



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL**

**CAMPUS DE ARAPIRACA**

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE - PPGAA**

**MESTRADO EM AGRICULTURA E AMBIENTE**

**MARIA RAQUEL DA SILVA FARIAS**

**PLANTAS DE COBERTURA E FONTES DE FÓSFORO SOLÚVEL E REATIVA NO  
ACÚMULO DE MASSA E NUTRIENTE PELO MILHO EM SEMEADURA DIRETA**

**ARAPIRACA**

**2023**

Maria Raquel da Silva Farias

Plantas de cobertura e fontes de fósforo solúvel e reativa no acúmulo de massa e nutriente  
pelo milho em semeadura direta

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de mestre no Curso de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Valdevan Rosendo dos Santos

Arapiraca

2023



Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
Campus Arapiraca  
Biblioteca Setorial *Campus Arapiraca* - BSCA

F224p Farias, Maria Raquel da Silva  
Plantas de cobertura e fontes de fósforo solúvel e reativa no acúmulo de massa e nutriente pelo milho em semeadura direta [recurso eletrônico] / Maria Raquel da Silva Farias. – Arapiraca, 2023.  
70 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Valdevan Rosendo dos Santos.  
Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente) - Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de Alagoas, *Campus Arapiraca*, Arapiraca, 2023.  
Disponível em: Universidade Digital (UD) / RD- BSCA– UFAL (*Campus Arapiraca*).  
Referências: f. 62-70.

1. Plantio direto. 2. Ciclagem de nutrientes. 3. Cobertura verde. 4. Fosfato - Solubilidade. 5. *Zea mays* (Milho). I. Santos, Valdevan Rosendo dos. II. Título.

CDU 636

Maria Raquel da Silva Farias

Plantas de cobertura e fontes de fósforo solúvel e reativa no acúmulo de massa e nutriente  
pelo milho em semeadura direta

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de mestre no curso de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente.

Data de aprovação: 14/08/2023.

### **Banca examinadora**

Documento assinado digitalmente



VALDEVAN ROSENDO DOS SANTOS

Data: 15/08/2023 10:32:47-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Valdevan Rosendo dos Santos  
Universidade Federal de Alagoas - UFAL  
Campus Arapiraca  
(Orientador)

Documento assinado digitalmente



EMERSON DOS SANTOS FERREIRA FARIAS

Data: 15/08/2023 11:03:27-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Emerson, dos Santos Ferreira Farias  
Faculdade São Vicente de Pão de Açúcar  
(Examinador)

Documento assinado digitalmente



DAYANE MERCIA RIBEIRO SILVA

Data: 15/08/2023 12:09:50-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr.<sup>a</sup> Dayane Mércia Ribeiro Silva  
Universidade Federal de Alagoas - UFAL  
Campus Arapiraca  
(Examinadora)

Documento assinado digitalmente



RICARDO BARROS SILVA

Data: 15/08/2023 11:39:20-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Ricardo Barros Silva  
Universidade Federal de Alagoas - UFAL  
Campus Arapiraca  
(Examinador)

Aos meus pais Batista Mendes (in memoriam)  
e Maria Cícera

Dedico

## AGRADECIMENTOS

À Deus e a Nossa Senhora por me conduzirem pelo caminho justo e seguro.

Sou grata ao meu orientador **Valdevan dos Santos**, cuja orientação, conhecimento e incentivo foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Seu apoio constante e valiosas sugestões ajudaram a moldar esta pesquisa.

Minha gratidão se estende às minhas colegas de curso **Ellen Karollyne, Marinez Silva, Vanda Duarte, Renata Barbosa, Edilene, Jéssia Elen e Mayara**. Ao grupo de Pesquisa e Extensão Solo Agreste, e aos meus amigos, **Wilker Germano, John Kennedy, Arthur Felix, Bruno Bispo, Luana Barbosa, Sivaldo Paulino, Matheus Silva e Alfredo Oliveira**, que estiveram ao meu lado durante essa jornada acadêmica. As boas risadas, troca de ideias e o compartilhamento de experiências tornaram essa jornada mais leve e prazerosa.

À banca examinadora **Ricardo Barros, Dayane Silva e Emerson Farias**, pelo tempo, esforço e dedicação dedicados à avaliação do meu trabalho.

Minha família merece uma gratidão especial por seu amor incondicional e incentivo contínuo. Seu apoio foi a força motriz que me impulsionou durante os momentos mais desafiadores deste percurso acadêmico. **Maria Cícera e Batista Mendes** (*in memoriam*), **Maria Izabel, Márcio Gabriel, Daniel Mendes, Valter Santos** e a todos que cuidaram tão bem de mim, muito obrigada!! O amor, paciência e encorajamento foram essenciais para superar os desafios e alcançar meus objetivos.

Agradeço também a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas – **FAPEAL**, pelo fornecimento recursos e financiamento para viabilizar esta pesquisa. À Universidade Federal de Alagoas - UFAL, pelo suporte tão essencial para a realização deste estudo.

Por fim, expresso minha admiração e gratidão a todos os pesquisadores e acadêmicos cujas obras e estudos contribuíram para a fundamentação teórica deste trabalho. Suas ideias e descobertas foram fontes de inspiração e enriqueceram meu conhecimento.

"Não caminhes sozinho. Encontrarás dificuldades. A amizade duplicará as tuas alegrias e dividirá as tuas tristezas".

