adequadas para os trópicos (Silva *et al.*, 2022), pois combina o não revolvimento do solo, a cobertura permanente e a rotação de culturas. Essa prática agrícola reduz a erosão (Oliveira *et al.*, 2012; Silva; De Maria, 2011), melhora a qualidade do solo (Ferreira *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2017; Ribeiro *et al.*, 2016; Soratto *et al.*, 2012) e contribui para a sustentabilidade ambiental, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa (Besen *et al.*, 2018) e otimizando o uso da água e a produtividade das culturas (Pedrotti *et al.*, 2015). Unir o SPD à agricultura orgânica aumenta as chances de atender as metas de sustentabilidade propostas pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (EMBRAPA, 2018), adequando-se à definição holística de agricultura de conservação disseminada pela entidade.



Atentos a essa tendência e à demanda de mercado para identificar e valorar os sistemas produtivos que adotam práticas da agricultura de conservação e agricultura orgânica, recentemente chegou ao Brasil a certificação Regenerative Organic Certified (ROC). A ROC é uma certificação para alimentos, têxteis e ingredientes para cuidados pessoais que valoriza os mais rígidos padrões de saúde do solo, bem-estar animal e de aspectos sociais do trabalho rural (Groupe Ecocert, 2023).

Para obter a certificação Regenerative Organic Certification (ROC), os produtores precisam atender aos requisitos estabelecidos para culturas orgânicas pela USDA Certified Organic, que incluem a proibição do uso de agrotóxicos e fertilizantes sintéticos, a promoção da saúde do solo por meio de práticas de cultivo orgânico, o uso de sementes e insumos orgânicos quando disponíveis, a manutenção de áreas de separação entre cultivos orgânicos e convencionais, a documentação detalhada das práticas de cultivo, inspeções regulares por certificadoras autorizadas, e a restrição ao uso de organismos geneticamente modificados (OGMs) (Reda *et al.*, 2021).

As plantas de cobertura desempenham papel fundamental nos sistemas agrícolas sustentáveis, pois são capazes de fornecer, regular e apoiar importantes serviços ecossistêmicos localmente, contribuindo para a produção agrícola (Lu *et al.*, 2000; Tiftonel *et al.*, 2020), consolidando-se como importantes componentes do SPD. Diversas espécies podem ser empregadas como plantas de cobertura, mas tradicionalmente são utilizadas espécies das famílias *Fabaceae* (leguminosas) e *Poaceae* (gramíneas) (Adetunji *et al.*, 2020).

Leguminosas são importantes fontes de nitrogênio (N) para o sistema solo-planta (Du *et al.*, 2020), sendo alternativas aos fertilizantes de origem animal (Lyngge *et al.*, 2023). Além disso, algumas leguminosas, por meio de suas extensas raízes laterais e associações simbióticas com fungos micorrízicos, são capazes de explorar volumes maiores de solo e acessar formas de fósforo de baixa solubilidade, como os fosfatos de cálcio e ferro (Pang *et al.*, 2015) e solubilizar ou mineralizar o fósforo (P) por meio da exsudação de ácidos orgânicos (AE *et al.*, 1995; Dissanayaka *et al.*, 2015), da produção de enzimas fosfatases (Ascencio, 1996) ou pela estimulação de microrganismos

solubilizadores de fosfato (Carneiro *et al.*, 2004), aumentando sua disponibilidade para a planta.

As gramíneas têm maior potencial para a produção de biomassa, contribuindo para a reciclagem de nutrientes e acúmulo de matéria orgânica no solo (Adetunji *et al.*, 2020). Porém, na transição do sistema convencional para o SPD, a maior relação C:N das gramíneas pode prejudicar o desenvolvimento do milho e da soja (Fiorini *et al.*, 2022).

Outras espécies e famílias, em menor escalas, têm sido empregadas como plantas de cobertura, objetivando outras funções no SPD. A mostarda branca (*Sinapis alba*) da família *Brassicaceae*, a colza (*Brassica napus*) e o rabanete forrageiro (*Raphanus sativus*) da família *Cruciferae* podem capturar o nitrogênio (nitrato) dos solos na entressafra, devido a maior densidade de raízes em profundidade no solo (Thomsen; Hansen, 2014), reduzindo a lixiviação e aumentando a sua disponibilidade para a cultura em sucessão (Trorup-Kristensen, 2001). A *Polygonaceae* trigo mourisco (*Fagopyrum esculentum*) é reconhecida pela eficiência na absorção de P, por acidificar a rizosfera (Zhu *et al.*, 2002), com potencial para solubilizar P de fontes menos solúveis. Essas, espécies, geralmente são utilizadas em misturas (mix) com gramíneas e, ou leguminosas (Silva *et al.*, 2006; Laconski *et al.*, 2022; Bybee-Finley *et al.*, 2022).

A combinação estratégica de famílias e espécies de plantas de cobertura, com características complementares como altura, sistema radicular e ciclo de vida, melhora o uso dos recursos, como radiação fotossintética, água e nutrientes do solo, reduzindo a competição e aumentando a produção de biomassa (Finney *et al.*, 2017; Kramberger *et al.*, 2014; Tosti *et al.*, 2014; Bedoussac *et al.*, 2015; Fréville *et al.*, 2022; Shanmugam *et al.*, 2022; Yang; Zhang; Li, 2021; Zhao *et al.*, 2022). Conseqüentemente, observa-se uma série de benefícios para o agroecossistema, incluindo a supressão de plantas daninhas, aporte e retenção de N e melhoria da qualidade do solo, o aumento da diversidade biológica e (Finney *et al.*, 2017; Michelon *et al.*, 2019; Lapierre *et al.*, 2022). A escolha cuidadosa de espécies com diferentes taxas de crescimento e relações carbono-nitrogênio é fundamental para garantir a estabilidade do

sistema e maximizar os benefícios para a agricultura sustentável (Finney *et al.*, 2017; Tosti *et al.*, 2014).

A mistura das plantas de cobertura aumenta a atividade biológica, o acúmulo de carbono (C), N total, P e potássio (K) no solo, quando comparado com as plantas de cobertura isoladas e o solo descoberto (Franzluebbers *et al.*, 2021). Leguminosas cultivadas com gramíneas podem facilitar a transferência de N fixado biologicamente aumentando a produção de biomassa (Rasmussen *et al.*, 2013) e, influenciar a dinâmica de P no sistema solo-planta (Du *et al.*, 2020). A mistura entre gramíneas e leguminosas podem aumentar a diversidade de bactérias fixadoras de N no solo, promovendo maior disponibilização de nutrientes como N e P (Li *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2018). O mix entre leguminosas e crucíferas contribuem tanto para a absorção do nitrato, reduzindo as perdas de N na entressafra, como para o incremento de N no sistema via fixação biológica. Contribui também para a maior cobertura e armazenamento de C no solo, devido a maior produção de biomassa (Couëdel *et al.*, 2018).

Nesse estudo, avaliamos as plantas de cobertura guandu-anão (*Cajanus cajan* L. Millsp.), crotalária (*Crotalaria ochroleuca* G. Don), milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Brown) e trigo mourisco (*Fagopyrum esculentum* Moench), em cultivo isolado e misturas (mix).

O guandu-anão é uma leguminosa anual, apresenta crescimento arbustivo ereto, porte baixo a médio (1 - 1,5 m), produção de massa seca entre 3 e 7 t ha<sup>-1</sup>, com acúmulo de N em torno de 100 a 180 kg ha<sup>-1</sup> (Calegari; Carlos, 2014) e maior tempo de permanência sobre o solo (menor decomposição) quando comparado com o guandu fava-larga (Teodoro *et al.*, 2019). A espécie é capaz de solubilizar e mineralizar P por meio da exsudação de ácidos orgânicos (Cherubin *et al.*, 2022), enzimas fosfatases (Ascencio, 1996) e por estimular o crescimento de microrganismos solubilizadores de fosfato (Carneiro *et al.*, 2004). A planta auxilia na reciclagem de nutrientes, disponibilizando quantidades significativas de P, K, Ca e Mg no solo (Cherubin *et al.*, 2022).

A *crotalaria ochroleuca* é uma leguminosa anual, de hábito arbustivo ereto, com altura de 1,5 a 2,0 m (Calegari; Carlos, 2014) e capacidade de se desenvolver em solos com baixa fertilidade (Barreto; Fernandes, 2001). A

espécie produz em média 7 a 10 t ha<sup>-1</sup> de massa de matéria seca, com acúmulo de 100 a 160 kg ha<sup>-1</sup> de N (Calegari; Carlos, 2014). Comparada às outras crotalárias (*C. juncea*, *C. mucronata*, *C. spectabilis* e *C. breviflora*), apresenta rápida decomposição (Teodoro *et al.*, 2019). Diferente do guandu-anão, cuja raiz pivotante pode alcançar profundidades de solo superiores a 0,30 m, as crotalárias são mais sensíveis à compactação do solo e concentram suas raízes na superfície (Reinert *et al.*, 2008).

O milheto é uma gramínea anual, com altura entre 1,5 e 2,5 m, produção média de massa seca de 10 a 15 t ha<sup>-1</sup> e acúmulo de N de 100 a 120 kg ha<sup>-1</sup> (Calegari; Carlos, 2014). Comparando o comportamento da decomposição dos resíduos de *C. ochroleuca* e milheto, em condições edafoclimáticas semelhantes, o milheto demonstrou decomposição mais lenta, (Teodoro *et al.*, 2019), permanecendo mais tempo sobre o solo. A espécie contribui para a melhoria dos atributos físicos do solo, como a macro porosidade, em função do volume de seu sistema radicular (Torres *et al.*, 2022) e incorporação de matéria orgânica (Rossetti *et al.*, 2012), promovendo melhor desenvolvimento das raízes das plantas cultivadas em sucessão, mesmo em áreas com solo compactado (Silva; Rosolem, 2002).

O trigo mourisco tem sido empregado como cobertura em cultivos exclusivos e/ou em misturas com outras espécies. Diferente das citadas anteriormente, o trigo mourisco é uma planta de outono/inverno, com hábito de crescimento ereto, altura entre 0,60 e 1,20 m, produção de massa seca entre 3 e 6 t ha<sup>-1</sup> e acúmulo de N entre 60 e 120 kg ha<sup>-1</sup> (Calegari; Carlos, 2014). É reconhecida pela eficiência na absorção de P, por acidificar a rizosfera (Zhu *et al.*, 2002), contribuindo para sua ciclagem no agroecossistema.

### **2.3 Exigência nutricional do milho**

O milho apresenta elevada exigência nutricional, sendo o nitrogênio (N) o mais demandado (Bezerra *et al.*, 2023; Fritsche-Neto *et al.*, 2010). A produtividade da cultura está diretamente ligada à sua capacidade de absorver e acumular nutrientes, principalmente N e potássio (K). A exportação dos nutrientes do sistema solo/plantas, principalmente pelos grãos, aumenta

linearmente com a produtividade (Duete *et al.*, 2009). Pois, quase a totalidade do P (77-86%), N (70-77%), magnésio (Mg) (47-69%), K (26-43%), e em menor quantidade o cálcio (Ca) (3-7%), absorvidos pela planta são translocados para os grãos, sendo removidos do sistema após a colheita, (Coelho, 2006).

Para produzir uma tonelada de grãos de milho, é necessário em média 25 kg de N (Von Pinho *et al.*, 2009). Para cada tonelada de grãos produzida, a exportação de N é de 16,1 kg (Resende *et al.*, 2012). O K é o segundo nutriente mais exigido pelo milho; para cada tonelada de grãos produzida, são extraídos cerca de 18 a 30 kg de K<sub>2</sub>O por hectare (Von Pinho *et al.*, 2009).

Apesar da exigência de P pelo milho ser inferior à de N e K, as doses recomendadas para a cultura são altas, em função da baixa eficiência de aproveitamento desse nutriente pelas plantas, devido à adsorção e precipitação de P nos solos. Somado ao fato de que plantas de ciclo curto requerem maior quantidade de P em solução e rápida reposição de P-adsorvido (Coelho, 2006). A demanda média é de 5,55 kg de P para cada tonelada de grãos de milho (Von Pinho *et al.*, 2009) e, para cada tonelada de grãos produzida, a exportação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> é de cerca de 7,5 kg ou 3,28 kg de P (Coelho, 2006; Resende *et al.*, 2012).

Os nutrientes Ca, Mg e S são extraídos em pequenas quantidades pelos grãos de milho (Borin *et al.*, 2010), com médias de extrações de 16 e 32 kg ha<sup>-1</sup> de Ca e Mg, respectivamente (Vasconcellos *et al.*, 1998; Von Pinho *et al.*, 2009) e de 30 a 42 kg ha<sup>-1</sup> de S (Büll, 1993). Quanto à exportação de micronutrientes, em uma safra com 9 toneladas de grãos de milho por hectare, são retirados 2.100 g de ferro, 340 g de manganês, 400 g de zinco, 170 g de boro, 110 g de cobre e 9 g de molibdênio. Apesar dos baixos valores, esses elementos também são essenciais, e a falta causa desordens nos processos metabólicos e queda de produtividade (Coelho, 2006).

Compreendido a necessidade de fertilizantes, ou exigência por nutrientes, outro fator determinante para a nutrição adequada do milho é o conhecimento da absorção e acúmulo de nutrientes nas fases de desenvolvimento. Para o N e o P o milho apresenta duas fases de maior absorção durante as fases de desenvolvimento vegetativo e formação da espiga e menores entre o pendoamento e início da formação da espiga (Coelho, 2006). Büll (1993),

apontou máxima exigência de N aos 60 dias após a emergência do milho, próximo ao estágio VT (pendoamento) do milho. Já Von Pinho *et al.* (2009), observou elevado acúmulo a partir de V8 (oito folhas expandidas) e posterior redução nas fases próximas ao florescimento. Silva (2016) observou ainda, que a cultura do milho possui a capacidade de absorção mais tardia de N, quando há elevada quantidade do nutriente no solo.

Para o P, a absorção ocorre até o final do ciclo do milho, com pico na fase reprodutiva (Büll, 1993). Já para o K, a máxima absorção ocorre no período vegetativo, com acúmulo nos primeiros 30 a 40 dias após emergência do milho (Coelho, 2006).

#### **2.4 Ciclo do nitrogênio em agroecossistemas**

O N desempenha papel fundamental na produção agrícola, e é um dos principais limitadores para a expansão da agricultura orgânica mundialmente (Müller *et al.*, 2017). Isso ocorre porque o N<sub>2</sub> atmosférico não pode ser usado pela maioria dos organismos, incluindo as plantas, devido à tripla ligação entre os átomos de N, que exige grande quantidade de energia para quebrá-la, tornando a molécula quase inerte (Vieira, 2017).

Fato agravado, pelas transformações do N por reações físicas, químicas e biológicas nos agroecossistemas que podem acarretar perdas por volatilização, lixiviação ou escoamento para águas superficiais (Grzyb; Wolna-Maruwka; Niewiadomska, 2021). Nos sistemas de produção convencional, as perdas de N podem alcançar 150 a 250 kg ha<sup>-1</sup> ao ano (Keeney; Hatfield, 2008; Rotz *et al.*, 2005). Nos sistemas de produção de base ecológica a perda de N é menor, em torno de 70 a 90% inferior (Davidson *et al.*, 2012). Mas, a disponibilidade de N nesses sistemas ainda é limitante, devido às limitações de fontes autorizadas pelas certificadoras (Mohammed *et al.*, 2022; Valenzuela; Schaffer; Stephen, 1990). O nitrogênio mineral, essencial para o crescimento das plantas, pode entrar no solo por meio de diversos processos. As deposições atmosféricas, provenientes da chuva e da poeira, transportam compostos nitrogenados para o solo (Kanakidou *et al.*, 2016). No Brasil essas deposições são mais homogêneas e ocorrem em maiores concentrações nas regiões Sul e Sudeste, devido à atividade agrícola e são da ordem de 500 a 2000 mg m<sup>2</sup> ano<sup>-1</sup>

(Vieira, 2017). A fixação biológica (FBN), realizada por microrganismos, transforma o nitrogênio atmosférico em amônia, que é utilizada pelas plantas (Kanakidou *et al.*, 2016) No Brasil a FBN contribui com 63 milhões de toneladas de N para a agricultura (Vieira, 2017). A fixação não biológica ocorre por meio de processos naturais, como descargas elétricas (raios), e antropogênicos, industriais, convertendo o nitrogênio atmosférico em formas assimiláveis pelas plantas (Kanakidou *et al.*, 2016). A produção industrial de amônia contribui com 63% do total de N empregado na agricultura brasileira (Vieira, 2017).

Outra fonte de N mineral no solo advém da decomposição de frações orgânicas, principalmente da fração lábil, composta por resíduos orgânicos recentemente decompostos, considerada o componente ativo da matéria orgânica. O nitrogênio na fração lábil é facilmente mineralizado, impactando diretamente nas necessidades imediatas de absorção de nutrientes das plantas (Gaskell; Smith, 2007).

Durante o processo de decomposição das frações orgânicas, microrganismos do solo convertem o nitrogênio em amino-N ( $\text{NH}_2$ ) para amônio ( $\text{NH}_4^+$ ). Partículas de argila com carga negativa absorvem os íons de amônio, que podem ser liberados com base nas características de troca catiônica do solo. O amônio liberado é convertido em nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) devido à atividade microbiana e, posteriormente, em nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) como parte do processo de nitrificação. As plantas absorvem predominantemente duas formas de nitrogênio, o  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{NH}_4^+$ . Essas formas de nitrogênio são fornecidas às plantas por microrganismos do solo, incluindo bactérias fixadoras de N que convertem o nitrogênio em  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NO}_3^-$ . Além disso, outros microrganismos, como bactérias amonificantes e nitrificantes, participam ativamente do ciclo do nitrogênio, transformando o nitrogênio orgânico em  $\text{NH}_4^+$  e convertendo  $\text{NH}_4^+$  em  $\text{NO}_3^-$ . Fungos micorrízicos também desempenham papel crucial, processando arginina em uréia, que é então convertida em  $\text{NH}_4^+$  (Lai *et al.*, 2022; Valenzuela, 2023).