São Josemaria Escrivá

## RESUMO

O sistema de plantio direto é amplamente adotado na produção de grãos, destacando-se pela sua importância na preservação do solo e na reciclagem de nutrientes. Uma compreensão profunda da dinâmica de dissolução e dispersão do fósforo no solo torna-se fundamental para avaliar a acessibilidade desse elemento às plantas e aprimorar a eficiência no uso de fertilizantes fosfatados. Este estudo teve por objetivo investigar a interação entre plantas de cobertura e diferentes fontes de fósforo solúvel e reativo, no que concerne ao acúmulo de biomassa e nutrientes pelo cultivo de milho em semeadura direta. O experimento foi conduzido na área experimental da Universidade Federal de Alagoas, *campus* Arapiraca. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com seis repetições. Os tratamentos foram distribuídos em parcelas (8 x 35 m) representadas pelas fontes de fósforo: superfosfato simples (solúvel), fosfato natural reativo (reativa) e sem aplicação de fósforo (sem P) e subparcelas (8 x 5 m) representadas pelas plantas de cobertura: *Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, *Cajanus cajan*, *Dolichos lablab*, *Canavalia ensiformis*, *Pennisetum glaucum* e um tratamento sem cobertura (controle). A *Crotalaria juncea* (18,5 t ha<sup>-1</sup>) e *Crotalaria spectabilis* (17 t ha<sup>-1</sup>) tiveram as maiores produções de massa verde, enquanto o *Cajanus cajan*, teve a menor produção, com 4,4 t ha<sup>-1</sup>. O acúmulo de massa seca, variou de 4,1 t ha<sup>-1</sup> a 1,1 t ha<sup>-1</sup> (*Crotalaria juncea* e *Cajanus cajan*, respectivamente). Os números de grãos por fileira são semelhantes entre plantas de cobertura e fontes de fósforo, com exceção do grupo de controle que teve a menor contagem (24) na fonte solúvel. O número de grãos por espiga variou de 417 a 502, e o comprimento das espigas variou de 13,5 (*Canavalia ensiformis*) a 15,5 cm (*Pennisetum glaucum*). As plantas de cobertura demonstraram uma notável capacidade de acúmulo de nutrientes, destacando-se N (116 kg ha<sup>-1</sup> *Crotalaria juncea*), K (*Crotalaria spectabilis* e *Crotalaria juncea*, com 79 kg ha<sup>-1</sup> e 73 kg ha<sup>-1</sup> de K, respectivamente) e Ca (*Crotalaria juncea* e *Crotalaria spectabilis* 43,5 kg ha<sup>-1</sup> e 34,8 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente). Não houve efeito significativo na produtividade do milho em sucessão as plantas de cobertura e sob diferentes fontes de P. A massa seca dos grãos, variou entre 6 e 6,5 t ha<sup>-1</sup> (sobre a palhada de *Dolichos lablab* e *Pennisetum glaucum*, respectivamente). A produtividade de grãos variou 6,8 a 7,5 t ha<sup>-1</sup>. Os grãos extraíram maiores quantidades de P (*Canavalia ensiformis* na fonte solúvel com 60,4 kg ha<sup>-1</sup> e Ca (42,3 kg ha<sup>-1</sup> em sucessão ao *Canavalia ensiformis* na fonte solúvel). E na parte aérea o maior acúmulo foi de K *Crotalaria spectabilis* com 188 kg ha<sup>-1</sup>) e P (*Crotalaria spectabilis*, com 53,4 kg ha<sup>-1</sup>). Não houve diferença significativa para extração total de N, Ca, Mg e S (p<0,05) no milho. A *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria juncea* e

*Canavalia ensiformis* mostraram-se promissoras na produção de biomassa e acúmulo de nutrientes, contribuindo para a melhoria da fertilidade do solo e, conseqüentemente, para a produtividade do milho na região do estado de Alagoas.

**Palavras-chave:** *Zea mays*; plantio direto; solubilidade de fosfato; ciclagem de nutriente; cobertura verde.

## ABSTRACT

The no-tillage system is widely adopted in grain production, standing out for its significance in soil preservation and nutrient recycling. A thorough understanding of phosphorus dissolution and dispersion dynamics in the soil becomes crucial to assess the accessibility of this element to plants and enhance the efficiency in the use of phosphate fertilizers. This study aimed to investigate the interaction between cover crops and different sources of soluble and reactive phosphorus concerning the accumulation of biomass and nutrients in no-tillage maize cultivation. The experiment was conducted in the experimental area of the Federal University of Alagoas, Arapiraca campus. The experimental design was a randomized complete block with six replications. The treatments were distributed in plots (8 x 35 m) represented by the phosphorus sources: single superphosphate (soluble), reactive natural phosphate (reactive), and no phosphorus application (no P). Subplots (8 x 5 m) were represented by cover crops: *Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, *Cajanus cajan*, *Dolichos lablab*, *Canavalia ensiformis*, *Pennisetum glaucum*, and a no-cover crop treatment (control). *Crotalaria juncea* (18.5 t ha<sup>-1</sup>) and *Crotalaria spectabilis* (17 t ha<sup>-1</sup>) had the highest green biomass production, while *Cajanus cajan* had the lowest production at 4.4 t ha<sup>-1</sup>. Dry biomass accumulation ranged from 4.1 t ha<sup>-1</sup> to 1.1 t ha<sup>-1</sup> (*Crotalaria juncea* and *Cajanus cajan*, respectively). The grain counts per row are similar between cover crops and phosphorus sources, except for the control group, which had the lowest count (24) in the soluble source. The number of grains per ear ranged from 417 to 502, and the ear length varied from 13.5 (*Canavalia ensiformis*) to 15.5 cm (*Pennisetum glaucum*). Cover crops demonstrated a remarkable ability to accumulate nutrients, with notable levels of N (116 kg ha<sup>-1</sup> for *Crotalaria juncea*), K (*Crotalaria spectabilis* and *Crotalaria juncea*, with 79 kg ha<sup>-1</sup> and 73 kg ha<sup>-1</sup> of K, respectively), and Ca (*Crotalaria juncea* and *Crotalaria spectabilis* with 43.5 kg ha<sup>-1</sup> and 34.8 kg ha<sup>-1</sup>, respectively). There was no significant effect on corn yield when planted after cover crops and under different sources of P. Grain dry weight ranged from 6 to 6.5 t ha<sup>-1</sup> (with the highest amounts observed on the *Dolichos lablab* and *Pennisetum glaucum* residues, respectively). Grain yield varied from 6.8 to 7.5 t ha<sup>-1</sup>. Grains extracted larger quantities of P (60.4 kg ha<sup>-1</sup> with *Canavalia ensiformis* using the soluble source) and Ca (42.3 kg ha<sup>-1</sup> when following *Canavalia ensiformis* with the soluble source). In the aboveground part, the highest accumulation was observed for K (*Crotalaria spectabilis* with 188 kg ha<sup>-1</sup>) and P (*Crotalaria spectabilis* with 53.4 kg ha<sup>-1</sup>). There was no significant difference in the total extraction of N, Ca, Mg, and S (p<0.05) in corn. *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria juncea*, and *Canavalia*

*ensiformis* showed promise in biomass production and nutrient accumulation, contributing to soil fertility improvement and, consequently, maize productivity in the state of Alagoas region.

**Keywords:** *Zea mays*; no-tillage; phosphate solubility; nutrient cycling; green cover.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Área, produtividade e produção nacional de milho (2021/2022).....	16
Tabela 2 - Atributos físicos e frações texturais das camadas 0-10 a 10-20 cm do solo da área experimental antes da instalação do experimento.....	29
Tabela 3 - Concentração de fósforo total e solúvel para o superfosfato simples e fosfato natural reativo.....	30
Tabela 4 – Análise de variância para massa verde e seca e macronutrientes da parte aérea das plantas de cobertura em rotação com o milho em sistema conservacionista do solo.....	34
Tabela 5 – Massa seca de grãos, massa seca da parte aérea, massa seca total e produtividade .....	45
Tabela 6 - Análise de variância da biometria da cultura do milho em sucessão a plantas de cobertura.....	47
Tabela 7 - Biometria do milho para número de grãos por fileira e número de grãos por espiga.....	48
Tabela 8-Análise de variância dos macronutrientes extraídos pelos grãos e parte aérea do milho em sucessão às plantas de cobertura e fontes de P com solubilidade distintas.....	50
Tabela 9 - Análise de variância da extração total (grãos e parte aérea) dos macronutrientes do milho em sucessão às plantas de cobertura e fontes de P com solubilidade distintas.....	57
Tabela 10 - Extração total (grãos e parte aérea) de N, Ca, Mg e S do milho em sucessão com plantas de cobertura e controle .....	60

## LISTA DE FIGURA

Figura 1 - Estágios vegetativos e reprodutivo do milho.....	19
Figura 2 - Área experimental da Universidade Federal de Alagoas, Campus Arapiraca.....	28
Figura 3 - Precipitação e temperatura máxima (Tmax), temperatura média Tmed) e temperatura mínima ( Tmin ) mensal durante o período experimental.....	29
Figura 4 - Aferição do comprimento de espiga (A), vista longitudinal da espiga do milho com marcação para contagem de número de fileiras por espiga (B) e debulha manual (C).....	32
Figura 5 - Massa verde (A) e massa seca (B) da parte aérea das plantas de cobertura.....	35
Figura 6 - Extração de N e K pelas plantas de cobertura.....	37
Figura 7 - Acúmulo de nutrientes da parte aérea de plantas de cobertura em rotação com o milho em sistema conservacionista do solo.....	41
Figura 8 - Comprimento de espiga.....	49
Figura 9 – Interação do acúmulo dos macronutrientes dos grãos do milho em sucessão às plantas de cobertura e fontes de P com solubilidade distintas.....	51
Figura 10 – Interação de acúmulo de P da parte aérea do milho em sucessão às plantas de cobertura e fontes de P com solubilidade distintas.....	55
Figura 11 - Acúmulo de K da parte aérea do milho em sucessão as plantas de cobertura.....	56
Figura 12 - Extração total de P pelo milho em sucessão às plantas de cobertura e fontes de P com solubilidade distintas.....	58
Figura 13 - Extração total de K pelo milho em sucessão com plantas de cobertura.....	59

## LISTA DE SIGLAS

DAS	Dias após a semeadura;
COE	Comprimento de espiga;
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento;
CTC	Capacidade de troca de cátions;
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária;
FAO	Food and Agricultural Organization;
FEBRAPDP	Federação Brasileira do Sistema Plantio Direto na Palha;
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
MO	Matéria orgânica;
MOS	Matéria orgânica no solo;
MSPA	Massa seca parte aérea;
MVPA	Massa verde parte aérea;
NFE	Número de fileiras por espiga;
NGF	Número de grãos por fileira;
PCs	Plantas de Cobertura;
PGT	Peso de grãos total;
PROD	Produtividade do milho;
SEAB/DERAL	Secretaria da Agricultura e do Abastecimento/ Departamento de economia;
SOC	Carbono orgânico no solo;
SPD	Sistema de plantio direto;
SSSA	Soil Science Society of America;
USDA	United States Departamento of Agricultura;