Na agricultura orgânica, a eficiência no uso do nitrogênio depende da interação de diferentes fontes de N. Isso inclui a fixação biológica de N, fertilizantes orgânicos, matéria orgânica do solo e deposição atmosférica, todos inseridos em complexas interações no solo e no ambiente (Congreves *et al.*,

2021). Nesse sentido, a disponibilidade de N para as culturas depende das fontes e manejos adotados, que devem considerar as variações edafoclimáticas locais (Hu *et al.*, 2021).

A inclusão de plantas de cobertura nos planos de rotação de culturas, especialmente leguminosas (*Fabaceae*), configuram importante estratégia para o aporte de N ao agroecossistema, particularmente na agricultura orgânica (Müller *et al.*, 2017). As plantas de cobertura podem fixar entre 10 e 270 kg ha<sup>-1</sup> de N ao ano, variando em função da qualidade dos resíduos e condições ambientais (Lai *et al.*, 2022; Rotz *et al.*, 2005). A interação entre diferentes espécies de plantas de cobertura, sequência de cultivo e arranjo do sistema é decisivo para otimizar os rendimentos e coordenar a mineralização do N com as necessidades de absorção das plantas. O aprimoramento dos benefícios e da eficácia das leguminosas pode ser alcançado com o plantio consorciado com espécies não leguminosas. Essa prática não apenas melhora a fertilidade do solo, como também promove maior estabilidade dos agregados e atividade microbiana, reduzindo os riscos de lixiviação de nitrato (Kocira *et al.*, 2020; Sainju; Whitehead; Singh, 2003; Wei *et al.*, 2022)

A consorciação de diferentes plantas de coberturas melhora a utilização de recursos e N em ambientes agrícolas por meio de mecanismos ecofisiológicos inter-relacionados (Bedoussac *et al.*, 2015; Ciaccia *et al.*, 2019; Valenzuela, 1995; Watson *et al.*, 2002). A facilitação interespecífica permite o uso complementar de recursos entre espécies consorciadas, levando ao melhor uso de recursos, como N (Bedoussac *et al.*, 2015; Fréville *et al.*, 2022; Shanmugam *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022). Espécies não leguminosas liberam exsudatos de raízes, estimulando a nodulação rizobiana nas leguminosas companheiras e esgotando os reservatórios de N da zona radicular, estimulando ainda mais a fixação de N pelas leguminosas (Fréville *et al.*, 2022; Yang; Zhang; Li, 2021; Zhao *et al.*, 2022).

## **2.5 Ciclo do fósforo em agroecossistemas**

Estima-se que 5,7 bilhões de hectares de solo no mundo apresentem insuficiência de P para sustentar a produção agrícola (Hinsinger, 2001). A baixa disponibilidade desse nutriente para as plantas deve-se a sua elevada



reatividade e a alta retenção dos íons, relacionados a numerosos constituintes do solo (Mendes; Reis Júnior, 2003).

O P é um elemento essencial, encontrado em abundância na litosfera, mas a forma utilizada pelas plantas, ortofosfato inorgânico (Pi), pode ser insolúvel e difunde-se lentamente nos solos. Além disso, o P é vital para diversos processos metabólicos e fisiológicos, incluindo metabolismo energético, divisão celular, síntese de DNA e biossíntese de fosfolipídios, sendo encontrado principalmente na forma de fosfato (Pi) ou ésteres de Pi (Khan *et al.*, 2023). O fósforo no solo pode ser encontrado como  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ou  $\text{HPO}_4^{2-}$ , sendo a sua forma dependente do pH. Em pH ácido, o  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  é mais abundante e geralmente mais disponível para as plantas. Já em pH alcalino, o  $\text{HPO}_4^{2-}$  predomina, podendo formar compostos menos solúveis e, conseqüentemente, menos disponíveis para a absorção pelas raízes. Essa variação na especiação do fósforo tem implicações diretas na nutrição das plantas, afetando o crescimento e desenvolvimento, especialmente em condições de pH extremo (Ducouso-Détrez *et al.*, 2022).

O P presente na fase sólida do solo pode ser classificado em duas frações: lábil e não lábil, e nas frações lábil e não lábil pode ser classificado como P-orgânico e P-inorgânico. O P- inorgânico no solo consiste em fosfato minerais insolúveis e ânions fosfatos adsorvidos a hidróxidos de Fe e Al, silicatos de Al e carbonatos de Ca. Já o P-orgânico, pode representar de 10 a 50% do fósforo total, é composto por moléculas mais complexas, como inositóis-fosfatos, fosfolipídios e ácidos nucleicos (Mendes; Reis Júnior, 2003). Uma parte do P orgânico é imobilizada na biomassa microbiana, constituindo um reservatório dinâmico do elemento no solo. As práticas agrícolas, a sazonalidade e a fertilidade do solo influenciam a dinâmica desse pool de fósforo (Mendes; Reis Júnior, 2003).

As plantas podem absorver o P do solo de duas maneiras: diretamente por meio de seu sistema radicular, especialmente por meio dos pelos radiculares, e de forma indireta por intermédio da simbiose com fungos micorrízicos. Contudo, devido à taxa lenta de difusão do P- inorgânico no solo, a absorção direta só é possível na rizosfera. Os pelos radiculares desempenham um papel

crucial ao ampliar a área de superfície radicular para a absorção de nutrientes, principalmente em condições de baixo P. Proteínas de transporte de elevada afinidade situadas nas células da raiz absorvem P do solo contra o gradiente de concentração, dependendo da acidificação ativa do solo pela planta para promover o transporte simultâneo de P e íons de hidrogênio (Kraus *et al.*, 1987; Smith; Anderson, 2015).

Além disso, a exsudação de ácidos orgânicos, como ácido glicônico e 2-ceto glicônico pelas raízes das plantas, especialmente leguminosas, acidifica o ambiente da rizosfera, aumentando a atividade da fosfatase ácida, que mineraliza o fósforo orgânico (Gomez-Zepeda *et al.*, 2021). Enzimas como as fosfatases ácidas e alcalinas são indicadores sensíveis da menor disponibilidade de P no solo e da eficiência dos processos de ciclagem de P (Amadou *et al.*, 2021; Aponte *et al.*, 2020; Gomez-Zepeda *et al.*, 2021; Marra *et al.*, 2019). A atividade da fosfatase ácida é influenciada por diversos fatores, sendo os principais a baixa disponibilidade de fósforo no solo e a disponibilidade de carbono para os microrganismos. A escassez de fósforo estimula a produção da enzima para disponibilizar o fósforo orgânico (Manzoor *et al.*, 2022), enquanto a disponibilidade de carbono é essencial para a sua síntese. Além disso, fatores abióticos como pH, temperatura, umidade e textura do solo também afetam sua atividade (Sun *et al.*, 2020).

A eficiência do uso de P nas plantas é controlada tanto pela absorção de P, ou eficiência de aquisição de P, quanto pela eficiência de utilização de P (Manschadi *et al.*, 2014; Mendes *et al.*, 2014). A eficiência de aquisição é administrada pelos processos da planta, abrangendo alterações na estrutura da raiz, produção de ácidos orgânicos, prótons e fosfatase, e a ativação de transportadores de alta afinidade (Frossard *et al.*, 2016; Lynch; Brown, 2001), bem como por meio de associações com micorrizas (Bucher, 2007). A arquitetura do sistema radicular das plantas, por exemplo, influencia a atividade das fosfatases, raízes finas e densas podem aumentar a atividade microbiana e, conseqüentemente, a atividade das fosfatases no solo (Liu, 2021). A eficiência de utilização do P, é conduzida pelo transporte de P dentro da planta e pela remobilização e repartição do P interno, que são importantes para conservar o

metabolismo da planta sob baixas concentrações de P (Dörmann, 2013; Parentoni *et al.*, 2012).

Os microrganismos solubilizadores de fosfato desempenham importante função no ciclo do P nos solos, pois podem aumentar a disponibilidade deste nutriente para as plantas. Existem diversos mecanismos pelos quais esses microrganismos promovem a solubilização de P. Primeiramente, eles liberam enzimas extracelulares, realizando mineralização bioquímica (Sharma *et al.*, 2013). Também, durante a degradação do substrato, ocorre a liberação de P, conhecida como mineralização biológica (Jindo *et al.*, 2023). Adicionalmente, esses microrganismos secretam complexos ou compostos que dissolvem minerais, como sideróforos, prótons, íons hidroxila e ácidos orgânicos, permitindo a solubilização do fosfato (Cui *et al.*, 2022).

Outro mecanismo importante é a hidrólise enzimática, onde os microrganismos solubilizadores de fósforo produzem enzimas que liberam fósforo fitodisponível a partir da matéria orgânica (Jindo *et al.*, 2023). Esses processos interligados demonstram a importância dos microrganismos solubilizadores de fosfato na disponibilização eficaz deste nutriente para as plantas, destacando a rede de interações biológicas no solo (Sharma *et al.*, 2013; Cui *et al.*, 2022; Jindo *et al.*, 2023).

A ciclagem de P orgânico e o P da biomassa microbiana estão entre as principais estratégias para aumentar o fornecimento desse nutriente às plantas, principalmente em sistemas com baixa fertilidade do solo, nos quais a matéria orgânica é a principal fonte de P (Dodd; Sharpley, 2015; Garland *et al.*, 2017), assim como em sistemas orgânicos.

Em sistemas de baixo *input* o consórcio entre diferentes espécies de plantas pode ser uma alternativa para melhorar o aproveitamento do P (Zerssa *et al.*, 2021). Darch *et al.* (2018) observaram acúmulo de P entre 10% e 70% maior na cevada (*Hordeum vulgare* L.) quando essa foi consorciada com leguminosas. Este fenômeno foi atribuído ao uso complementar de P entre as espécies consorciadas.

### 3 OBJETIVO

Avaliar o potencial das plantas de cobertura, isoladas e em mistura (mix), na dinâmica de N e P no solo, na nutrição mineral e produção de milho em sistema de plantio direto orgânico.

### 4 MATERIAL E MÉTODOS

#### 4.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido no ano agrícola 2022/23, em área pertencente ao Departamento de Desenvolvimento Rural (DDR), localizado no Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), no município de Araras, SP, situado a 690 m de altitude, sob as coordenadas geográficas de latitude 22°18'27,75" Sul e longitude 47°23'09,83" Oeste.

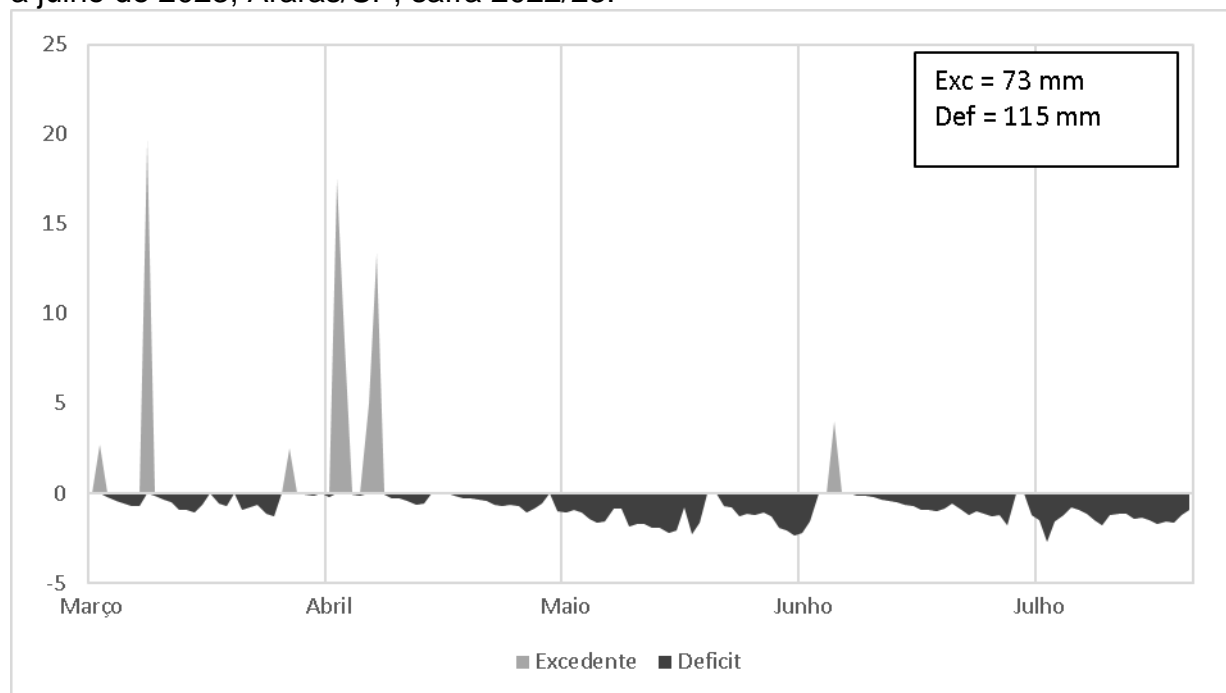
O clima da região é o Cwa, tropical úmido, caracterizado por verões quentes e úmidos com invernos secos (KÖPPEN, 1948). Os valores das temperaturas mínima, média e máxima e precipitação pluviométrica registradas mensalmente ao longo do experimento estão sumarizados na Tabela 1. A precipitação média diária foi utilizada para a confecção do balanço hídrico mensal para a cultura do milho (SISDAGRO, 2023) (Figura 1).

**Tabela 1.** Temperaturas mínima, média e máxima (°C) e precipitação pluviométrica (mm) registradas durante os meses de condução do experimento. Araras-SP, safra 2022/23.

Meses	Temperatura C°			Precipitação mm
	Mínima	Máxima	Média	Total
Nov. 2022	19,4	25,6	22,4	99,1
Dez. 2022	20,1	27,4	22,6	312,6
Jan. 2023	19,1	25,2	22,6	200,1
Fev. 2023	21	25,2	23,2	236,0
Mar. 2023	21,2	26,3	23,6	173,1
Abri. 2023	18,0	23,8	21,2	168,5
Mai. 2023	16,7	23,0	19,5	76,6
Jun. 2023	12,2	20,7	17,7	87,2
Jul. 2023	14,7	22,2	18,7	2,5

Fonte: Grupo de Estudos e Práticas em Irrigação (GEPI), UFSCar, *campus* de Araras, SP.

**Figura 1.** Balanço hídrico mensal para a cultura do milho, no período de março a julho de 2023, Araras/SP, safra 2022/23.



A área experimental é conduzida em sistema orgânico há doze anos. Nas safras de verão cultiva-se milho consorciado com adubos verdes, entre eles feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L.) DC) (2009/10, 2010/11 e 2011/12); puerária (*Pueraria phaseoloides* (Roxb.) Benth), soja perene (*Neonotonia wightii* (Wight: Arn.)) e calopogônio (*Calopogonium mucunoides* Desv.) (2013/14 e 2014/15); crotalária (*Crotalaria spectabilis* Roth) (2016/17), crotalária e guandu-anão (*Cajanus cajan* L. Millsp) (2017/18 e 2018/19). Já nas entressafras cultivam-se adubos verdes de inverno, como a aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb). Na safra e entressafra de 2021/22, antecessoras à condução do experimento, a área permaneceu em pousio, sem o cultivo do milho e de plantas de cobertura.

O solo da área é classificado como Nitossolo Vermelho Distroférico latossólico, de textura argilosa (Yoshida; Stolf, 2016), com as seguintes características químicas (0-0,20 m): P resina = 37 mg dm<sup>-3</sup>, matéria orgânica (MO) = 32,8 mg dm<sup>-3</sup>, pH (CaCl<sub>2</sub>) = 5,71, K = 7,11 mmolc dm<sup>-3</sup>, Ca = 65,0 mmolc dm<sup>-3</sup>, Mg = 16,2 mmolc dm<sup>-3</sup>, H+Al = 18,2 mmolc dm<sup>-3</sup>, Al < 0,1 mmolc dm<sup>-3</sup>, SB = 88,7 mmolc dm<sup>-3</sup>, CTC = 106,9 mmolc dm<sup>-3</sup>, V = 83%, S = 4 mg dm<sup>-3</sup>, B = 0,45

mg dm<sup>-3</sup>, Cu = 1,9 mg dm<sup>-3</sup>, Fe = 12,9 mg dm<sup>-3</sup>, Mn = 14,3 mg dm<sup>-3</sup>, Zn = 4,9 mg dm<sup>-3</sup>, Na = 9,1 mg dm<sup>-3</sup> e Si = 13,1 mg kg<sup>-1</sup>.

#### 4.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi os blocos casualizados, com cinco repetições e quatro tratamentos. Os tratamentos foram: (1) Mix das plantas de cobertura: *Crotalaria ochroleuca* G. Don, guandu-anão (*Cajanus cajan* L. Millsp), milho (*Pennisetum glaucum* L. R. Brown), trigo mourisco (*Fagopyrum esculentum* Moench); (2) *C. ochroleuca*; (3) milho e (4) vegetação espontânea/pousio.

#### 4.3 Condução do experimento

As plantas de cobertura foram semeadas em novembro de 2022, a lanço, após uma operação de gradagem (grade média). O mix foi semeado na densidade de 40 kg ha<sup>-1</sup> de sementes (8 kg de *C. ochroleuca*, 8 kg de guandu-anão, 16 kg de milho e 8 kg de trigo mourisco); a *C. ochroleuca* na densidade de 30 kg ha<sup>-1</sup> de sementes e o milho na densidade de 20 kg ha<sup>-1</sup> de sementes (Calegari; Carlos, 2014). As sementes de *C. ochroleuca*, cultivar comum, apresentavam pureza de 98%, as sementes de guandu-anão, cultivar IAPAR Arata 43, com pureza de 98%, as sementes de milho, cultivar BRS 1501, com a pureza de 95% e as sementes de trigo mourisco, cultivar IPR 92 – Altar, com a pureza de 97%.