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
2.1	CULTURA DO MILHO.....	16
<b>2.1.1</b>	<b>Classificação e fenologia do milho.....</b>	<b>18</b>
2.2	SISTEMAS DE CULTIVO.....	20
2.3	PLANTAS DE COBERTURA.....	21
2.4	O FÓSFORO.....	24
<b>2.4.1</b>	<b>Fertilizantes fosfatados.....</b>	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>28</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA.....	28
3.2	DELINEAMENTO ESTATÍSTICO E TRATAMENTOS.....	29
3.3	IMPLANTAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO.....	30
3.4	AVALIAÇÕES REALIZADAS.....	31
<b>3.4.1</b>	<b>Plantas de cobertura.....</b>	<b>31</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Milho.....</b>	<b>31</b>
3.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	32
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>34</b>
<b>4.1</b>	<b>PRODUTIVIDADE E EXTRAÇÃO DE NUTRIENTES DA PARTE AÉREA DAS PLANTAS DE COBERTURA.....</b>	<b>34</b>
4.2	PRODUTIVIDADE E BIOMETRIA DO MILHO.....	45
4.3	EXTRAÇÃO DE NUTRIENTE.....	50
4.4	EXTRAÇÃO TOTAL DE NUTRIENTES.....	57
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>61</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A monocultura do milho (*Zea mays*) é caracterizada como versátil, com alto potencial genético produtivo, sendo cultivada em diversas condições agroclimáticas em todo o mundo, desempenhando um papel vital na segurança alimentar, na produção de biocombustíveis e em diversas indústrias, tornando-se uma cultura essencial para a economia e o bem-estar de muitas nações (DODIG *et al.*, 2021).

Pilar do agronegócio brasileiro, o milho, tem papel significativo na produção de grãos do país (IBGE, 2022). Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), o Brasil é o terceiro maior produtor de milho do mundo, entretanto, ainda possui uma produção classificada como baixa (113,27 milhões de toneladas). O Centro-Oeste do Brasil tem apresentado aumentos significativos na produção do milho (63,91 mil t ha<sup>-1</sup>) (CONAB, 2022), o Nordeste, produziu 10.71 mil t ha<sup>-1</sup>, e no estado de Alagoas a produção de milho foi de 58,37 t ha<sup>-1</sup> (BRASIL, 2022).

O potencial de crescimento e a integração do mercado brasileiro de milho têm atraído diversos agentes econômicos, incluindo consumidores, produtores, importadores, exportadores e especuladores, que estão ativamente envolvidos na compreensão da dinâmica do mercado. A produção de milho em Alagoas pode ser beneficiada pelo sistema de plantio direto, por não realizar o revolvimento do solo antes do plantio, deixando os restos culturais da safra anterior na superfície, potencializando as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (BAYER; MIELNICZUK, 1997; BLANCO-CANQUI *et al.*, 2022; FAO, 2023).

A adoção das plantas de cobertura potencializa esse sistema sendo uma estratégia que fornece serviços ecossistêmicos ao solo (BLANCO-CANQUI *et al.*, 2015), pela ciclagem nutrientes, cobertura do solo, diminuição da erosividade e da taxa evapotranspiratória (MALONE *et al.*, 2022; BLANCO-CANQUI *et al.*, 2022), contribuindo para uma redução no uso de fertilizantes e, portanto, nos custos de produção de milho. Ainda, as plantas de cobertura reduzem o impacto ambiental causado pela agricultura, com o menor consumo agroquímicos, combustíveis e liberação de gases de efeito estufa (PIVA *et al.*, 2021; FAO, 2023).

Dentre os nutrientes essenciais para o desenvolvimento do milho, o fósforo (P) desempenha papel relevante, pois está envolvido em processos bioquímicos que regulam o metabolismo energético das plantas, a transferência de energia nas células e a síntese de ácidos nucleicos (HELLMANN, 2020). No entanto, a solubilidade do P no solo é um dos principais fatores que limita sua disponibilidade para as plantas.

No Brasil, as principais fontes de P utilizadas são os fosfatos acidulados e fosfatos naturais. As fontes solúveis oferecem uma rápida disponibilidade para as plantas, enquanto fontes reativas têm liberação mais lenta, proporcionando um suprimento contínuo ao longo do ciclo de cultivo (VALDERRAMA *et al.*, 2009, SOUSA *et al.*, 2010). Nesse contexto, o uso de fontes de fósforo solúvel e reativa tem sido objeto de investigação científica com o intuito de suprir as necessidades nutricionais do milho em sistemas de semeadura direta.

As plantas de cobertura, por sua vez, se destacam como recicladoras de P, além disso, maximizam a produção de forma segura, sustentável e econômica, sendo acessíveis aos agricultores (RUIS; BLANCO-CANQUI, 2017; SANTOS *et al.*, 2020; BLANCO-CANQUI *et al.*, 2022). No entanto, o uso de plantas de cobertura do solo em sistemas de produção de grãos ainda é limitado a poucas propriedades. Isso indica que existe uma falta de compreensão sobre os benefícios que essa técnica pode trazer ao sistema produtivo, melhorando a qualidade do solo e, conseqüentemente, a qualidade dos grãos.

É possível que haja uma lacuna de conhecimento específico sobre o uso de plantas de cobertura na região semiárida, no entanto, a pesquisa proposta contribuirá para o desenvolvimento da agricultura na região semiárida brasileira, favorecendo para a sustentabilidade e produtividade das lavouras, além de fornecer um embasamento científico sólido para a adoção de práticas de plantio direto com plantas de cobertura nessa região. É importante realizar estudos de longo prazo para avaliar os efeitos das plantas de cobertura ao longo de várias safras e fornecer informações para os agricultores da região, ajudando-os a melhorar a produtividade e a sustentabilidade de suas lavouras.