Em março de 2023, 100 dias após emergência (DAE), as plantas de cobertura foram roçadas rentes ao solo. A *C. ochroleuca*, o milho e guandu-anão estavam no final do florescimento e o trigo mourisco em senescência (final do ciclo). O milho foi semeado sobre os resíduos vegetais das plantas de cobertura, em sistema de plantio direto, na população de 55 mil plantas por hectare. A variedade de milho utilizada foi a cultivar IAC Airan. O espaçamento entre as linhas do milho foi de 0,7m. A parcela experimental teve a dimensão de 5 x 5 m. As avaliações das plantas de cobertura foram realizadas no centro de cada parcela e as do milho foram realizadas nas três linhas centrais, excluindo-se 0,5 m de cada extremidade.

O milho, após a emergência, foi adubado com composto orgânico, na dose equivalente a 10,5 t ha<sup>-1</sup> de massa seca. O composto foi aplicado sobre o solo ao lado da linha de semeio do milho. As características químicas do composto orgânico, em base seca, são: N = 0,54%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 1,2%, K = 1,05%, Ca = 8,10%, Mg = 0,46%, S = 0,68%, MO = 16,26%, CO = 9,03; C:N = 17; Cu = 0,006%, Fe = 1,949%, Mn = 0,062%, Zn = 0,014%, B = 0,001%, Na = 0,942% e físicas: densidade 0,744 kg L<sup>-1</sup>.

O manejo das plantas espontâneas foi realizado no estágio V4 (4 folhas expandidas) do milho, com auxílio de roçadeira costal nas entrelinhas e enxada nas linhas de semeadura. O controle da lagarta-do-cartucho (*Spodoptera frugiperda* J. E. Smith.) foi realizado no estágio V3 (3 folhas expandidas) do milho, utilizando-se o inseticida Tracer®, aplicado em área total na dose de 50 ml ha<sup>-1</sup>, seguindo as indicações do fabricante. Para o controle da cigarrinha do milho (*Dalbulus maidis* DeLong: Wolcott), foi utilizado o produto Bovemip®, na dose de 1kg ha<sup>-1</sup>, do produto comercial. As espigas de milho foram colhidas manualmente, no estágio R6 (maturação fisiológica).

## 4.4 Avaliações

### 4.4.1 Plantas de cobertura

A biomassa das plantas de cobertura e vegetação espontânea foram avaliadas aos 100 dias após a emergência (DAE). Para avaliação, foram coletadas três amostras de biomassa presentes em 1m<sup>2</sup> por parcela, utilizando moldura metálica, com dimensão de 1m x 1m, lançadas aleatoriamente no centro da parcela. As plantas foram cortadas rente ao solo, colhidas e pesadas em balança portátil para a determinação da massa verde (MV), em kg ha<sup>-1</sup>. Para os cálculos, utilizou-se o valor médio das três amostras coletadas.

Posteriormente, as amostras coletadas foram colocadas em estufa com ventilação de ar forçada, com temperatura de 65°C, até atingir peso constante, para a determinação da massa de matéria seca (MS), em kg ha<sup>-1</sup>. Para os cálculos, utilizou-se o valor médio das três amostras de biomassa seca.

As amostras secas das plantas de cobertura foram processadas em moinho tipo Willey e encaminhadas ao laboratório para a determinação dos

teores de macronutrientes (Malavolta; Vitti; Oliveira, 1989) e de lignina em detergente ácido (Van Soest, 1963).

O teor de massa seca das plantas de cobertura e do mix foi calculado dividindo o valor da massa seca pela massa verde, e multiplicando o resultado por 100. Assim, obteve-se as porcentagens (%) de teor de massa seca para cada tipo de cobertura do solo.

Para determinar o acúmulo de macronutrientes na biomassa das plantas de cobertura, os valores obtidos em  $\text{g kg}^{-1}$  foram multiplicados pelos resultados obtidos para massa seca ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).

#### **4.4.2 Dinâmica de N e P no solo**

Os teores de amônio, nitrato, fósforo (resina) e atividade enzimática das fosfatases ácida e alcalina no solo, foram avaliados em três épocas: aos 90 dias após o plantio das plantas de cobertura (DAP) e, nos estádios V6 (6 folhas expandidas), aos 35 DAP e VT (pendoamento), aos 65 DAP do milho. Para cada época foi realizada uma amostra composta (formada por quatro subamostras) de solo por parcela. As amostras foram retiradas no centro de cada parcela experimental, em forma de cruz, ou seja, duas amostras na linha de cultivo e duas amostras a aproximadamente 0,30 m dessa, na profundidade de 0-0,20 m de solo, utilizando o trado holandês, metodologia adaptada de Bonfanti (2019). As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e depositadas em caixas isotérmicas com gelo reciclável durante o transporte até o laboratório. No laboratório, as amostras compostas coletadas por parcela foram subdivididas em três subamostras para diferentes análises:

Teores de amônio e nitrato no solo, as amostras de solo destinadas à quantificação de amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) foram armazenadas congeladas até a análise. A determinação desses nutrientes seguiu a metodologia de Kjeldahl (Yasuhara: Nokihara, 2001), e os resultados expressos em  $\text{mg kg}^{-1}$  de solo seco.

Teores de P (resina), as amostras para a determinação do fósforo retido em resina foram mantidas em temperatura ambiente até a análise. A metodologia



utilizada foi a proposta por Teixeira et al. (2017), e os resultados expressos em  $\text{mg kg}^{-1}$  de solo seco.

Atividade enzimática de fosfatase ácida e alcalina, as amostras foram armazenadas em temperatura ambiente até a quantificação da atividade enzimática, a metodologia foi a proposta por Tabatabai (1994) e os resultados expressos em  $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ .

### **4.4.3 Milho**

#### **4.4.3.1 Índice de clorofila Falker**

As avaliações do índice de clorofila Falker foram realizadas nos estádios fenológicos V4 e R1 (emissão da espiga) do milho, em 10 plantas aleatórias, localizadas nas três linhas centrais de cada parcela, com auxílio de clorofilômetro - ClorofiLOG® modelo CFL 1030. No estádio V4, foram realizadas duas leituras no terço médio da última folha expandida, e no estádio R1, foram realizadas duas leituras no terço médio da primeira folha abaixo e oposta à espiga (Kappes *et al.*, 2013).

#### **4.4.3.2 Características agronômicas**

No estádio VT (pendoamento) do milho foram avaliadas a altura de planta e de inserção da última espiga. A altura de planta foi avaliada, medindo-se da base da planta no solo até a inserção do pendão (m), em 10 plantas localizadas nas três linhas centrais por parcela. A altura de inserção da última espiga foi obtida medindo a distância da base da planta no solo até a o pedúnculo da última espiga (m), em 10 plantas localizadas nas três linhas centrais por parcela.

#### **4.4.3.3 Estado nutricional**

O estado nutricional das plantas foi avaliado no estádio VT do milho coletando-se a folha oposta e abaixo da espiga, de 10 plantas distribuídas nas três linhas centrais, por parcela. As folhas, após exclusão da nervura central, foram secas em estufa com ventilação forçada, na temperatura de 65°C, até atingirem massa constante. Posteriormente, as amostras foram processadas em

moinho tipo Willey e analisadas quanto aos teores de macronutrientes (Malavolta; Vitti; Oliveira, 1989).

#### **4.4.3.4 Componentes de produção**

Foram colhidas todas as espigas de milho das plantas localizadas nas três linhas centrais de cada parcela, excluindo as das extremidades. As espigas foram processadas em debulhador elétrico estacionário. Os grãos foram pesados em balança para determinar a massa total de grãos. Em seguida, três amostras de 1000 grãos por parcela foram pesadas para determinar a massa de 1000 grãos, sendo utilizada a massa média das três amostras. A massa de grãos total e a massa de 1000 grãos foram corrigidas para 13% de umidade. Os dados foram apresentados em produtividade de grãos ( $t\ ha^{-1}$ ) e massa média de 1000 grãos (g).

#### **4.5 Análise dos dados**

As variáveis da dinâmica de N e P no solo, das plantas de cobertura e do milho foram submetidas a análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey em nível de 5% de significância. As variáveis teores de amônio, nitrato, fósforo e atividade das enzimas fosfatases ácida e alcalina, referentes a dinâmica do N e P no solo foram analisadas no delineamento de blocos casualizados com 5 repetições, em esquema fatorial  $4 \times 3$ , sendo o primeiro fator as quatro plantas de cobertura e o segundo fator as três épocas de amostragem do solo. As demais variáveis foram analisadas no delineamento de blocos casualizados com 5 repetições e 4 tratamentos (plantas de cobertura).

### **5 RESULTADOS**

#### **5.1 Plantas de cobertura**

O mix das plantas de cobertura apresentou a maior produção de massa verde quando comparado com *C. ochroleuca*, mas não diferiu do milheto e da vegetação espontânea (Tabela 2)

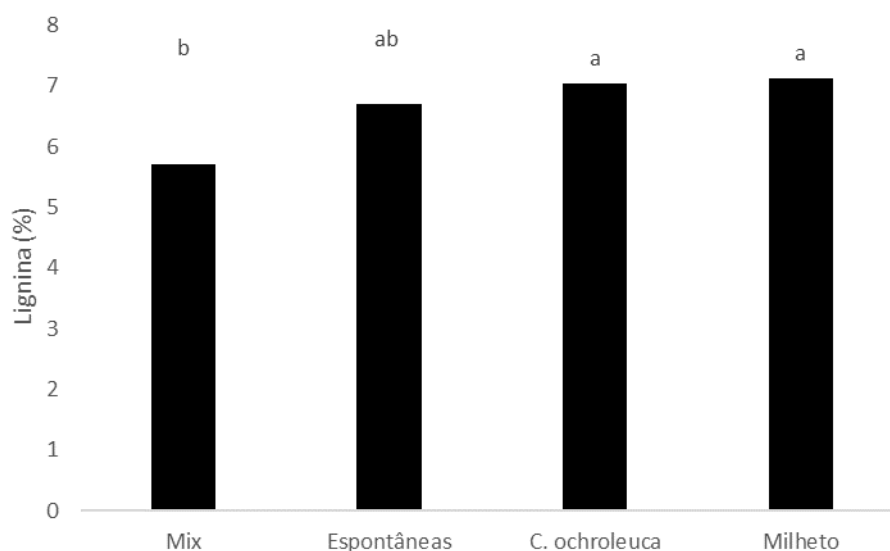
**Tabela 2.** Produção de massa de matéria verde, massa de matéria seca e teor de massa seca das plantas de cobertura do solo aos 100 dias após a emergência. Safra 2022/23. Araras, SP.

Plantas de cobertura	Massa verde t ha <sup>-1</sup>	Massa seca	Teor de MS %
Mix	63,94 a <sup>1</sup>	15,20 <sup>ns</sup>	23,83 b
Milheto	49,33 ab	13,90	28,19 a
<i>C. ochroleuca</i>	39,80 b	10,97	27,39 a
Vegetação espontânea	47,95 ab	11,92	24,89 b
CV (%)	17,72	19,82	4,80

<sup>ns</sup>Não significativo de acordo com o teste F em nível de 5% de probabilidade. <sup>1</sup>Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey em nível de 5% de significância. CV (%): coeficiente de variação.

. O mix apresentou o menor teor de lignina em comparação ao milheto e a *C. ochroleuca* e não diferiu da vegetação espontânea (Figura 2).

**Figura 2.** Teor de lignina na massa de matéria seca das plantas de cobertura aos 100 dias após emergência. Safra 2022/23. Araras, SP.



Médias seguidas pelas mesmas letras, nas barras, não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey em nível de 5% de significância.

Para o acúmulo de macronutrientes na massa de matéria seca das plantas de cobertura, verificou-se que a *C. ochroleuca* acumulou mais N em relação ao milheto e a vegetação espontânea e não diferiu do mix (Tabela 3). O mix de plantas, por sua vez, apresentou o maior acúmulo de fósforo (Tabela 3). Já a

vegetação espontânea teve maior acúmulo de K e Mg quando comparado com a *C. ochroleuca* e o maior de Ca que o milho.

**Tabela 3.** Macronutrientes acumulados na massa de matéria seca das plantas de cobertura aos 100 dias após emergência. Safra 2022/23. Araras, SP.

Coberturas	N	P	K	Ca	Mg	S
	kg ha <sup>-1</sup>					
Milheto	183,11b	29,36 b	301,56 ab	39,75 b	28,32 ab	24,76 b
Mix	280,79 ab	52,53 a	373,38 ab	45,61 ab	36,62 ab	46,33 a
<i>C. ochroleuca</i>	331,51 a	29,01 b	232,16 b	58,64 ab	23,01 b	22,88 b
V. espontânea	193,91b	31,16 b	400,47 a	71,31 a	44,83 a	30,94 ab
CV (%)	27,49	19,76	24,52	27,74	29,26	30,99

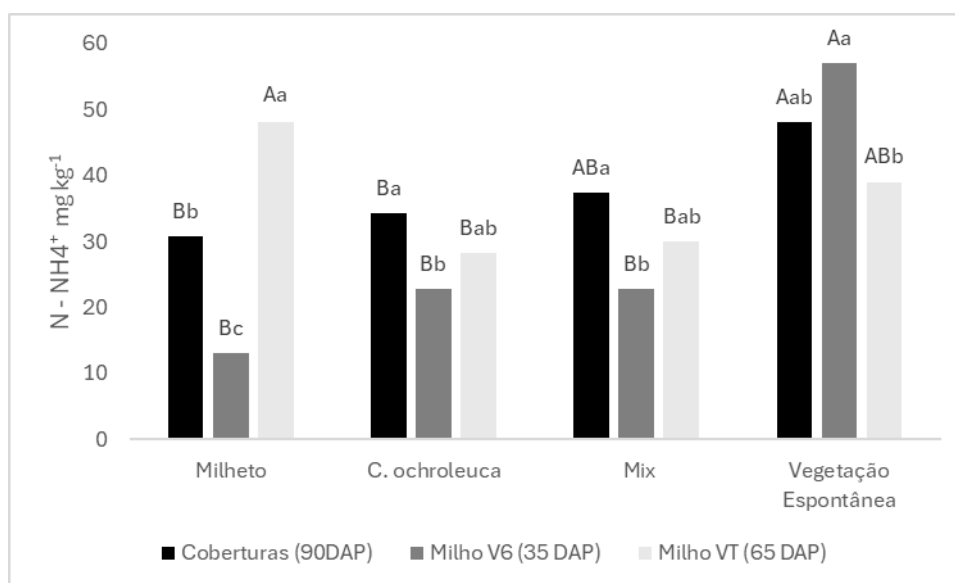
Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey em nível de 5% de significância. CV (%): coeficiente de variação.

## 5.2 Dinâmica de N e P no solo

### Amônio

Para o teor de amônio no solo, houve interação entre as plantas de cobertura e as épocas de avaliação. Para a avaliação realizada aos 90 DAP das coberturas o maior teor de amônio no solo ocorreu na vegetação espontânea que não diferiu do mix (Figura 3).

**Figura 3.** Teor de amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) no solo em função das coberturas e épocas de avaliação: plantas de cobertura aos 90 dias após plantio (DAP), estádios fenológicos de seis folhas expandidas do milho (V6) aos 35 DAP e pendoamento do milho (VT) aos 65 DAP. Safra 2022/23. Araras, SP.



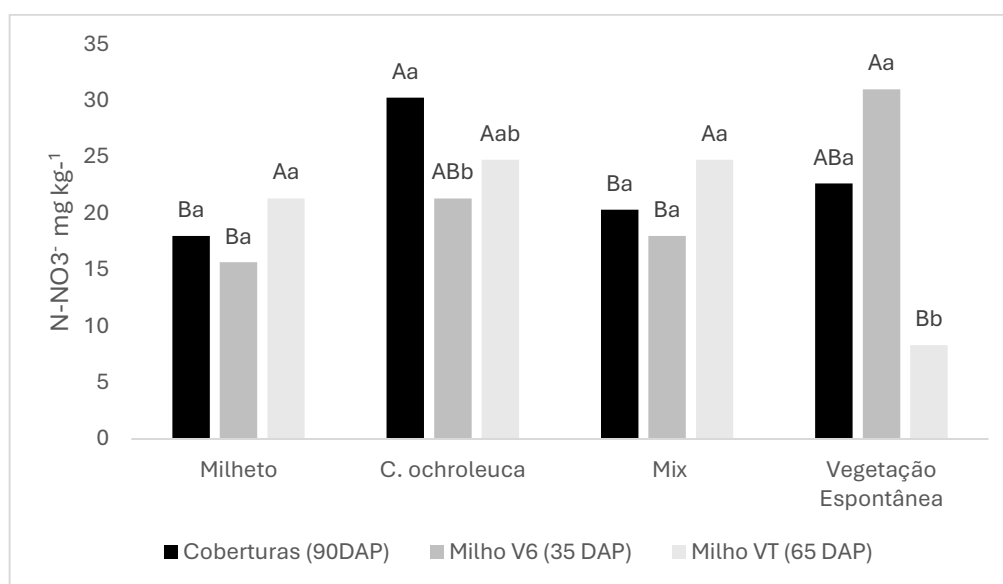
Médias nas barras seguidas pelas mesmas letras, minúsculas, dentro das coberturas do solo e entre as épocas de avaliação e maiúsculas, dentro das épocas de avaliação e entre as coberturas do solo, não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey em nível de 5 % de significância.

No estágio V6 do milho o maior teor de amônio ocorreu na vegetação espontânea e as demais plantas de cobertura não diferiram entre si (Figura 3). Já no estágio VT do milho os menores teores de amônio no solo foram verificados na *C. ochroleuca* e mix, que não diferiram na vegetação espontânea. (Figura 3). Analisando as coberturas isoladamente, o teor de amônio no solo teve comportamento semelhante para a *C. ochroleuca* e o mix, maior teor na avaliação realizada aos 90DAP das coberturas, menor no estágio V6 do milho e volta a aumentar no estágio VT do milho (Figura 3). No milheto o maior teor de amônio no solo ocorreu no estágio VT do milho e na vegetação espontânea no estágio V6 do milho que não diferiu da avaliação realizada aos 90 DAP das coberturas (Figura 3).

### **Nitrato**

Para o nitrato no solo houve interação entre as plantas de cobertura e as épocas de avaliação. Na avaliação realizada nas plantas de cobertura aos 90 DAP o maior teor de nitrato foi verificado na *C. ochroleuca*, que não diferiu da vegetação espontânea. Resultado semelhante foi observado no estágio V6 do milho (Figura 4).

**Figura 4.** Teor de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) no solo em função das coberturas e épocas de avaliação: plantas de cobertura aos 90 dias após plantio (DAP), estádios fenológicos de seis folhas expandidas do milho (V6) aos 35 DAP e pendoamento do milho (VT) aos 65 DAP. Safra 2022/23. Araras, SP.



Médias nas barras seguidas pelas mesmas letras, minúsculas, dentro das coberturas do solo e entre as épocas de avaliação e maiúsculas, dentro das épocas de avaliação e entre as coberturas do solo, não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey em nível de 5 % de significância.

Porém, no estágio VT do milho o menor teor de nitrato no solo foi observado na vegetação espontânea e as demais coberturas não diferiram entre si (Figura 4).

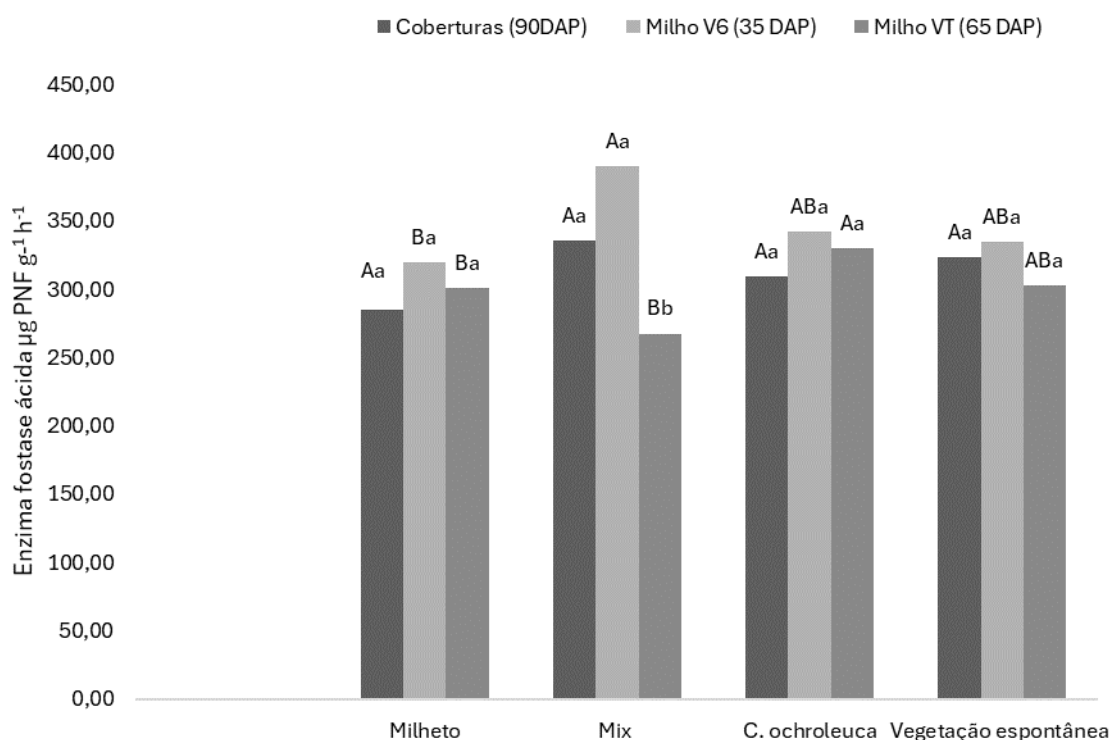
Analisando as plantas de cobertura isoladamente, o milheto e o mix mantiveram os teores de nitrato no solo estáveis entre as épocas de avaliação. Já na *C. ochroleuca* o teor de nitrato no solo foi menor no estágio V6 do milho e na vegetação espontânea no estágio VT do milho (Figura 4).

### Atividade enzimática fosfatase ácida

Para a atividade da enzima fosfatase ácida no solo, houve efeito da interação plantas de coberturas e épocas de avaliação. Na avaliação realizada aos 90 DAP das plantas de coberturas não houve diferença na atividade da enzima (Figura 5). No estágio V6 do milho, a menor atividade da fosfatase ácida no solo foi verificada no milheto e a maior no mix, o qual não diferiu da *C. ochroleuca* e vegetação espontânea (Figura 5). No pendoamento do milho (VT), as menores atividades foram verificadas no milheto e no mix e a maior na *C. ochroleuca* que não diferiu da vegetação espontânea (Figura 5). Entre as plantas coberturas do solo a atividade da fosfatase ácida não variou entre as épocas de

avaliação para o milho, *C. ochroleuca* e vegetação espontânea. Porém, para o mix, a menor atividade foi verificada no estágio VT do milho (Figura 5).

**Figura 5.** Atividade da enzima fosfatase ácida em função das coberturas do solo e das épocas de avaliação: plantas de cobertura aos 90 dias após plantio (DAP), estádios fenológicos de seis folhas expandidas do milho (V6) aos 35 DAP e pendoamento do milho (VT) aos 65 DAP. Safra 2022/23. Araras, SP.

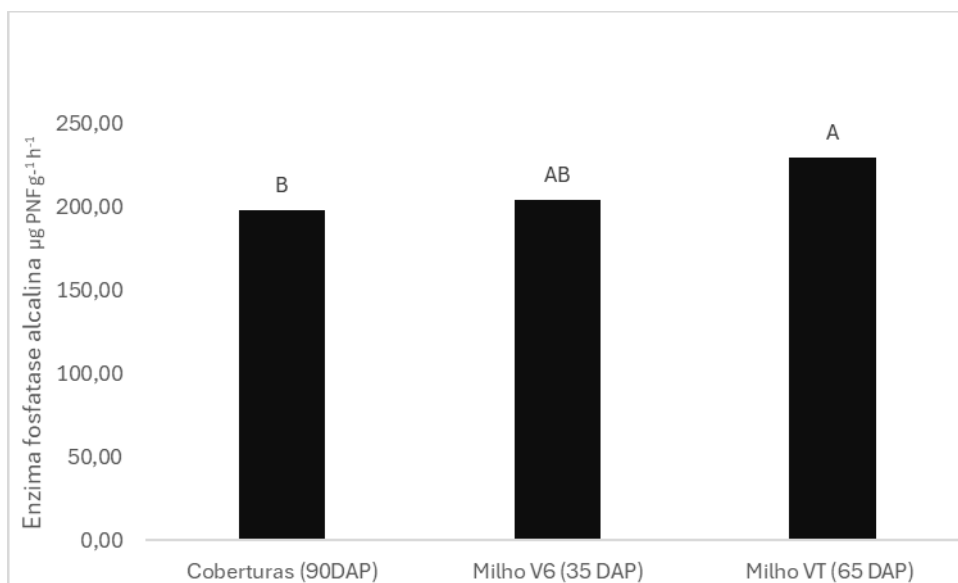


Médias nas barras seguidas pelas mesmas letras, minúsculas, dentro das coberturas do solo e entre as épocas de avaliação e maiúsculas, dentro das épocas de avaliação e entre as coberturas do solo, não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey em nível de 5 % de significância

### Atividade enzimática fosfatase alcalina

Para a variável atividade da enzima fosfatase alcalina houve efeito isolado das épocas de avaliação. A menor atividade foi verificada na avaliação realizada aos 90 DAP das plantas de cobertura do solo e a maior no estágio VT do milho (Figura 6).

**Figura 6.** Atividade da enzima fosfatase alcalina em função das épocas de avaliação: plantas de cobertura aos 90 dias após plantio (DAP), estádios fenológicos de seis folhas expandidas do milho (V6) aos 35 DAP e pendoamento do milho (VT) aos 65 DAP. Safra 2022/23. Araras, SP.



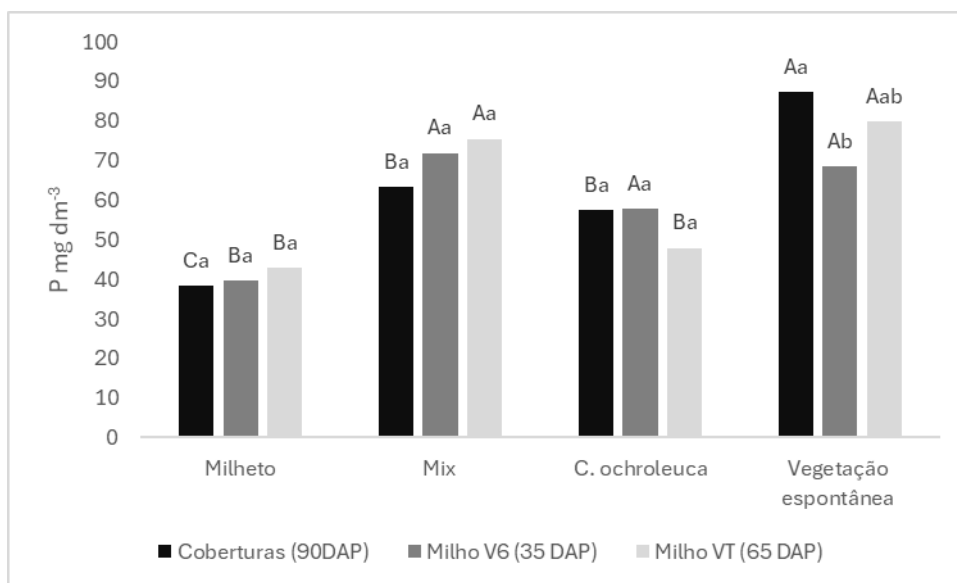
Médias nas barras, seguidas pelas mesmas letras, não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey em nível de 5% de significância.

### Fósforo disponível

Para o teor de P disponível no solo houve efeito da interação das plantas de coberturas e épocas de avaliação. Na avaliação realizada aos 90 DAP das plantas de cobertura o maior teor de P no solo ocorreu na vegetação espontânea e o menor no milheto, já para o mix e *C. ochroleuca* os teores de P no solo foram semelhantes (Figura 7).

**Figura 7.** Teor de P disponível no solo em função das plantas de cobertura e épocas de avaliação: plantas de cobertura aos 90 dias após plantio (DAP), estádios fenológicos de seis folhas expandidas do milho (V6) aos 35 DAP e pendoamento do milho (VT) aos 65 DAP. Safra 2022/23. Araras, SP.





Médias nas barras seguidas pelas mesmas letras, minúsculas, dentro das coberturas do solo e entre as épocas de avaliação e maiúsculas, dentro das épocas de avaliação e entre as coberturas do solo, não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey em nível de 5 % de significância.

No estágio V6 do milho, o menor teor de P disponível no solo foi verificado no milheto e as demais coberturas não diferiram entre si (Figura 7). Na avaliação realizada no estágio VT do milho os maiores teores de P disponível foram observados no mix e vegetação espontânea. Analisando as plantas de coberturas, apenas a vegetação espontânea teve redução no teor de P disponível no solo no estágio VT do milho (Figura 7).

### 5.3 Milho

O índice de clorofila Falker (ICF) das folhas de milho no estágio V4 não foi alterado pelas plantas de cobertura (Tabela 4). Porém, no estágio R1, o menor ICF foi observado no milho semeado sobre a palha de milheto, enquanto para as demais coberturas não houve diferença (Tabela 4).

O mix proporcionou a maior altura de plantas em relação à vegetação espontânea e a maior altura de inserção da espiga em comparação ao milheto e à vegetação espontânea (Tabela 4).

**Tabela 4.** Índice de clorofila Falker (ICF) foliar nos estádios de quatro folhas expandidas (V4) e emissão da espiga (R1), altura de plantas e altura de inserção da espiga de milho em função das coberturas do solo. Safra 2022/23. Araras, SP.

Coberturas	ICF		Altura	
	V4	R1	Planta	Espiga
			----m----	
<i>C. ochroleuca</i>	36,14 <sup>ns</sup>	41,33 a <sup>1</sup>	1,70 ab	0,69 ab
Milheto	37,17	37,75 b	1,61 ab	0,66 b
Mix	38,12	41,03 a	1,73 a	0,76 a
Vegetação espontânea	35,97	42,26 a	1,56 b	0,67 b
CV (%)	4,57	3,34	4,70	6,57

<sup>ns</sup>Não significativo de acordo com o teste F em nível de 5% de probabilidade. <sup>1</sup>Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey em nível de 5% de significância. CV (%): coeficiente de variação.

Para os teores de macronutrientes foliares no milho não houve efeito das plantas de cobertura para os nutrientes N, P, K, Ca e S (Tabela 5). O maior teor de Mg nas folhas de milho foi observado quando a *C. ochroleuca* foi utilizada como cobertura (Tabela 5).

**Tabela 5.** Teor de macronutrientes foliares no milho em função das plantas de cobertura. Safra 2022/23. Araras, SP.

Coberturas	N	P	K	g kg <sup>-1</sup>		
				Ca	Mg	S
<i>C. ochroleuca</i>	27,00 <sup>ns</sup>	3,81 <sup>ns</sup>	23,00 <sup>ns</sup>	3,50 <sup>ns</sup>	2,25 a	2,08 <sup>ns</sup>
Milheto	27,25	4,00	22,00	3,00	1,80 ab	2,50
Mix	21,75	3,84	21,00	3,25	1,57 b	2,40
Vegetação espontânea	29,27	3,95	23,75	3,25	1,75 ab	2,37
CV (%)	19,24	8,40	10,69	17,76	18,49	13,65

<sup>ns</sup>Não significativo de acordo com o teste F em nível de 5% de probabilidade. <sup>1</sup>Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey em nível de 5% de significância. CV (%): coeficiente de variação.

A massa de mil grãos não foi influenciada pelas plantas de cobertura e a maior produtividade de grãos de milho foi verificado quando a *C. ochroleuca* foi utilizada como cobertura em comparação com as demais, que não diferiram entre si (Tabela 6).

**Tabela 6.** Massa de mil grãos e produtividade do milho em função das plantas de cobertura. Safra 2022/23. Araras, SP.

Coberturas	Massa 1000 grãos g	Produtividade t ha <sup>-1</sup>
<i>C. ochroleuca</i>	242,93 <sup>ns</sup>	3,69 a
Milheto	243,08	2,19 b
Mix	244,12	2,47 b
Vegetação espontânea	234,00	2,24 b
CV (%)	5,63	23,99

<sup>ns</sup>Não significativo de acordo com o teste F em nível de 5% de probabilidade. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey em nível de 5% de significância. CV (%): coeficiente de variação.

## 6 DISCUSSÃO

### 6.1 Plantas de cobertura

Os valores de massa verde e seca da *C. ochroleuca* obtidos foram superiores aos 23,23 e 8,77 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente, relatados para a espécie por Amabile, Fancelli e Carvalho (2000), quando semeada no mês de novembro e avaliada aos 136 dias após semeadura em local com precipitação total (1092,8 mm), superior a observada no presente experimento (847,8 mm) (Tabela 1). Também, a massa seca do milheto foi superior a 6,01 t ha<sup>-1</sup> obtida quando a espécie foi semeada no mês de setembro no município de Leopoldina- MG, nesse caso, a precipitação pluviométrica foi inferior ao do experimento. As médias de massa seca da *C. ochroleuca* e do milheto correspondem às faixas de 7 a 10 t ha<sup>-1</sup> e 10 a 15 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente, relatadas para as espécies por Calegari e Carlos (2014).

A elevada produção de massa verde e seca da vegetação espontânea (Tabela 2) deveu-se as espécies presentes na comunidade, com predominância da família *Poaceae*, como o capim-pé-de-galinha (*Eleusine indica*) e o capim colônio (*Megathyrus maximus*). Além das espécies mencionadas, a vegetação espontânea incluiu em menor densidade: cordão-de-frade (*Leonotis nepetifolia*), juá-de-capote (*Nicandra physaloides*), apaga-fogo (*Alternanthera tenella*) e desmodium (*Desmodium tortuosum*).

Quanto ao mix das plantas de cobertura, era esperado maior produção de massa de matéria seca em relação as demais plantas de cobertura. No entanto,

as espécies que o compuseram apresentaram diferentes ciclos de desenvolvimento. No momento da avaliação das plantas de cobertura (100 DAE), o milho e o guandu-anão estavam em pleno florescimento e a *C. ochroleuca* ainda não tinha atingido o máximo desenvolvimento vegetativo. A *C. ochroleuca* quando semeada em novembro apresenta ciclo até o florescimento de 136 dias e o milho tem o ciclo de aproximadamente 95 dias até o florescimento (Amabile; Fancelli; Carvalho, 2000). O guandu-anão concentra seu crescimento e desenvolvimento nos primeiros 60 dias após a semeadura (DAS), florescendo em torno de 90 DAS (Teodoro *et al.*, 2011). Porém, o trigo mourisco, apresentou rápido desenvolvimento inicial, estabelecendo-se antes das demais espécies no mix. Mas, em função do seu ciclo (aproximadamente 90 DAE) não persistiu na área.

A produção de massa seca do mix foi superior à obtida por Vargas (2023) com mix de composição semelhante (*C. ochroleuca*/milho/trigo mourisco/braquiária) cultivado em Dourados-MS durante duas safras de inverno, com média de 6,0 t ha<sup>-1</sup>. Provavelmente devido à menor precipitação pluviométrica no período, quando comparado ao presente experimento, aliada a possível redução na produção de massa de matéria seca da *C. ochroleuca* em decorrência do fotoperíodo, visto que as plantas de cobertura no experimento conduzido por Vargas (2023) foram semeadas no mês de março. Amabile, Fancelli e Carvalho (2000) relataram que semeaduras tardias reduzem a produção de massa de matéria seca da *C. ochroleuca*, pois a floração da espécie é determinada pela redução no comprimento do dia.