Portanto, este estudo teve por objetivo investigar a interação entre plantas de cobertura e diferentes fontes de fósforo solúvel e reativo, no que concerne ao acúmulo de biomassa e nutrientes pelo cultivo de milho em semeadura direta.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CULTURA DO MILHO

O milho, atualmente, é produzido em quase todos os continentes, sendo um dos maiores commodities do agronegócio brasileiro, com sua importância econômica, apresentando diferentes finalidades como, alimentação animal, humana e na indústria para a conversão em alimentos, bebidas, bioenergia e derivados (PAES, 2006; RIBEIRO, 2014).

Na alimentação humana e animal, estima-se ainda que existam mais de 3.000 derivados do milho, como bebidas, polímeros e combustíveis (GALON *et al.*, 2010; SHI *et al.*, 2019; EMBRAPA, 2022). Embora o milho tenha tais utilidades, a principal razão histórica de seu cultivo tem sido a produção de alimentos, devido às suas propriedades nutricionais, contendo quase todos os aminoácidos conhecidos, com exceção da lisina e do triptofano, assim os grãos foram incorporados nas dietas das pessoas ao redor do mundo (SEAB/DERAL, 2018; HERNÁNDEZ *et al.*, 2022; RIBEIRO, 2014; PEREIRA FILHO, BORGHI, 2022).

O United States Department of Agriculture (USDA), estima que a produção mundial de milho atingiu 1.216.866 mil t ha<sup>-1</sup> em 2021/2022 (USDA, 2023). O Brasil é o terceiro maior produtor de milho do mundo, com produção estimada em 113.27 t ha<sup>-1</sup> em 2021/2022. A produção de milho no Nordeste, correspondeu a 10,70 mil t ha<sup>-1</sup> (Tabela 1), enquanto no estado do Alagoas a produziu 58,37 t ha<sup>-1</sup> (BRASIL, 2022).

Tabela 1 - Área, produtividade e produção nacional de milho (2021/2022)

Unidade geográfica	Área (ha)	Produtividade (kg ha <sup>-1</sup> )	
		1)	Produção (t ha <sup>-1</sup> )
		2021/22	
Norte	1.080,20	4.279	4.622,70
Nordeste	3.177,20	3.370	10.706,90
Centro-Oeste	10.712,60	5.966	63.912,80
Sudeste	2.282,40	5.279	12.048,20
Sul	4.329,50	5.077	21.981,50
<b>Brasil</b>	<b>21.581,90</b>	<b>5.248</b>	<b>113.272,10</b>

Fonte: CONAB (2022).

Prevê-se um aumento na atividade de cultivo de milho no Nordeste, embora em uma escala mais moderada em comparação com o cenário nacional (COELHO, 2021). Esse impulso de expansão agrícola está concentrado principalmente em duas regiões com um foco empresarial, as quais desempenham um papel crucial, representando 87% da produção total

de milho na área. A primeira dessas regiões é conhecida como Matopiba, abrangendo os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. A segunda região é denominada Sealba, englobando os estados de Sergipe, Alagoas e a porção nordeste da Bahia (CONAB, 2022).

Na região de Matopiba, especificamente, o clima favorável e as condições do solo propiciam o cultivo de milho de forma rentável. Além disso, os agricultores têm tido acesso a tecnologias avançadas, como sementes melhoradas e práticas de manejo mais eficientes, que ajudam a aumentar a produtividade e a qualidade dos grãos (COELHO, 2021; FERRAZ-ALMEIDA, 2023). Na região de Sealba, embora o clima seja mais desafiador, os agricultores têm adotado técnicas de manejo adequadas para enfrentar as adversidades, o que tem permitido um aumento gradual na produção de milho (EMBRAPA, 2023).

O semiárido brasileiro sofre com a instabilidade de cultivo, causada, principalmente, pela condicionante climática e hídrica, o que pode afetar a produtividade e a viabilidade do cultivo (EMBRAPA, 2016; SCHMIDT; LIMA; JESUS, 2018). Apesar dos desafios, a perspectiva de aumento na produção de milho no Nordeste é promissora e pode contribuir para o desenvolvimento econômico da região, gerando empregos e impulsionando o agronegócio (PIVA, 2023).

A produção brasileira de milho teve acréscimo nos últimos anos e tende a aumentar devido às exportações e a demanda para a produção de etanol (PAVINATO, *et al.*, 2008; BRASIL, 2022). A produção projetada é para 149,9 milhões de toneladas em 2031/2032. A área plantada de milho também deve ter um acréscimo anual de 1,2% entre 2021/22 e 2031/32, passando de 21,5 milhões de hectares para 21,75 milhões (BRASIL, 2022; CONAB, 2022).

O estado de Alagoas está se destacando como o de maior crescimento no Brasil, registrando um notável aumento de 120% em 2023. Esse avanço contribui para elevar a participação da colheita no Nordeste para 11%, e impulsionar a produção total do país para 17% (CONAB, 2023).

No entanto, é necessário buscar alternativas de manejo para garantir a sustentabilidade da atividade agrícola nesse contexto, com sistemas de manejo conservacionista, melhoramento genético e utilização de sistemas de gotejamento e fertirrigação. O apoio técnico e capacitação dos agricultores também são fundamentais para o sucesso dessas práticas.

Na nutrição das plantas de milho, fatores como a disponibilidade de nutrientes no solo e a sua absorção pelas raízes das plantas são determinantes para o aumento da produtividade (COELHO, 2006). A produtividade do milho também é influenciada por fatores climáticos,

como a quantidade e distribuição das chuvas, a temperatura e a incidência de ventos (AMANULLAH; FAHAD, 2018). Sendo assim, é necessário acompanhar as condições climáticas da região e realizar um planejamento adequado das atividades de cultivo do milho para minimizar os impactos negativos do clima na produção.

### **2.1.1 Classificação e fenologia do milho**

O milho é uma planta herbácea e monoica pertencente à ordem Gramineae, família Poaceae, tribu Maydeae, gênero *Zea* e espécie *Zea mays* (CONAB, 2019). O metabolismo fotossintético C4 do milho permite que a planta seja mais eficiente na utilização de recursos como luz, água e nutrientes, o que contribui para sua alta produtividade em condições de alta luminosidade e temperaturas elevadas (EHLERINGER; CERLING; HELLIKER, 1997; GALON *et al.*, 2010).

O ciclo de metabolismo C4 ocorre em duas fases: a fixação do CO<sub>2</sub> e a redução do CO<sub>2</sub>. Na primeira fase, o CO<sub>2</sub> é fixado em uma molécula de fosfoenolpiruvato (PEP), formando um composto de 4 carbonos chamado oxalacetato (OAA). O OAA é então convertido em malato ou aspartato e transportado para as células do feixe vascular. Na segunda fase, o malato ou o aspartato são descarboxilados, liberando CO<sub>2</sub> na proximidade da Rubisco, então o CO<sub>2</sub> liberado é utilizado no ciclo de Calvin e Benson para a produção de carboidratos (HAN *et al.*, 2023, CUBAS *et al.*, 2023).

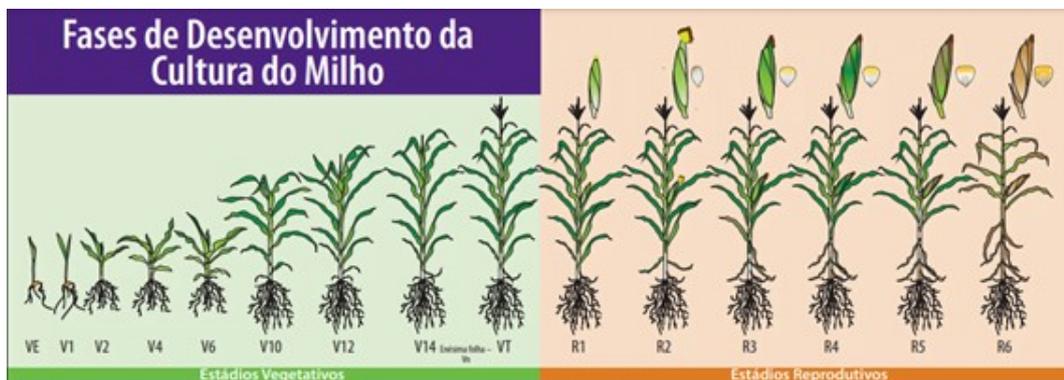
A cultura do milho é anual e possui uma grande variabilidade genética, possibilitando o desenvolvimento de diferentes variedades adaptadas a diversos ambientes e condições de cultivo (BARROS; CALADO, 2014). O caule do milho é ereto, cilíndrico e pode atingir cerca de 1,5 - 2,4 metros de altura, dependendo da variedade e das condições de cultivo. As folhas são alternas e possuem formato lanceolado, ou seja, são longas e estreitas, com bordas serrilhadas (EMBRAPA, 1996; USDA, 2023).

A inflorescência do milho é denominada espiga e é composta por numerosas flores masculinas e femininas. As flores masculinas estão localizadas na parte superior da espiga, formando a panícula. Já as flores femininas estão localizadas na base da espiga e são protegidas por um involúcro de folhas denominado palha. Após a polinização, os grãos de milho se desenvolvem e ficam dispostos em fileiras ao longo da espiga, envoltos em cascas ou palhas (EMBRAPA, 1996; SHI *et al.*, 2019).

O período vegetativo do milho pode ser dividido em fases vegetativas (V) (da emergência ao apendoamento) e reprodutiva (R) (embonecamento à maturidade fisiológica) (NLEYA; CHUNGU; KLEINJAN, 2019).

Os estágios vegetativos são VE – emergência; V1 – primeira folha; V2 – segunda folha; V3 – terceira folha; V6 – sexta folha; V9 – nona folha; V12 – décima segunda folha; V15 – décima quinta folha; V18 – décima oitava folha; VT - apendoamento. Os estágios reprodutivos são: R1 – florescimento; R2 – grãos leitosos; R3 – grão pastoso; R4 – grão farináceo; R5 – grão farináceo-duro; R6 – maturidade fisiológica (RITCHIE *et al.*, 1993; RIBEIRO, 2016; DODIG *et al.*, 2021).

Figura 1 - Estágios vegetativos e reprodutivo do milho



Fonte: Ciampitti; Elmore; Lauer (2016).

O desenvolvimento do milho varia entre 20-21 folhas totais, floresce cerca de 65 dias após a emergência e atinge sua maturidade fisiológica com aproximadamente 125 dias após a emergência (RIBEIRO, 2006). Fatores ambientais, como temperatura, deficiências hídrica e nutricional podem afetar o desenvolvimento da planta. Outros fatores também podem causar danos às plantas, como doenças, infestações de insetos e disponibilidade de P (RIBEIRO, 2016).