O milho e a *C. ochroleuca* apresentaram os maiores teores de lignina (Figura 2). O milho exibe maior persistência no solo em comparação com as leguminosas como feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), lablab (*Lablab purpureus* (L.) e a *Crotalaria juncea*, devido ao teor superior de lignina e à maior relação C:N em seus resíduos (Bertin; Andrioli; Centurion, 2005). No presente estudo o teor de lignina do milho (7,11%) foi superior ao valor de 3,44% relatado por Carvalho *et al.* (2010) para mesma cultura com semeadura em abril, em Planaltina - DF. De acordo com Talbot e Treseder (2012), a despolimerização da lignina gera monômeros mais resistentes à decomposição,

que interagem com outras moléculas, partículas do solo e compostos microbianos, aumentando a estabilidade e o tempo de permanência do carbono no solo.

Por outro lado, a *C. ochroleuca* comparada as outras crotalárias (*C. juncea*; *C. mucronata*; *C. spectabilis* e *C. breviflora*) apresenta rápida decomposição (Teodoro *et al.*, 2019), indicando, possivelmente, menor teor de lignina e de relação C:N, diferindo do resultado obtido nesse experimento. Carvalho *et al.* (2010) relatam teor de 4,34% de lignina na *C. juncea* semeada no mês de abril em Planaltina, DF, valor inferior ao da *C. ochroleuca* (7,03%) obtido no experimento. No presente estudo a *C. ochroleuca* foi manejada aos (100 DAE), e apresentava menor proporção de folhas em relação ao caule, o que pode explicar o teor de lignina semelhante ao do milho. Lynge *et al.* (2023) observaram que a época de corte dos adubos verdes anuais e perenes, influência na relação C:N, com corte mais tardio resultando em um aumento dessa relação. Segundo os autores, isso se deve à menor quantidade de folhas em relação ao caule, o que leva ao aumento de compostos ricos em carbono, como a lignina. Carvalho *et al.* (2010) também observaram um aumento no teor de lignina de diversas plantas de cobertura à medida que estas amadureciam, atingindo o pico no estágio de sementes.

O menor teor de lignina no mix em comparação com o milho e a *C. ochroleuca* pode estar relacionado à maior participação das leguminosas, guandu-anão e *C. ochroleuca*, as duas espécies somam 40% da densidade de sementes no mix. No entanto, no momento da avaliação aos 100 DAE, observou-se predominância da *C. ochroleuca* no mix. Estudos relatam redução da relação C:N em misturas de leguminosas com crucíferas em comparação com as plantas isoladas (Couëdell *et al.*, 2018). No entanto, Soratto *et al.* (2012) não encontraram alteração significativa na relação C:N entre as plantas de coberturas milho e *C. juncea* solteiras e o, consórcio de milho / *C. juncea*, cujos valores foram de 25, 21 e 25, respectivamente.

A *C. ochroleuca* acumulou maior quantidade de nitrogênio em comparação com as outras plantas de cobertura (Tabela 3). Esse resultado corrobora com Calegari (2014), que estima uma contribuição de 200 a 300 kg de

N ha<sup>-1</sup> para essa espécie. O mix de plantas, que incluía na composição o guandu-anão e crotalária, também apresentou alto acúmulo de nitrogênio na massa de matéria seca (280,79 kg de N por hectare), ressaltando a importância da inclusão dessas leguminosas no mix, visto que são eficientes na fixação biológica de N (FBN). Estima-se que o guandu-anão possa contribuir com 100 a 180 kg de N ha<sup>-1</sup>, <sup>1</sup> (Calegari 2014), o que, juntamente com a contribuição da crotalária, explica o alto valor de acúmulo de nitrogênio observado na massa de matéria seca do mix.

É importante ressaltar que a capacidade de FBN das leguminosas pode ser influenciada por diversos fatores, como as condições edafoclimáticas, a disponibilidade de nutrientes e a interação com outras espécies (Ledgard: Steele 1992; Kessel: Hartley 2000; Rodriguez *et al.*, 2020). Além disso, a idade da planta e o estágio de desenvolvimento podem afetar a eficiência da FBN (Liu *et al.*, 2011). A alta capacidade de FBN demonstrada pelas leguminosas utilizadas neste estudo destaca o potencial dessas espécies para reduzir a dependência de fertilizantes nitrogenados e melhorar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Wen *et al.*, 2021).

O mix se destacou entre as demais coberturas por apresentar o maior acúmulo de P (Tabela 3). Essa diferença pode ser atribuída à capacidade dessas espécies de solubilizar e mineralizar o fósforo indisponível. Entre os mecanismos que podem explicar a solubilização e mineralização de P indisponíveis estão a exsudação de ácidos orgânicos pelas raízes, como o ácido cítrico e o málico, a produção de enzimas fosfatases e a associação com microrganismos solubilizadores de fosfato são alguns dos processos envolvidos (Ascencio, 1996; Carneiro *et al.*, 2004). O guandu-anão, em particular, é conhecido por sua eficiência na aquisição de fósforo, devido à sua capacidade de acidificar o rizosfera e à formação de associações simbióticas com microrganismos (Cherubin *et al.*, 2022). Essa característica torna o mix uma excelente opção para melhorar a fertilidade do solo e reduzir a dependência de fertilizantes fosfatados.

Além, disso a mistura entre gramíneas e leguminosas podem aumentar a diversidade de bactérias fixadoras de N no solo, promovendo maior disponibilização

de nutrientes como N e P para a gramínea no mesmo ciclo (Chen *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2018), elevando o acúmulo de P no mix como um todo. Também as, misturas das plantas de cobertura podem promover o aumento da atividade microbiana e das enzimas do ciclo do P, resultando na melhor reciclagem do nutriente (Hallama *et al.*, 2021).

O maior acúmulo de S na massa de matéria seca ocorreu no mix, comparado com a *C. ochroleuca* e o milho (Tabela 3). O S é o nutriente mais demandado pelas leguminosas durante o processo de fixação biológica de N (FBN), pois compõe a enzima nitrogenase, responsável pela redução do N atmosférico ( $N_2$ ) (Nunes; Raimondi; Niedwiesk, 2003). O maior acúmulo de S no mix, provavelmente, deveu-se a maior competição entre as plantas, ou seja, as leguminosas absorveram mais S em relação as gramíneas presentes no mix, desenvolveram-se melhor e acumularam mais S, aumentando o S no mix. Ainda, o maior acúmulo de P, pode ter colaborado para a eficiência da FBN pelas leguminosas no mix e conseqüente maior acúmulo de S. A FBN é exigente em energia na forma de ATP e o fornecimento adequado de P colabora com o processo (Barea; Azcón; Azcón-Aguilar, 1992).

A vegetação espontânea apresentou os maiores acúmulos de K e Mg quando comparado com a *C. ochroleuca* e o maior de Ca em relação ao milho (Tabela 3). Favero *et al.* (2000) também verificou maior teor de K na vegetação espontânea em relação à *C. juncea* isolada ou consorciada com o milho. Perin *et al.* (2004) destacou que as espécies espontâneas, apesar de menor produção de massa de matéria seca, acumularam quantidades similares de K em comparação a *C. juncea* e o milho.

## 6.2 Dinâmica de N e P no solo

Quanto a dinâmica de N no solo, aos 90 dias após plantio (DAP) das plantas de cobertura os maiores valores de amônio foram verificados na vegetação espontânea e no mix (Figura 3). Isso indica reduzida absorção de amônio pelas plantas espontâneas, fato que corrobora com o menor acúmulo de N em sua massa seca (Tabela 3). No mix, uma das hipóteses é que aos 90 DAP, as folhas e raízes de trigo mourisco já estavam em processo de decomposição

e mineralização, aumentando os teores de amônio no solo. Para o nitrato, na mesma época de avaliação, os maiores teores foram observados na *C. ochroleuca* e na vegetação espontânea (Figura 4). Provavelmente a *C. ochroleuca*, não absorveu o nitrato presente no solo e o maior acúmulo de N observado na massa seca da espécie (Tabela 3), originou-se da FBN.

Durante os estádios de desenvolvimento do milho, em V6 o maior teor de amônio no solo ocorreu na vegetação espontânea e não houve diferença entre as demais plantas de cobertura (Figura 3). Cabe ressaltar que 15 dias anterior a análise, havia sido realizada a adubação com composto orgânico. Nesse caso, somou-se a concentração inicial do amônio advindo da decomposição e mineralização do composto orgânico com o amônio já presente no solo, verificado durante o desenvolvimento das plantas espontâneas. Também, os resíduos da vegetação espontânea apresentaram teor de lignina intermediário entre o mix (menor teor) e a *C. ochroleuca* e o milheto (maiores teores) (Figura 2), o que pode ter colaborado para o processo de decomposição e mineralização, aumentando os teores de amônio no solo.

Para o teor de nitrato no solo no estágio V6 do milho, os maiores teores foram verificados na *C. ochroleuca* e na vegetação espontânea (Figura 4). Analisando a variação dos teores de amônio e nitrato para a *C. ochroleuca* isoladamente o maior teor de ambas as formas de N foi aos 90 DAP das plantas de cobertura, o menor no estágio V6, voltando a aumentar no estágio VT do milho (Figura 4). Von Pinho *et al.* (2009), relata que o milho apresenta elevada absorção e acúmulo de N a partir de V8 (oito folhas expandidas) e posterior redução nas fases próximas ao florescimento. Assim, os teores de N no solo aparentemente acompanharam a demanda do milho. O mix apresentou comportamento semelhante ao da *C. ochroleuca* para o teor de amônio (Figura 3). Mas, o nitrato não variou entre as épocas de avaliação (Figura 4). Lama *et al.* (2020) sugerem que o aumento da riqueza de espécies de plantas pode diminuir a mineralização de N e o consumo microbiano de amônio, devido ao aumento da relação C:N das raízes. Mesmo o mix tendo apresentado menor teor de lignina em relação as outras plantas de cobertura (Figura 2).



O maior teor de amônio no solo para o milho foi verificado em VT (Figura 3) e o nitrato manteve-se estável ao longo das avaliações (Figura 4). O maior teor de lignina e menor acúmulo de N do milho podem ter contribuído para a decomposição e mineralização do N mais tardiamente próximo ao estágio VT do milho, aumentando os teores de amônio nesse estágio.

Na tentativa de compreender a dinâmica de P no solo, analisou-se a atividade enzimática das fosfatases e o teor de P no solo. A atividade da enzima fosfatase ácida não variou entre as épocas de avaliação para o milho, *C. ochroleuca* e vegetação espontânea e no mix a menor atividade foi verificada no estágio VT do milho (Figura 5). A atividade das fosfatases é frequentemente associada à baixa disponibilidade de fósforo inorgânico no solo. No entanto, a liberação dessas enzimas pelos microrganismos pode ser motivada não apenas pela necessidade de mineralizar o fósforo orgânico para suprir suas próprias demandas, mas também pela aquisição de carbono a partir de compostos orgânicos de fósforo (Lidbury *et al.*, 2022; Oberson *et al.*, 1996). Essa dupla função das fosfatases ressalta a complexidade dos processos de mineralização do fósforo no solo e a importância do fósforo orgânico como fonte de fósforo para as plantas.

O mix acumulou maior teor de P na massa seca (Tabela 3). Possivelmente, a mineralização de seus resíduos vegetais, somado a menor absorção de P pelo milho no estágio VT, contribuiu para o aumento do teor de P no solo, reduzindo a atividade da enzima. Fato confirmado pelo maior teor de P no solo verificado no mix no estágio VT do milho (Figura 6).

A atividade da fosfatase alcalina variou apenas entre as épocas de avaliação e não houve efeito das plantas de cobertura. A menor atividade foi verificada aos 90 DAP das plantas de cobertura e a maior no estágio VT do milho (Figura 7). A fosfatase ácida é produzida tanto por plantas quanto microrganismos. Por outro lado, a fosfatase alcalina é totalmente atribuída aos microrganismos (Tarafdar; Claasen, 1998). Fato que pode explicar o menor efeito das plantas de cobertura sobre a atividade da fosfatase alcalina.

Já no estágio VT do milho, a maior atividade da enzima fosfatase alcalina pode estar ligada ao estágio final da decomposição dos resíduos vegetais das

plantas espontâneas e a decomposição do composto orgânico aplicado em todos os tratamentos. Cardoso (2022) identificou maior atividade da fosfatase alcalina no final do ciclo do milho, decorridos aproximadamente 60 dias da aplicação do composto orgânico. Borase *et al.* (2020) também verificaram que a adubação orgânica proporcionou maior atividade da fosfatase alcalina quando comparado com fosfatase ácida, tal fato foi justificado pelo pH alcalino do solo (8,1). Durante a decomposição inicial dos resíduos orgânicos ocorre a acidificação do solo, devido a ionização de ácidos carboxílicos, fenólicos e álcoois terciários da matéria orgânica, entretanto no estágio final de mineralização da matéria orgânica, a oxidação libera elétrons aumentando o pH dos solos (Sousa; Miranda; Oliveira, 2007).

### 6.3 Milho

Para o milho não houve efeito das plantas de cobertura para o índice de clorofila (ICF) avaliado no estágio V4. Já no estágio R1 o menor ICF foi observado no milho semeado sobre a palha de milheto (Tabela 4). Os valores médios de ICF verificados nas folhas de milho no estágio R1 foram em geral inferiores ao de 54,5 relatado por Leschewitz *et al.* (2012). De acordo com Costa *et al.* (2012) o ICF correlaciona-se positivamente com os teores de N foliar. Porém, os teores de N nas folhas de milho não diferiram entre as plantas de cobertura (Tabela 5). Para Malavolta, Vitti e Oliveira (1989) a faixa de teor foliar de N no milho varia entre 27,5 e 32,5 g Kg<sup>-1</sup>. Os tratamentos *C. ochroleuca* e milheto estão próximos aos valores adequados e o mix inferior a faixa adequada para o milho (Tabela 5).

Também não houve diferença para os teores foliares de P, K, Ca e S do milho (Tabela 5) e todos os tratamentos apresentaram teores foliares dentro das faixas adequadas para o milho: P (2,5 a 3,5 g Kg<sup>-1</sup>), K (17,5 a 22,5 g Kg<sup>-1</sup>), Ca (2,5 a 4,0 g kg<sup>-1</sup>) e S (1,5 a 2,0 g kg<sup>-1</sup>) de acordo com Malavolta; Vitti; Oliveira (1989), indicando que o fornecimento dos nutrientes foi suficiente.

Quanto aos teores foliares de Mg no milho, a *C. ochroleuca* proporcionou maior teor quando comparado com o mix (Tabela 5). O Mg é um dos constituintes da clorofila (Nascimento *et al.*, 2009). Porém, os maiores teores foliares desse

nutriente nas folhas de milho não aumentaram os ICF no tratamento com *C. ochroleuca* nos estádios V4 e R1 do milho (Tabela 4). Provavelmente, porque os teores foliares de Mg para todos os tratamentos foram inferiores a faixa adequada para o milho (2,5 a 4,0 g Kg<sup>-1</sup>) (Malavolta; Vitti; Oliveira, 1989).

A maior produção de grãos de milho foi observada no tratamento com *C. ochroleuca*, e as demais plantas de cobertura não diferiram entre si (Tabela 6). Mesmo não ocorrendo aumento nos teores foliares de N no milho semeado sobre os resíduos de *C. ochroleuca*, aparentemente a disponibilidade N (amônio e nitrato) desse tratamento acompanhou a demanda do nutriente pelo milho (Figura 4). A *C. ochroleuca* acumulou 331,51 kg ha<sup>-1</sup> de N na massa de matéria seca (Tabela 3), somado com os 56,7 kg ha<sup>-1</sup> fornecido pelo composto orgânico, esse tratamento forneceu 388,21 kg ha<sup>-1</sup> de N para o milho, valor superior aos demais tratamentos. Apesar do teor de lignina da *C. ochroleuca* ser semelhante ao milheto (Figura 2), a decomposição dos resíduos da espécie provavelmente foi mais rápida devido ao maior acúmulo de N em sua massa seca. De acordo com Fiorini *et al.* (2022) na transição do sistema convencional para o SPD a maior relação C:N das gramíneas pode prejudicar o desenvolvimento do milho, devido a imobilização de N pelos microrganismos.

O mix acumulou na massa seca quantidade de N similar à *C. ochroleuca*, totalizando 280,79 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 3). No entanto, o teor de lignina da mistura foi inferior ao da leguminosa (Figura 2), o que, possivelmente, acelerou a decomposição dos resíduos. Contudo, a mineralização do N liberado pela decomposição da biomassa do mix não acompanhou a demanda do milho. Essa discrepância pode ser explicada pela imobilização do N mineralizado por microrganismos do solo, ou pela baixa eficiência na transferência do N mineralizado para a zona radicular do milho.

## 7 CONCLUSÕES

A *Crotalaria ochroleuca* contribuiu para o fornecimento de N (amônio e nitrato) em sincronia com a demanda do milho e, apesar de não ter acrescido os teores foliares de N, foi a planta de cobertura que proporcionou a maior produção de grãos do milho.

A inclusão de plantas de cobertura com reconhecida eficiência na absorção de P do solo, como o guandu-anão e o trigo mourisco, elevaram o acúmulo de P na massa seca do mix. Contudo não elevou os teores de P do solo, durante o ciclo do milho semeado em sucessão.

Embora a atividade da fosfatase alcalina não tenha sido um objetivo principal deste estudo, os resultados obtidos indicam que a liberação dessa enzima pelos microrganismos pode estar relacionada à dinâmica do fósforo no solo. Futuras pesquisas poderão investigar com mais profundidade a relação entre a atividade da fosfatase alcalina e outros parâmetros do solo, como a composição da matéria orgânica e a diversidade microbiana, visando otimizar a disponibilidade de fósforo para as plantas.