O P desempenha funções importantes no desenvolvimento do milho, desde a formação das sementes até o crescimento e produção de grãos. Ele participa da fotossíntese, respiração e na transferência de energia nas células vegetais, assim como na regulação do ciclo celular e da produção de hormônios vegetais, como a auxina, que auxiliam no crescimento da planta. Durante o estágio reprodutivo do milho, o P é essencial para a produção de grãos, pois desempenha um papel fundamental na formação de amido (NOVAIS; SMYTH, 1999; GATIBONI *et al.*, 2005).

O P também está envolvido na síntese de proteínas e lipídios, fundamentais para o crescimento dos grãos e o desenvolvimento das sementes (GATIBONI *et al.*, 2005). A quantidade de P para o crescimento ideal é menor quando comparado ao N e K. E na produção de grãos, observa-se que entre 80 a 90% do P total absorvido pelas plantas de milho é direcionado para o desenvolvimento dos grãos (GITTI, 2014; SICHOCKI *et al.*, 2014).

## 2.2 SISTEMAS DE CULTIVO

No sistema convencional o manejo do solo é permitido que ocorra alta degradação tornando o solo menos fértil, além disso as intensas práticas agrícolas com pousio curto, prática de monocultura, uso inadequado de fertilizantes inorgânicos contribuíram para que haja declínio na qualidade ambiental, biodiversidade e produção agrícola (ARRIAGA, *et al.*, 2017).

Devido ao revolvimento do solo em grande escala, o solo é condicionado à vulnerabilidade devido a sua exposição o que pode causar poluição e eutrofização de mananciais, aumentando os custos com adubação e provocar a degradação de agroecossistemas (HERNANI; KURIHARA; SILVA, 1999; SALOMÃO *et al.*, 2020). A mobilização da camada arável do solo tida no sistema convencional acelera a oxidação da matéria orgânica e promove o desarranjo dos agregados, tornando-os menos estáveis conduzindo a perda de nutrientes e matéria orgânica pelo carreamento de sedimentos do perfil do solo (BRASIL, 2012).

Enquanto, o sistema de plantio direto (SPD), aspira a produção conservacionista pretendendo além de aumentar os níveis de produção, contribuir para a qualidade do solo, de modo a proteger das condições edafoclimáticas e mecânicas, promovendo um aumento da biodiversidade no agroecossistema (FAO, 2023).

Esse sistema tenciona a produtividade de alimentos, fibras e energia, de maneira sustentável fundamentada em três pilares: o não revolvimento do solo, a cobertura permanente do solo (plantas vivas ou palhadas) e a diversificação de plantas na rotação de cultivos (FEBRAPDP, 2023), criando um ambiente favorável para a cultura e para a recuperação ou manutenção da qualidade do solo.

Essa técnica tem se mostrado bastante eficiente na produção de algumas culturas, como soja e milho. Isso se deve ao fato de que o plantio direto ajuda a conservar a umidade do solo, evitando a evaporação da água. Além disso, o sistema de plantio direto promove uma maior biodiversidade no solo, o que contribui para o controle natural de pragas e doenças,

reduzindo a necessidade de uso de agroquímicos. Isso é especialmente importante para a produção sustentável, uma vez que culturas como o milho são altamente suscetíveis a doenças e pragas (CIVIDANES, 2002; MONZÓN *et al.*, 2022).

A implementação do SPD é crescente em todas as regiões do mundo devido aos resultados positivos da recuperação de áreas degradadas, contribuição para o equilíbrio do meio ambiente e aumento significativo das culturas comerciais. Parte da eficiência do SPD, está relacionada com a manutenção do solo, a palhada das culturas e cobertura, somada aos resíduos das culturas comerciais (MALAVOLTA *et al.*, 2001).

A manutenção dos resíduos vegetais sobre o solo no SPD promove aumento da atividade biológica (HERNANI; KURIHARA; SILVA, 1999), aumentam a capacidade de troca catiônica (CTC) e os teores de matéria orgânica, P e K nas camadas superficiais do solo (BAYER; MIELNICZUK, 1997; CASTRO FILHO *et al.*, 1998; SANTOS; TOMM, 2003), melhora a disponibilidade de nutrientes (BLANCO-CANQUI *et al.*, 2022).

O sistema de plantio direto tem ganhado crescente destaque na agricultura, especialmente na produção de culturas, como soja e milho, devido aos seus benefícios, que incluem melhorias na infiltração da água no solo, na agregação do solo e na ciclagem de nutrientes, proporcionando rendimentos mais elevados de produção em comparação com as condições de cultivo convencionais (ALBUQUERQUE *et al.*, 2013; PAVINATO *et al.*, 2017; SANTOS *et al.*, 2020; PIRES *et al.*, 2020).

### 2.3 PLANTAS DE COBERTURA

Plantas de cobertura (PCs) foi definida pela Soil Science Society of America (SSSA) como “Cultivo de crescimento próximo, que fornece proteção do solo, proteção de semeadura e melhoria do solo entre períodos de produção agrícola normal, ou entre árvores em pomares e videiras em vinhedos. Quando aradas sob e incorporadas ao solo, as plantas de cobertura podem ser referidas como culturas de estrume verde” (SSSA, 2023).

Essas culturas são conhecidas por sua multifuncionalidade, são cultivadas principalmente por seu efeito na fertilidade do solo ou como forragem. As PCs melhoram os serviços ecossistêmicos (BLANCO-CANQUI *et al.*, 2022; FAO, 2023), potencializando as propriedades físicas, químicas e orgânicas do solo (ADETUNJI *et al.*, 2020; SCHIEBELBEIN *et al.*, 2022), podendo ser utilizadas como estratégia para amenizar os efeitos negativos da remoção de resíduos do solo, favorável às produções agrícolas (RUIS; BLANCO-CANQUI, 2017).