## 8 LITERATURA CITADA

ADETUNJI, A. T.; NCUBE, B.; MULIDZI, R.; LEWU, F. B. Management impact and benefit of cover crops on soil quality: A review. **Soil & Tillage Research**, v. 204, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104717>.

AE, N.; OTANI, T.; ARIHARA, J. Effects of specific compounds exuded from roots on phosphorus nutrition. In: JOHANSEN, C.; LEE, K. K.; SHARMA, K. K.; SUBBARAO, G. V.; KUENEMAN, E. A. (Ed.). **Genetic manipulation of crop plants to enhance integrated nutrient management in cropping systems-1. Phosphorus: proceedings**. Patancheru, India: ICRISAT, 1995. p. 117-128.

AMABILE, R. F.; FANCELLI, A. L.; CARVALHO, A. M. de. Comportamento de espécies de adubos verdes em diferentes épocas de semeadura e espaçamentos na região dos Cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 47-54, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000000100007>.

AMADOU, I.; HOUBEN, D.; FAUCON, M. P. Unravelling the role of rhizosphere microbiome and root traits in organic phosphorus mobilization for sustainable phosphorus fertilization: a review. **Agronomy**, v. 11, n. 11, p. 2267, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11112267>.

ANGHINONI, I.; VEZZANI, F. M. Systemic soil fertility as product of system self-organization resulting from management. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, e0210090, 2021. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210090>.

APONTE, H.; MELI, P.; BUTLER, B.; PAOLINI, J.; MATUS, F.; MERINO, C.; CORNEJO, P.; KUZHYAKOV, Y. Meta-analysis of heavy metal effects on soil enzyme activities. **Science of the Total Environment**, v. 737, p. 139744, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139744>.

ARRUDA, O. G.; TARSITANO, M. A. A.; ALVES, M. C.; GIÁCOMO, R. G. Comparação de custos de implantação de eucalipto com resíduo celulósico em substituição ao fertilizante mineral. **Revista Ceres**, v. 58, n. 5, p. 576-583, set./Out. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2011000500007>.

ASCENCIO, J. Growth strategies and utilization of phosphorus in *Cajanus cajan* L. Millsp. and *Desmodium tortuosum* (Sw.) DC under phosphorus deficiency. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 27, n. 5-8, p. 1971-1993, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103629609369680>

BAREA, J. M., AZCON, R.; AZCÓN-AGUILAR, C. Vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in nitrogen-fixing systems. **Methods in Microbiology**, London, v. 24, p. 391-416, 1992. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0580-9517\(08\)70104-1](https://doi.org/10.1016/S0580-9517(08)70104-1)

BARRETO, A. C.; FERNANDES, M. F. Recomendações técnicas para o uso da adubação verde em solos de tabuleiros costeiros. Embrapa Tabuleiros Costeiros. (Circular Técnica, 19), p.1-7, 2001. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1326.7288>.

BEDOUSSAC, L.; JOURNET, E.-P.; HAUGGAARD-NIELSEN, H.; NAUDIN, C.; CORRE-HELLOU, G.; JENSEN, E. S.; PRIEUR, L.; JUSTES, E. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 35, p. 911-935, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0277-7>.

BERTIN, E. G.; ANDRIOLI, I.; CENTURION, J. F. Plantas de cobertura em pré-safra ao milho em plantio direto. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 27, n. 3, p. 379-386, 2005. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303026559001>. Acesso em 20 nov. 2023.

BESEN, M. R.; RIBEIRO, R. H.; MONTEIRO, A. N. T. R.; IWASAKI, G. S.; PIVA, J. T. Práticas conservacionistas do solo e emissão de gases do efeito estufa no Brasil. **Scientia Agropecuaria**, v. 9, n. 3, p. 429-439, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.03.15>.

BEZERRA, I. L.; ROMA, A. F. W.; SANTOS, L. da S.; FRANÇA NETO, A. C. de; NASCIMENTO, J. M. S. do; ALVES, C. D. Características fisiológicas e de crescimento em milho sob doses de potássio. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias da Amazônia (RBCA)**, v. 12, n. 3, p. 50-58, 2023. DOI: <https://doi.org/10.47209/2317-5729.v.12.n.3.p.50-58>.

BONFANTI, Leila. Nutrição e disponibilidade de nitrogênio no consórcio de milho orgânico com diferentes densidades de fabáceas. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal e Bioprocessos Associados) – Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/11340>. Acesso em: 10 jan. 2024.

BONONI, L.; CHIARAMONTE, J. B.; PANSA, C. C.; MOITINHO, M. A.; MELO, I. S. Phosphorus-solubilizing *Trichoderma* spp. from Amazon soils improve soybean plant growth. **Scientific Reports**, v. 10, art. 2858, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59793-8>.

BORASE, D. N.; NATH, C. P.; HAZRA, K. K.; SENTHILKUMAR, M.; SINGH, S. S.; PRAHARAJ, C. S.; SINGH, U.; KUMAR, N. Long-term impact of diversified crop rotations and nutrient management practices on soil microbial functions and soil enzymes activity. **Ecological Indicators**, v. 114, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106322>.

BORIN, A. L. D. C.; LANA, R. M. Q.; PEREIRA, H. S. Absorção, acúmulo e exportação de macronutrientes no milho doce cultivado em condições de campo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, edição especial, p. 1591-1597, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542010000700001>.

BRASIL. **Instrução Normativa nº 17, de 18 de junho de 2014**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/organicos/legislacao/portugues/instrucao-normativa-no-17-de-18-de-junho-de-2014.pdf/view>. Acesso em: 28 jul. 2023.

BRASIL. **Lei n. 10.831, de 23 de dezembro de 2003**. Dispõe sobre a agricultura orgânica e dá outras providências. Brasília, 23 de dezembro de 2003; 182º da Independência e 115º da República. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/2003/L10.831.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/2003/L10.831.htm). Acesso em: 09 jul. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Cadastro Nacional de Produtores Orgânicos. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/organicos/cadastro-nacional-produtores-organicos>. Acesso em: 14 jul. 2024.

BU, R.; LU, J.; REN, T.; LIU, B.; LI, X.; CONG, R. Particulate Organic Matter Affects Soil Nitrogen Mineralization under Two Crop Rotation Systems. **PLOS ONE**, v. 10, n. 12, art. e0143835, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143835>.

BUCHER, M. Functional biology of plant phosphate uptake at root and mycorrhiza interfaces. **New Phytologist**, v. 173, n. 1, p. 11-26, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01935.x>.

BÜLL, L. T. Nutrição mineral do milho. In: Bull, L. T., Cantarella, H. Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba. 1993. p.63-145.

BYBEE-FINLEY, K. A.; CORDEAU, S.; YVOZ, S.; MIRSKY, S. B.; RYAN, M. R. Finding the right mix: a framework for selecting seeding rates for cover crop mixtures. **Ecological Applications**, v. 32, n. 1, p. e02484, 2022. doi: 10.1002/eap.2484.

CALEGARI, A.; CARLOS, J. A. D. Recomendações de plantio e informações gerais sobre o uso de espécies para adubação verde no Brasil. In: FILHO, O. F. L. et al. (Eds.). **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática**. Brasília: Embrapa, v. 2, p. 451-478, 2014.

CARDOSO, T. M. Dinâmica de fósforo e nitrogênio no consórcio de milho com adubos verdes no sistema orgânico. 2022. Dissertação (Mestrado em Agroecologia e Desenvolvimento Rural) – Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/16665>. Acesso em: 26 out. 2023.

CARNEIRO, R. G.; MENDES, I. de C.; LOVATO, P. E.; CARVALHO, A. M. de; VIVALDI, L. J. Indicadores biológicos associados ao ciclo do fósforo em solos de Cerrado sob plantio direto e plantio convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 7, p. 661-669, jul. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000700007>.

CARR, P. M. Guest editorial: Conservation tillage for organic farming. **Agriculture**, v. 7, n. 19, p. 1-6, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture7030019>.

CARVALHO, A. M. de; DANTAS, R. de A.; COELHO, M. C.; LIMA, W. M.; SOUZA, J. P. S. P. de; FONSECA, O. P.; GUIMARÃES JÚNIOR, R. Teores de hemiceluloses, celulose e lignina em plantas de cobertura com potencial para sistema plantio direto no Cerrado. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2010. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 290). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/75878/1/bolpd-290.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2024.

CHEN, S.; WANG, W.; XU, W.; WANG, Y.; WAN, H.; CHEN, D.; TANG, Z.; TANG, X.; ZHOU, G.; XIE, Z.; ZHOU, D.; SHANGGUAN, Z.; HUANG, J.; HE, J.-S.; WANG, Y.; SHENG, J.; TANG, L.; LI, X.; DONG, M.; WU, Y.; WANG, Q.; WANG, Z.; WU, J.; CHAPIN III, F. S.; BAI, Y. Plant diversity enhances productivity and soil carbon storage. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 115, n. 16, p. 4027-4032, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1700298114>.

CHERUBIN, M. R. (Org.). CARVALHO, M. L.; VANOLLI, B. S.; SCHIEBELBEIN, B. E.; BORBA, D. A.; LUZ, F. B.; CARDOSO, G. M.; BORTOLO, L. S.; MAROSTICA, M. E. M.; SOUZA, V. S. **Guia prático de plantas de cobertura: aspectos fitotécnicos e impactos sobre a saúde do solo**. 1. ed. Piracicaba: ESALQ-USP, 2022. 126 p. DOI: <https://doi.org/10.11606/9786589722151>.

CIACCIA, C.; LA TORRE, A.; FERLITO, F.; TESTANI, E.; BATTAGLIA, V.; SALVATI, L.; ROCCUZZO, G. Agroecological Practices and Agrobiodiversity: A Case Study on Organic Orange in Southern Italy. **Agronomy**, v. 9, n. 2, p. 85, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy9020085>.

COELHO, A. M. Nutrição e adubação do milho. Embrapa Milho e Sorgo. (Circular Técnica, 78), p. 1-10, 2006. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/490410/1/Circ78.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2024.

COLLIER, L. S.; KIKUCHI, F. Y.; BENÍCIO, L. P. F.; SOUSA, S. A. de. Consórcio e sucessão de milho e feijão-de-porco como alternativa de cultivo sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 3, p. 306-313, jul./set. 2011. DOI: <https://doi.org/10.5216/pat.v41i3.8706>.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Brasília, DF, v. 11, safra 2023/24, n. 8, oitavo levantamento, maio 2024.

CONGREVES, K. A.; OTCHERE, O.; FERLAND, D.; FARZADFAR, S.; WILLIAMS, S.; ARCAND, M. M. Nitrogen use efficiency definitions of today and tomorrow. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, art. 637108, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.637108>.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; GAMEIRO, R. A.; PARIZ, C. M.; BUZETTI, S.; LOPES, K. S. M. Adubação nitrogenada no consórcio de milho com duas espécies de braquiária em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 8, p. 1038-1047, ago. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000800003>

COUËDEL, A.; ALLETTO, L.; TRIBOUILLOIS, H.; JUSTES, É. Cover crop crucifer-legume mixtures provide effective nitrate catch crop and nitrogen green manure ecosystem services. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 254, p. 50-59, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.017>.

CRUZ, P. Raiar, de ovos orgânicos, atrai dinheiro novo e acelera seus planos de expansão. 2024. Disponível em: <https://globo.rural.globo.com/negocios/noticia/2024/04/raiar-de-ovos-organicos-atrai-dinheiro-novo-e-acelera-seus-planos-de-expansao.ghtml>. Acesso em: 30 jun. 2024.

CUI, K.; XU, T.; CHEN, J.; YANG, H.; LIU, X.; ZHUO, R.; PENG, Y.; TANG, W.; WANG, R.; CHEN, L.; ZHANG, X.; ZHANG, Z.; HE, Z.; WANG, X.; LIU, C.; CHEN, Y.; ZHU, Y. Siderophores, a potential phosphate solubilizer from the endophyte *Streptomyces* sp. CoT10, improved phosphorus mobilization for host plant growth and rhizosphere modulation. **Journal of Cleaner Production**, v. 367, 2022, p. 133110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133110>.

DARCH, T.; GILES, C. D.; BLACKWELL, M. S. A.; GEORGE, T. S.; BROWN, L. K.; MENEZES-BLACKBURN, D.; SHAND, C. A.; STUTTER, M. I.; LUMSDON, D. G.; MEZELI, M. M.; WENDLER, R.; ZHANG, H.; WEARING, C.; COOPER, P.; HAYGARTH, P. M. Inter-and intra-species intercropping of barley cultivars and legume species, as affected by soil phosphorus availability. **Plant and Soil**, v. 427, p. 125-138, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3365-z>.



DAVIDSON, E. A.; DAVID, M. B.; GALLOWAY, J. N.; GOODALE, C. L.; HAEUBER, R.; HARRISON, J. A.; HOWARTH, R. W.; JAYNES, D. B.; LOWRANCE, R. R.; NOLAN, B. T.; PEEL, J. L.; PINDER, R. W.; PORTER, E.; SNYDER, C. S.; TOWNSEND, A. R.; WARD, M. H. Excess Nitrogen in the U.S. Environment: Trends, Risks, and Solutions. **Issues in Ecology**, n. 15, p. 1-16, Winter 2012. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84856790567&origin=inward&txGid=fdc4012f812e0990ea84e9cf697e466a>. Acesso em: 10 abr. 2024.

DISSANAYAKA, D.M.S.B., MARUYAMA, H., MASUDA, G., WASAKI J. Interspecific facilitation of P acquisition in intercropping of maize with white lupin in two contrasting soils as influenced by different rates and forms of P supply. **Plant Soil** 390, 223–236, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2392-x>.

DODD, R. J.; SHARPLEY, A. N. Recognizing the role of soil organic phosphorus in soil fertility and water quality. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 105, p. 282-293, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.001>.

DÖRMANN, Peter. Galactolipids in plant membranes. In: **Encyclopedia of Life Sciences (ELS)**. Chichester: John Wiley & Sons, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0020100.pub2>.

DU, Q.; ZHOU, L.; CHEN, P.; LIU, X.; SONG, C.; YANG, F.; WANG, X.; LIU, W.; SUN, X.; DU, J.; LIU, J.; SHU, K.; YANG, W.; YONG, T. Relay-intercropping soybean with maize maintains soil fertility and increases nitrogen recovery efficiency by reducing nitrogen input. **The Crop Journal**, v. 8, n. 1, p. 140-152, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cj.2019.06.010>.

DUCOUSSO-DÉTREZ, A.; BERNARD, L.; THOMAS, F.; BLANCHART, E.; CHENU, C.; CHOTTE, J. L.; LAPIERRE, P.; LELIEVRE, M.; LEMOINE, M. C.; PANIEGO, A.; ROGER, P. A.; SOLER, L. Diversity of phosphate chemical forms in soils and their contributions on soil microbial community structure changes. **Microorganisms**, v. 10, n. 3, p. 609, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms10030609>.

DUETE, R. R. C.; MURAOKA, T.; SILVA, E. C.; AMBROSANO, E. J.; TRIVELIN, P. C. O. Acúmulo de nitrogênio (15N) pelos grãos de milho em função da fonte nitrogenada em Latossolo Vermelho. **Bragantia**, v. 68, n. 2, p. 463-472, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052009000200021>.

**EMBRAPA**. Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.fao.org/family-farming/detail/en/c/1205286/>. Acesso em: 25 out. 2023.

FAVERO, C.; JUCKSCH, I.; COSTA, L.M.; ALVARENGA, R.C.; NEVES, J.C.L. Crescimento e acúmulo de nutrientes por plantas espontâneas e por leguminosas utilizadas para adubação verde. **Revista Brasileira de Ciência**

**do Solo**, v.24, p.171-177, 2000. DOI:<https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000100019>.

FERNANDES, S. B. V.; UHDE, L. T.; WUNSCH, J. A. A fertilidade do solo em sistemas orgânicos de cultivo de soja. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 2, n. 1, fev. 2007. p. 1541-1544.

FERREIRA, C. R.; GUEDES, J. do N.; ROSSET, J. S.; ANJOS, L. H. C. dos; PEREIRA, M. G. Diversidade da macrofauna edáfica em áreas de plantio direto com diferentes tempos de implantação. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 40, n. 2, p. 599-610, mar./abr. 2019. DOI:<https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n2p599>.

FINNEY, D. M.; MURRELL, E. G.; WHITE, C. M.; BARAIBAR, B.; BARBERCHECK, M. E.; BRADLEY, B. A.; CORNELISSE, S.; HUNTER, M. C.; KAYE, J. P.; MORTENSEN, D. A.; MULLEN, C. A.; SCHIPANSKI, M. E. Ecosystem services and disservices are bundled in simple and diverse cover cropping systems. **Agricultural & Environmental Letters**, v. 2, art. 170033, 2017. DOI: <https://doi.org/10.2134/ael2017.09.0033>.

FIORINI, A.; REMELLI, S.; BOSELLI, R.; MANTOVI, P.; ARDENTI, F.; TREVISAN, M.; MENTA, C.; TABAGLIO, V. Driving crop yield, soil organic C pools, and soil biodiversity with selected winter cover crops under no-till. **Soil & Tillage Research**, v. 217, art. 105283, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105283>.

FONTANETTI, A.; BONFANTI, L.; BALDUÍNO, B. C. G.; MARTINS, T. C.; OLIVEIRA, R. R. Produção de milho orgânico em consórcio com adubos verdes. In: FUJIHARA, R. T.; SAIS, A. C. (Org.). Centro de Ciências Agrárias da UFSCar: trinta anos de ensino, pesquisa e extensão. São Carlos: Cubo Multimídia, 2023. Cap. 4, p. 43-54. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/978-65-86819-35-9>.

FLORENTINO, J. Marfrig começa a processar carne orgânica no Brasil. 2023. Disponível em: <https://valor.globo.com/agronegocios/noticia/2023/01/02/marfrig-comeca-a-processar-carne-organica-no-brasil.ghtml>. Acesso em: 30 jun. 2024.

FRANZLUEBBERS, A. J.; BROOME, S. W.; PRITCHETT, K. L.; WAGGER, M. G.; LOWDER, N.; WOODRUFF, S.; LOVEJOY, M. Multispecies cover cropping promotes soil health in no-tillage cropping systems of North Carolina. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 76, n. 3, p. 263-272, 2021. DOI: <https://doi.org/10.2489/jswc.2021.00087>.

FRÉVILLE, H.; MONTAZEAUD, G.; FORST, E.; DAVID, J.; PAPA, R.; TENAILLON, M. I. Shift in beneficial interactions during crop evolution. **Evolutionary Applications**, v. 15, p. 905-918, 2022. Disponível em <https://doaj.org/article/5c87203210d14c8cb1b577d310b947fa>. Acesso em: 13 mar. 2024.

FRITSCHÉ-NETO, R.; MIRANDA, G. V.; LIMA, R. O.; SOUZA, L. V. de; SILVA, J. da. Herança de caracteres associados à eficiência de utilização do fósforo

em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 5, p. 465-471, maio 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000500005>.

FROSSARD, E.; BÜNEMANN, E. K.; GUNST, L.; OBERSON, A.; SCHÄRER, M.; TAMBURINI, F. Fate of fertilizer P in soils—The organic pathway. In: SCHNUG, E.; DE KOK, L. J. (ed.). **Phosphorus in agriculture: 100% zero**. Dordrecht: Springer, 2016. p. 41-57. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-017-7612-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7612-7_4).

GARLAND, G.; BÜNEMANN, E. K.; OBERSON, A.; FROSSARD, E.; SIX, J. Plant-mediated rhizospheric interactions in maize-pigeon pea intercropping enhance soil aggregation and organic phosphorus storage. **Plant and Soil**, v. 415, p. 37-55, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3145-1>.

GASKELL, M.; SMITH, R. Nitrogen sources for organic vegetable crops. *HortTechnology*, v. 17, n. 4, p. 431-441, 2007. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.17.4.431>.

GERKE, J. The acquisition of phosphate by higher plants: Effect of carboxylate release by the roots. A critical review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 178, n. 3, p. 351-364, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.201400590>.

GOMEZ-ZEPEDA, D.; BAKOUM, S.; MARCHANT, A.; DESIRÉE, T.; SISSOKO, M.; GAUTIER, H.; HÉVIN, C.; MONOT, C.; LEFEBVRE, V.; REYNAUD, B. Mass spectrometry-based quantification and spatial localization of small organic acid exudates in plant roots under phosphorus deficiency and aluminum toxicity. **The Plant Journal**, v. 106, n. 6, p. 1791-1806, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/tbj.15261>.

GROUPE ECOCERT. Regenerative agriculture. 2023. Disponível em: <https://www.ecocert.com/pt-BR/certificação-detalle/roc-regenerative-organic-certified%29>. Acesso em: 7 set. 2023.

GRZYB, A.; WOLNA-MARUWKA, A.; NIEWIADOMSKA, A. The Significance of Microbial Transformation of Nitrogen Compounds in the Light of Integrated Crop Management. **Agronomy**, v. 11, n. 7, p. 1415, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11071415>.

HALLAMA, M.; PEKRUN, C.; PILZ, S.; JAROSCH, K. A.; FRĄC, M.; UKSA, M.; MARHAN, S.; KANDELER, E. Interactions between cover crops and soil microorganisms increase phosphorus availability in conservation agriculture. **Plant and Soil**, v. 463, p. 307-328, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04897-x>.

HAMIM, A.; BOUKESKASSE, A.; OUHDOUCH, Y.; FARROUKI, A.; BARRIJAL, S.; MICHÉ, L.; MRABET, R.; DUPONNOIS, R.; HAFIDI, M. Phosphate solubilizing and PGR activities of ericaceous shrubs microorganisms isolated from Mediterranean forest soil. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 19, art. 101128, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101128>.

HINSINGER, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. **Plant and Soil**, v. 237, p. 173-195, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1013351617532>.

HOBBS, P. R.; SAYRE, K.; GUPTA, R. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1491, p. 543-555, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2169>.

HOU, Y.; XU, X.; KONG, L.; ZHANG, L.; ZHANG, Y.; LIU, Z. Improving nitrogen contribution in maize post-tasseling using optimum management under mulch drip irrigation in the semiarid region of Northeast China. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1095314>.

HU, P.; ZHAO, Y.; XIAO, D.; XU, Z.; ZHANG, W.; XIAO, J.; WANG, K. Dynamics of soil nitrogen availability following vegetation restoration along a climatic gradient of a subtropical karst region in China. **Journal of Soils and Sediments**, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-021-02915-0>.

JINDO, K.; SATO, K.; SHIMOYAMA, K.; SUZUKI, S.; TSURUMI, H.; INUBUSHI, K.; KANEDA, S.; NAGATA, O.; HASEGAWA, S.; KIMURA, M. Biotic and abiotic effects of soil organic matter on the phytoavailable phosphorus in soils: a review. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 10, n. 1, p. 1-12, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40538-023-00401-y>.

JOSHI, S. R.; MORRIS, J. W.; TFAILY, M. M.; YOUNG, R. P.; MCNEAR JR., D. H. Low soil phosphorus availability triggers maize growth stage specific rhizosphere processes leading to mineralization of organic P. **Plant and Soil**, v. 459, n. 1-2, p. 423-440, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04774-z>.

KANAKIDOU, M.; MYRIOKEFALITAKIS, S.; DASKALAKIS, N.; FANOURGAKIS, G.; NENES, A.; BAKER, A. R.; TSIGARIDIS, K.; MIHALOPOULOS, N. Past, Present, and Future Atmospheric Nitrogen Deposition. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 73, n. 5, p. 2039-2047, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1175/JAS-D-15-0278.1>.

KAPPES, C.; ARF, O.; ARF, M. V.; FERREIRA, J. P.; DAL BEM, E. A.; PORTUGAL, J. R.; VILELA, R. G. Inoculação de sementes com bactéria diazotrófica e aplicação de nitrogênio em cobertura e foliar em milho. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 2, p. 527-538, mar./abr. 2013. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n2p527>.

KEENEY, D. R.; HATFIELD, J. L. The Nitrogen Cycle, Historical Perspective, and Current and Potential Future Concerns. In: HATFIELD, J. L.; FOLLETT, R. F. (Eds.). **Nitrogen in the Environment: Sources, Problems, and Management**. Elsevier, p. 1-18, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374347-3.00001-9>.

KESSEL, C.; HARTLEY, C. Agricultural management of grain legumes: has it led to an increase in nitrogen fixation?. **Field Crops Research**, v. 65, p. 165-181, 2000. doi: 10.1016/S0378-4290(99)00085-4.

KHAN, F.; MA, X.; CAO, Q.; ZHANG, Y.; CHEN, F.; GAO, Y.; JIANG, X. Phosphorus plays key roles in regulating plants' physiological responses to abiotic stresses. **Plants**, v. 12, n. 15, p. 2861, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12152861>.

KOCIRA, A.; STANIAK, M.; TOMASZEWSKA, M.; KORNAS, R.; CYMERMAN, J.; PANASIEWICZ, K.; LIPÍŃSKA, H. Legume Cover Crops as One of the Elements of Strategic Weed Management and Soil Quality Improvement: A Review. **Agriculture**, v. 10, n. 394, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture10090394>.

KÖPPEN, W. **Climatologia**. México: Fundo de Cultura Econômica, v. 9, 1948.

KRAMBERGER, B.; GSELMAN, A.; KRISTL, J.; LEŠNIK, M.; ŠUŠTAR, V.; MURŠEC, M.; PODVRŠNIK, M. Winter cover crop: the effects of grass–clover mixture proportion and biomass management on maize and the apparent residual N in the soil. **European Journal of Agronomy**, v. 55, p. 63-71, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.01.001>.

KRAUS, M.; FUSSEDER, A.; BECK, E. Development and replenishment of the P-depletion zone around the primary root of maize during the vegetation period. **Plant and Soil**, v. 101, p. 247-255, 1987. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02370652>. Acesso em: 30 abril. 2024.

LAI, H.; GAO, F.; SU, H.; ZHENG, P.; LI, Y.; YAO, H. Nitrogen Distribution and Soil Microbial Community Characteristics in a Legume–Cereal Intercropping System: A Review. **Agronomy**, v. 12, n. 8, p. 1900, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12081900>.

LAMA, S.; VELESCU, A.; LEIMER, S.; WEIGELT, A.; CHEN, H.; EISENHAUER, N.; SCHEU, S.; OELMANN, Y.; WILCKE, W. Plant diversity influenced gross nitrogen mineralization, microbial ammonium consumption and gross inorganic N immobilization in a grassland experiment. *Oecologia*, v. 193, n. 3, p. 731-748, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00442-020-04717-6>.

LANDAU, E. C.; CAMPANHA, M. M.; MATRANGOLO, W. J. R. Variação geográfica da ocorrência de produtores de milho orgânico cadastrados no Brasil. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 225, 2021.

LAPIERRE, J.; MACHADO, P. V. F.; DEBRUYN, Z.; BROWN, S. E.; JORDAN, S.; BERG, A.; BISWAS, A.; HENRY, H. A. L.; WAGNER-RIDDLE, C. Cover crop mixtures: A powerful strategy to reduce post-harvest surplus of soil nitrate and leaching. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 325, art. 107750, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107750>.

LATKOVIĆ, D.; CRNOBARAC, J.; JAĆIMOVIĆ, G.; VISKOVIĆ, J.; DUNĐERSKI, D. The importance of harvest residues in corn production. **Zemljište i biljka**, v. 68, n. 2, p. 33-43, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5937/ZemBilj1902033L>.

LEDGARD, S.; STEELE, K. Biological nitrogen fixation in mixed legume/grass pastures. **Plant and Soil**, v. 141, p. 137-153, 1992. doi: 10.1007/BF00011314.

LESCHEWITZ, R.; SOUZA, V. Q.; CARON, B. O.; BORELLA, J.; CARVALHO, I. R.; BUSANELLO, C.; NARDINO, M.; FERRARI, M.; BELLÉ, R. Determinação do índice de clorofila em populações de milho crioulo em diferentes partes da folha. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 29., 2012, Águas de Lindóia. **Anais [...]**. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2012. Disponível em: [https://www.abms.org.br/eventos\\_antteriores/cnms2012/titulos.htm](https://www.abms.org.br/eventos_antteriores/cnms2012/titulos.htm). Acesso em: 18 jul. 2024.

LI, Q.; CHEN, J.; WU, L.; LUO, X.; LI, N.; ARAFAT, Y.; LIN, S.; LIN, W. Belowground interactions impact the soil bacterial community, soil fertility, and crop yield in maize/peanut intercropping systems. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 19, n. 2, art. 622, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms19020622>.

LIMA, S. K.; GALIZA, M.; VALADARES, A. A.; ALVES, F. Produção e consumo de produtos orgânicos no mundo e no Brasil. Texto para Discussão, n. 2538. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2020.

LIU, D. Root developmental responses to phosphorus nutrition. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 63, n. 6, p. 1065-1090, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/jipb.13090>.

LIU, Y.; WU, L.; BADDELEY, J.; WATSON, C. Models of biological nitrogen fixation of legumes. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 31, p. 155-172, 2011.

LU, Y. C.; WATKINS, K. B.; TEASDALE, J. R.; ABDUL-BAKI, A. A. Cover crops in sustainable food production. **Food Reviews International**, v. 16, n. 2, p. 121–157, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1081/FRI-100100285>.

LYNCH, J.P., BROWN, K.M. Topsoil foraging – an architectural adaptation of plants to low phosphorus availability. **Plant and Soil**, v. 237, p. 225-237, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1013324727040>.

LYNGE, M.; KRISTENSEN, H. L.; GREVSEN, K.; SORENSEN, J. N. Strategies for high nitrogen production and fertilizer value of plant-based fertilizers. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 186, p. 105-115, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.202200031>.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 1989, 201 p.

MANSCHADI, A. M.; KAUL, H.-P.; VOLLMANN, J.; EITZINGER, J.; WENZEL, W. Developing phosphorus-efficient crop varieties—An interdisciplinary research framework. **Field Crops Research**, v. 162, p. 87-98, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.12.016>.

MANZOOR, A.; DIPPOLD, M.; LOEPPMANN, S.; BLAGODATSKAYA, E. Two-Phase Conceptual Framework of Phosphatase Activity and Phosphorus Bioavailability. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 2022. doi: [10.3389/fpls.2022.935829](https://doi.org/10.3389/fpls.2022.935829).

- MARRA, L. M., DE OLIVEIRA-LONGATTI, S. M., SOARES, C. R. F. S., OLIVARES, F. L., & MOREIRA, F. M. DE S. The Amount of Phosphate Solubilization Depends on the Strain, C-Source, Organic Acids and Type of Phosphate. **Geomicrobiology Journal**, v. 36, n. 3, p. 232-242, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/01490451.2018.1542469>.
- MENDES, F.F., GUIMARÃES, L.J.M., SOUZA, J.C., GUIMARÃES, P.E.O., MAGALHAES, J.V., GARCIA, A.A.F., PARENTONI, S.N. AND GUIMARAES, C.T. Genetic Architecture of Phosphorus Use Efficiency in Tropical Maize Cultivated in a Low-P Soil. **Crop Science**, v. 54, n. 4, p. 1530-1538, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.11.0755>.
- MENDES, I. de C.; REIS JÚNIOR, F. B. dos. Microrganismos e disponibilidade de fósforo (P) nos solos: uma análise crítica. 1. ed. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2003. 26 p. (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111; 85).
- MICHELON, C. J.; JUNGES, E.; CASALI, C. A.; PELLEGRINI, J. B. R.; NETO, L. R.; OLIVEIRA, Z. B. de; OLIVEIRA, M. B. de. Atributos do solo e produtividade do milho cultivado em sucessão a plantas de cobertura de inverno. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 18, n. 2, p. 230-239, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5965/223811711812019230>.
- MOHAMMED, Y. A.; GESCH, R. W.; JOHNSON, J. M. F.; WAGNER, S. W. Agronomic and Economic Evaluations of N Fertilization in Maize under Recent Market Dynamics. **Nitrogen**, v. 3, n. 3, p. 514-527, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/nitrogen3030033>.
- MUKHERJEE, R.; SEN, S. Role of Biological Nitrogen Fixation (BNF) in Sustainable Agriculture: A Review. **International Journal of Advancement in Life Sciences Research**, v. 04, n. 03, p. 001, 2021. doi: 10.31632/ijalsr.2021.v04i03.001.
- MULLER, A.; SCHADER, C.; EL-HAGE SCIALABBA, N.; BRÜGGEMANN, J.; ISENSEE, A.; ERB, K. H.; SMITH, P.; KLOCKE, P.; LEIBER, F.; STOLZE, M.; NIGGLI, U. Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture. **Nature Communications**, v. 8, art. 1290, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01410-w>.
- NASCIMENTO, R.; DEUNER, S.; SOARES FERREIRA, L.; BADINELLI, P. G.; KERBER, R. S. Crescimento e teores de clorofila e carotenóides em três cultivares de soja em função da adubação com magnésio. *Revista Ceres*, Viçosa, v. 56, n. 3, p. 364-369, maio/jun. 2009. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=305226745020>. Acesso em: 18 jul. 2024.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, 1999.
- NUNES, F. S.; RAIMONDI, A. C.; NIEDWIESKI, A. C. Fixação de nitrogênio: estrutura, função e modelagem bioinorgânica das nitrogenases. *Química Nova*, v. 26, n. 6, p. 872-879, 2003. DOI:<https://doi.org/10.1590/S0100-40422003000600016>.

NYFELER, D.; HUGUENIN-ELIE, O.; SUTER, M.; FROSSARD, E.; LÜSCHER, A. Grass-legume mixtures can yield more nitrogen than legume pure stands due to mutual stimulation of nitrogen uptake from symbiotic and non-symbiotic sources. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 140, p. 155-163, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.11.022>.

OBERSON, A., BESSON, J. M., MAIRE, N., & STICHER, H. Microbiological processes in soil organic phosphorus transformations in conventional and biological cropping systems. **Biology and Fertility of Soils**, Heilderber, v. 21, p. 138-148, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00335925>.

OLIVEIRA, F. C. C.; PEDROTTI, A.; FELIX, A. G. S.; SOUZA, J. L. S.; HOLANDA, F. S. R.; MELLO JUNIOR, A. V. Características químicas de um Argissolo e a produção de milho verde nos Tabuleiros Costeiros sergipanos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 12, n. 3, p. 354-360, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v12i3a5464>.

OLIVEIRA, J. G. R.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M. F.; BARBOSA, G. M. de C.; TAVARES FILHO, J. Erosão no plantio direto: perda de solo, água e nutrientes. **Boletim de Geografia**, Maringá, v. 30, n. 3, p. 91-98, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v30i3.17644>.

PANG, J.; YANG, J.; LAMBERS, H.; TIBBETT, M.; SIDDIQUE, K.; RYAN, M. Physiological and morphological adaptations of herbaceous perennial legumes allow differential access to sources of varying soluble phosphate. **Physiologia Plantarum**, v. 154, n. 4, p. 511-525, 2015. doi: 10.1111/ppl.12297.

PARENTONI, S. N.; MENDES, F. F.; GUIMARÃES, L. J. M. Breeding for phosphorus use efficiency. In: FRITSCHÉ-NETO, R.; BORÉM, A. (ed.). **Plant breeding for abiotic stress tolerance**. Berlin: Springer-Verlag, 2012. p. 67-85. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-30553-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-30553-5_5).

PEDROTTI, A.; SILVA, T. O. da (In memoriam); ARAÚJO, E. M.; ARAÚJO FILHO, R. N. de; HOLANDA, F. S. R. Atributos químicos do solo modificados por diferentes sistemas de cultivo associados a culturas antecessoras ao cultivo do milho, nos Tabuleiros Costeiros. **Magistra**, Cruz das Almas – BA, v. 27, n. 3/4, p. 292-305, jul./dez. 2015. Disponível em: <https://www3.ufrb.edu.br/index.php/magistra/article/view/3921>. Acesso em: 05 jan. 2024.

PERIN A., SANTOS R.H.S., URQUIAGA S., GUERRA J.G.M., CECON P.R. Produção de fitomassa, acúmulo de nutrientes e fixação biológica de nitrogênio por adubos verdes em cultivo isolado e consorciado. *Pesq agropec bras* [Internet]. 2004Jan;39(1):35–40. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000100005>.

RAJKOVIC, M.; MALIDZA, G.; SIMIN, M. T.; MILIC, D.; GLAVAŠ-TRBIC, D.; MESELDŽIJA, M.; VRBNICANIN, S. Sustainable organic corn production with the use of flame weeding as the most sustainable economical solution. **Sustainability**, v. 13, p. 572, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13020572>.



RASMUSSEN, J.; GYLFADÓTTIR, T.; LOGES, R.; ERIKSEN, J.; HELGADÓTTIR, Á. Spatial and temporal variation in N transfer in grass-white clover mixtures at three Northern European field sites. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 57, p. 654-662, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.07.004>.

REDA, T.; THAVARAJAH, P.; POLOMSKI, R.; BRIDGES, W.; SHIPE, E.; THAVARAJAH, D. Reaching the highest shelf: A review of organic production, nutritional quality, and shelf life of kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*). **Plants, People, Planet**, v. 3, p. 308-318, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppp3.10183>.

REGENERATIVE ORGANIC (Estados Unidos). Resource Library. Disponível em: <https://regenorganic.org/certification-resource-library/#agricultural-producers>. Acesso em: 20 out. 2023.

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*, Washington, v. 175, n. 2, p. 196–211, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.201000139>

REN, K.; ZHOU, Y.; LIU, J.; YU, Z.; MA, X.; SI, R.; WEN, Z.; XU, W.; TANG, A.; SHEN, J.; GOULDING, K.; LIU, X. A Decadal Change in Atmospheric Nitrogen Deposition at a Rural Site in Southern China. **Atmosphere**, v. 15, p. 583, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos15050583>.

RESENDE, A. V. de; COELHO, A. M.; SANTOS, F. C. dos; LACERDA, J. J. de J. Fertilidade do Solo e Manejo da Adubação NPK para Alta Produtividade de Milho no Brasil Central. *Embrapa Milho e Sorgo. (Circular Técnica, 181)*, p. 1–12, 2012. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/77755/1/circ-181.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2024.

RIBEIRO, P. L.; BAMBERG, A. L.; REIS, D. A.; OLIVEIRA, A. C. B. de. Condições físico-hídricas de Planossolo cultivado com soja em plantio direto e preparo convencional. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1484-1491, set. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900047> .

ROCHA, C. G.; CARDOSO, A. A. Gases de nitrogênio reativo como precursores do aerossol atmosférico: reações de formação, processos de crescimento e implicações ambientais. **Química Nova**, v. 44, n. 4, p. 460-472, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170692>.

RODRIGUEZ, C.; CARLSSON, G.; ENGLUND, J.; FLÖHR, A.; PELZER, E.; JEUFFROY, M.; MAKOWSKI, D.; JENSEN, E. Grain legume-cereal intercropping enhances the use of soil-derived and biologically fixed nitrogen in temperate agroecosystems. A meta-analysis. **European Journal of Agronomy**, v. 118, p. 126077, 2020. doi: 10.1016/j.eja.2020.126077.

ROSSETTI, K. de V.; ANDRIOLI, I.; CENTURION, J. F.; MATIAS, S. S. R.; NÓBREGA, J. C. A. Atributos físicos do solo em diferentes condições de cobertura vegetal em área de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 7, n. 3, p. 427-433, jul.-set. 2012. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v7i3a1681>.

ROTZ, C. A.; TAUBE, F.; RUSSELLE, M. P.; OENEMA, J.; SANDERSON, M. A.; WACHENDORF, M. Whole-Farm Perspectives of Nutrient Flows in Grassland Agriculture. **Crop Science**, v. 45, n. 6, p. 2139-2159, 2005. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.0523>.

SAINJU, U. M.; WHITEHEAD, W. F.; SINGH, B. P. Cover crops and nitrogen fertilization effects on soil aggregation and carbon and nitrogen pools. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 83, n. 2, p. 155-165, 2003. DOI: <https://doi.org/10.4141/S02-056>.

SANTOS, N. C. B. dos; TIVELLI, S. W. Como produzir milho orgânico. Rio de Janeiro: Sociedade Nacional de Agricultura, Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas, Centro de Inteligência em Orgânicos, p. 56, 2017.

SHANMUGAM, S.; HEFNER, M.; PELCK, J. S.; LABOURIAU, R.; KRISTENSEN, H. L. Complementary resource use in intercropped faba bean and cabbage by increased root growth and nitrogen use in organic production. **Soil Use and Management**, v. 38, p. 729-740, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12765>.

SHARMA, S. B.; SAYYED, R. Z.; TRIVEDI, M. H.; GANGOLIYA, S. B. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. **SpringerPlus**, v. 2, p. 1-14, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587>.

SILVA, C. G. M. Absorção e exportação de macronutrientes em milho transgênico sob dois níveis de investimento em adubação. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade Federal de São João del-Rei, Sete Lagoas, 2016.

SILVA, L. I. da; PEREIRA, M. C.; CARVALHO, A. M. X. de; BUTTRÓS, V. H.; PASQUAL, M.; DÓRIA, J. Phosphorus-Solubilizing Microorganisms: A Key to Sustainable Agriculture. **Agriculture**, v. 13, n. 462, p. 1-30, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13020462>.

SILVA, M. A.; NASCENTE, A. S.; LANNA, A. C.; REZENDE, C. C.; CRUZ, D. R. C.; FRASCA, L. L. M.; FERREIRA, A. L.; FERREIRA, I. V. L.; DUARTE, J. R. M.; FILIPPI, M. C. C. Sistema de plantio direto e rotação de culturas no Cerrado. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 13, e376111335568, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i13.35568>.

SILVA, R. H. da; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. **Pesquisa Agropecuária**

**Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 6, p. 855-860, jun. 2002. DOI:  
<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2002000600015>.

SILVA, R. L.; DE MARIA, I. C. Erosão em sistema plantio direto: Influência do comprimento de rampa e da direção de semeadura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 6, p. 554-561, 2011. DOI:  
<https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000600003>.

SISDAGRO. Disponível em:  
<http://sisdagro.inmet.gov.br/sisdagro/app/monitoramento/bhc>. Acesso em: 15 ago. 2023.

SMITH, S. E.; ANDERSON, I. C.; SMITH, F. A. Mycorrhizal associations and phosphorus acquisition: from cells to ecosystems. In: PLAXTON, W. C.; LAMBERS, H. (ed.). **Phosphorus metabolism in plants**. Chichester: John Wiley & Sons, 2015. p. 409-440. DOI:  
<https://doi.org/10.1002/9781118958841.ch14>.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; COSTA, C. H. M. da; FERRARI NETO, J.; CASTRO, G. S. A. Produção, decomposição e ciclagem de nutrientes em resíduos de crotalária e milheto, cultivados solteiros e consorciados. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 47, n. 10, p. 1462-1470, out. 2012. DOI:  
<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012001000008>.

SORENSEN, J. N.; THORUP-KRISTENSEN, K. Plant-based fertilizers for organic vegetable production. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 174, n. 2, p. 321-332, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200900321>.

SOUSA, D.M. G. de; MIRANDA, L. N. de; OLIVEIRA, S.A. de. Acidez do solo e sua correção. In: Fertilidade do solo, 107 p. (eds. NOVAIS, R. F., ALVAREZ, V., V. H., BARROS, N. F., FONTES, R. L.F., CANTARUTTI, R. B. & NEVES, J.C.L.). SBCS, Viçosa, 2007.

SOUZA, G. S.; GOMES, E. G.; GAZZOLA, R. Produção orgânica na renda bruta agropecuária: Estudo baseado nos dados do censo agropecuário de 2017. **Revista Verde**, v. 16, n. 1, jan.-mar., p. 60-70, 2021. DOI:  
<https://doi.org/10.18378/rvads.v16i1.8388>.

SPAGNOLO, R. T.; OLDONI, A.; CUSTÓDIO, T. V.; MACHADO, A. L. T.; REIS, A. V. Produção orgânica: Caracterização das propriedades e a situação da mecanização no controle de plantas espontâneas. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 25, n. 6, p. 517-525, 2017. DOI:  
<https://doi.org/10.13083/reveng.v25i6.796>.

SUBEDI, K. D.; MA, B. L. Corn crop production: growth, fertilization and yield. In: DANFORTH, A. T. (Ed.). **Corn: chemistry and technology**. St. Paul: American Association of Cereal Chemists, p. 3-32, 2009. DOI:  
<https://doi.org/10.13140/2.1.3515.9040>.

SUN, Y.; GOLL, D.; CIAIS, P.; PENG, S.; MARGALEF, O.; ASENSIO, D.; SARDANS, J.; PEÑUELAS, J. Spatial Pattern and Environmental Drivers of

Acid Phosphatase Activity in Europe. **Frontiers in Big Data**, v. 2, 2020. doi: 10.3389/fdata.2019.00051.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R. W. et al. (Eds.). **Methods of soil analysis: Part 2 Microbiological and biochemical properties**. Madison: Soil Science Society of America, v. 5, p. 775-833, 1994.

TALBOT, J. M.; TRESEDER, K. K. Interactions among lignin, cellulose, and nitrogen drive litter chemistry-decay relationships. *Ecology*, v. 93, n. 2, p. 345-354, 2012. DOI: 10.1890/11-0843.1. DOI: <https://doi.org/10.1890/11-0843.1>.

TARAFDAR, J.C.; CLAASEN, N. Organic phosphorus compounds as a phosphorus source for higher plants through the activity of phosphatases produced by plant roots and microorganisms. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 5, p. 308-312, 1988. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00262137>.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed.). Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

TEODORO, M. S.; SOUZA, H. A.; RODRIGUES, B. H. N.; SANTOS, F. J. S. Decomposition of green manure biomass in dystrophic Yellow Latosol in Piauí state, Brazil. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 13, p. 196-210, 2019. DOI: <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v13i0.5476>.

TEODORO, R. B., OLIVEIRA, F. L. DE., SILVA, D. M. N. DA., FÁVERO, C., & QUARESMA, M. A. L. Aspectos agronômicos de leguminosas para adubação verde no Cerrado do Alto Vale do Jequitinhonha. **Revista Brasileira De Ciência Do Solo**, 35(2), 635–640. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000200032>.

THOMSEN, I. K.; HANSEN, E. M. Cover crop growth and impact on N leaching as affected by pre- and postharvest sowing and time of incorporation. **Soil Use and Management**, v. 30, n. 1, p. 48-57, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12083>.

THORUP-KRISTENSEN, K. Are differences in root growth of nitrogen catch crops important for their ability to reduce soil nitrate-N content, and how can this be measured? **Plant and Soil**, v. 230, p. 185-195, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1010306425468>.

TITTONELL, P.; PIÑEIRO, G.; GARIBALDI, L. A.; DOGLIOTTI, S.; OLFF, H.; JOBBAGY, E. G. Agroecology in large scale farming—A research agenda. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, art. 584605, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.584605>.

TORRES, J. L. R.; LEAL JÚNIOR, A. L. B.; BARRETO, A. C.; CARVALHO, F. J.; ASSIS, R. L. de; LOSS, A.; LEMES, E. M.; VIEIRA, D. M. da S. Mechanical and Biological Soil Decompaction for No-Tillage Maize Production. **Agronomy**, v. 12, n. 10, p. 2310, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12102310>.

TOSTI, G.; BENINCASA, P.; FARNESELLI, M.; TEI, F.; GUIDUCCI, M. Barley-hairy vetch mixture as cover crop for green manuring and the mitigation of N leaching risk. **European Journal of Agronomy**, v. 54, p. 34-39, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.11.012>.

TOWETT, E. K.; DRAKE, L. B.; ACQUAH, G. E.; HAEFELE, S. M.; McGRATH, S. P.; SHEPHERD, K. D. Comprehensive nutrient analysis in agricultural organic amendments through non-destructive assays using machine learning. **PLoS ONE**, v. 15, n. 12, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242821>. Acesso em: 15 jul. 2024.

USDA, ERS. International Baseline Data. 2021 International Long-Term Projections to 2030. 2021. Disponível em: <https://www.ers.usda.gov/data-products/international-baseline-data/>. Acesso em: 15 ago. 2023.

VALENZUELA, H. R.; SCHAFFER, B.; O'HAIR, S. K. Shade and Nitrogen Influence Gas Exchange and Growth of Cocoyam (*Xanthosoma sagittifolium*). **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 115, n. 6, p. 1014-1018, 1990. DOI: <https://doi.org/10.21273/JASHS.115.6.1014>.

VAN SOEST, P. J. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds II. A rapid method for determination of fibre and lignin. *J. Assoc. Off. Anal. Chem.*, v. 46, p. 50, 1963.

VARGAS, N. B. Desempenho agrônômico da soja e qualidade do solo sob rotação e sucessão de culturas em plantio direto. 2023. 58 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2023.

VASCONCELLOS, C. A.; VIANA, M. C. M.; FERREIRA, J. J. Acúmulo de matéria seca e de nutrientes em milho cultivado no período inverno-primavera. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 11, p. 1835-1845, 1998. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/5013>. Acesso em: 20 nov. 2023.

VIEIRA, R. F. Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas. Brasília: Embrapa, 2017. 163 p. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1090589>. Acesso em: 15 jul. 2024.

VIRILI, A.; MARUSIG, D.; DELLE VEDOVE, G.; MARRACCINI, E. Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench.) as an emerging companion crop in annual cropping systems: A systematic review. **Italian Journal of Agronomy**, v. 19, 2024. DOI: <https://doi.org/10.4081/ija.2024.2218>.

VOJNOV, B.; JAĆIMOVIĆ, G.; ŠEREMEŠIĆ, S.; PEZO, L.; LONČAR, B.; KRSTIĆ, Đ.; VUJIĆ, S.; ĆUPINA, B. The effects of winter cover crops on maize yield and crop performance in semiarid conditions—Artificial neural network approach. **Agronomy**, v. 12, n. 2670, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12112670>.

VON PINHO, R. G. V.; BORGES, I. D.; PEREIRA, J. L. A. R.; REIS, M. C. dos. Marcha de absorção de macronutrientes e acúmulo de matéria seca em milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 8, n. 2, p. 157-173, 2009.

WANG, J.; HU, X. Research on corn production efficiency and influencing factors of typical farms: Based on data from 12 corn-producing countries from 2012 to 2019. **PLOS ONE**, v. 16, n. 7, p. e0254423, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254423>.

WATSON, C. A.; ATKINSON, D.; GOSLING, P.; JACKSON, L. R.; RAYNS, F. W. Managing soil fertility in organic farming systems. **Soil Use and Management**, v. 18, p. 239-247, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2002.tb00265.x>.

WEI, ZHANG.; MAXWELL, T. M. R.; ROBINSON, B.; DICKINSON, N. Legume nutrition is improved by neighbouring grasses. **Plant and Soil**, v. 475, p. 443-455, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05379-4>.

WEN, A.; HAVENS, K.; BLOCH, S.; SHAH, N.; HIGGINS, D.; DAVIS-RICHARDSON, A.; SHARON, J.; REZAEI, F.; MOHITI-ASLI, M.; JOHNSON, A.; ABUD, G.; ANÉ, J.; MAEDA, J.; INFANTE, V.; GOTTLIEB, S.; LORIGAN, J.; WILLIAMS, L.; HORTON, A.; MCKELLAR, M.; SORIANO, D.; CARON, Z.; ELZINGA, H.; GRAHAM, A.; CLARK, R.; MAK, S.; STUPIN, L.; ROBINSON, A.; HUBBARD, N.; BROGLIE, R.; TAMSIR, A.; TEMME, K. Enabling Biological Nitrogen Fixation for Cereal Crops in Fertilized Fields. **ACS Synthetic Biology**, v. 10, n. 11, p. 3347-3358, 2021. doi: 10.1021/acssynbio.1c00049.

WILLER, H.; SCHLATTER, B.; TRÁVNÍČEK, J.; KEMPER, L.; LERNOUD, J. (Eds.). The World of Organic Agriculture: Statistics and Emerging Trends 2024. Bonn: Research Institute of Organic Agriculture FiBL, IFOAM – Organics International, 2024. Disponível em: <https://www.organic-world.net/yearbook/yearbook-2024.html>. Acesso em: 7 jul. 2024.

YANG, H.; ZHANG, W.; LI, L. Intercropping: feed more people and build more sustainable agroecosystems. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, v. 8, n. 3, p. 373-386, 2021. DOI: <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2021398>.

YASUHARA, T.; NOKIHARA, K. High-throughput analysis of total nitrogen content that replaces the classic Kjeldahl method. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 49, n. 10, p. 4581-4583, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf010448z>

YOSHIDA, F. A.; STOLF, R. Mapeamento digital de atributos e classes de solos da UFSCar-Araras/SP. **Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente**, v. 3, n. 1, p. 1-11, 2016.

ZERSSA, G.; FEYSSA, D.; KIM, D. G.; EICHLER-LÖBERMANN, B. Challenges of smallholder farming in Ethiopia and opportunities by adopting climate-smart agriculture. **Agriculture**, v. 11, n. 3, p. 192, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11030192>.

ZHAO, Yan; TIAN, Yuqiang; LI, Xiaobing; SONG, Minghua; FANG, Xingxing; JIANG, Yan; XU, Xingliang. Nitrogen fixation and transfer between legumes and cereals under various cropping regimes. **Rhizosphere**, v. 22, p. 100546, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100546>.

ZHU, Y-G.; HE, Y-Q.; SMITH, S. E.; SMITH, F. A. Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) has high capacity to take up phosphorus (P) from a calcium (Ca)-bound source. **Plant and Soil**, v. 239, p. 1-8, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1014958029905>.