A biomassa produzida por PCs gera impactos positivos no ecossistema do solo (BLANCO-CANQUI *et al.*, 2015), promovendo acúmulo de C no solo, diminuição de erosão eólica em períodos de pousio e/ou entre a colheita e plantio, erosão hídrica, disponibilidade de N, aumento na biomassa microbiana, reduz a compactação do solo, equilíbrio hídrico no solo, pode promover reserva nutricional, decréscimo de plantas daninhas e aumento no rendimento das culturas subsequentes (DABNEY *et al.*, 2011; BLANCO-CANQUI *et al.*, 2022).

A quantidade de biomassa produzida por PCs equivale ao acúmulo de carbono orgânico no solo (SOC), fundamental nas mudanças nos ecossistemas do solo (BÜNEMANN *et al.*, 2018; BLANCO-CANQUI *et al.*, 2022; FAO, 2023). Além disso, devido à quantidade de áreas cultiváveis combinada com a concentração de sequestro de C no solo, ocorre uma interferência efetiva e sustentável para a redução das mudanças climáticas (COSTA; SILVA; RIBEIRO, 2013; BLANCO-CANQUI *et al.*, 2015; RIBEIRO, 2016;).

A estabilização ou proteção de SOC é realizada através de três mecanismos gerais: (1) estabilização química, (2) bioquímica e (3) física (SIX *et al.*, 2002). A estabilização química do SOC ocorre através de ligações químicas entre MOS e minerais do solo (ou seja, partículas de argila e silte). A estabilização bioquímica é proporcionada pela complexidade do material orgânico subjacente (celulose, hemicelulose e lignina), e a estabilização física, fornecida por meio do tamanho e estabilidade dos agregados estáveis do solo, estando envolvidos na proteção de materiais orgânicos contra organismos decompositores (SIX *et al.*, 2002; TAIZ; ZEIGER, 2006; RUIS; BLANCO-CANQUI, 2017).

Em regiões temperadas as PCs apresentam melhores rendimentos na produção de biomassa, já em regiões semiáridas ou áreas de solos erodidos e degradados as PCs produzem quantidades menores de biomassas (BLANCO-CANQUI *et al.*, 2022). De todo modo, essas culturas são benéficas devido a proteção do solo em períodos de pousio, auxiliando em sua manutenção estrutural até o aporte de carbono (CHERUBIN *et al.*, 2022). Através da inserção de PCs precedendo a cultura principal, é viabilizado nutrientes presentes nos resíduos vegetais das plantas, disponibilizando função estrutural e estoque de substâncias importantes para a cultura subsequente (SOUZA; MELO, 2000).

O critério de seleção das PCs baseia-se no sistema de cultivo e nas janelas de plantio, a fim de determinar o início e o fim do cultivo das PCs (LEMESSA; WAKJIRA, 2015; OBOUR *et al.*, 2021). Além disso, essa escolha leva em considerações algumas características, como: tolerância ao déficit hídrico (BLANCO-CANQUI *et al.*, 2015), alta produção de fitomassa (BÜNEMANN *et al.*, 2018), crescimento inicial rápido, controle de pragas, doenças e plantas daninhas, além de alta taxa de decomposição (baixa relação C/N)

(RUIS; BLANCO-CANQUI, 2017; CHERUBIN *et al.*, 2022; BLANCO-CANQUI *et al.*, 2022).

De forma direta, as plantas que contém raízes fibrosas extensas (fasciculadas) têm um sistema radicular que aumenta a superfície de contato dos nutrientes com a rizosfera, aumentando da agregação por meio da produção de macroagregados estáveis, o que incentiva maior capacidade de manutenção do sistema radicular e resistência a pressões externas. (BRONICK, LAL, 2005; CHERUBIN *et al.*, 2022). O sistema de enraizamento atinge diferentes profundidades variadas nos perfis do solo, dessa maneira, as raízes têm a capacidade de minerar o solo absorvendo diferentes quantidades de nutrientes e produzir exsudados radiculares distintos (ácidos orgânicos), resultando em benefícios tanto para o solo quanto para os organismos (EPSTEIN; BLOOM, 2006; FAO, 2023).

As espécies mais empregadas no sistema de plantio direto (SPD) pertencem as famílias botânicas Fabaceae (leguminosas), Poaceae (gramíneas) e Brassicaceae. A família botânica das leguminosas, compõe um grupo numeroso de espécie de importância econômica e ecológica (CARDOSO; ANDREOTE, 2016). Uma das características dessa família é pela capacidade de manter relação simbiótica com bactérias fixadoras de N (ANDERSON, *et al.*, 2022; MALONE, *et al.*, 2022; ZHAO *et al.*, 2022). Essas bactérias fixadoras de N pertencem à classe Alphaproteobacteria (ordem Rhizobiales, gêneros Allorhizobium, Azorhizobium, Bradyrhizobium, Mesorhizobium, Rhizobium e Sinorhizobium) (YOUNG, 1992).

Além de desempenhar um papel significativo na fixação biológica, a decomposição de resíduos culturais regula a ciclagem de nutrientes, aumentando a disponibilidade de P, N, K e outros macro e micronutrientes para as culturas sucessivas (GRIFFITHS *et al.*, 2021; CHERUBIN *et al.*, 2022). Algumas espécies de leguminosas têm sido estudadas, como *Crotalaria juncea* (BLANCO-CANQUI *et al.*, 2015), *Crotalaria spectabilis*, *Dolichos lablab* (ALVARENGA *et al.*, 2001), *Canavalia ensiformis* (LÓPEZ, 2012) e *Cajanus cajan* (SANTOS *et al.*, 2020), a fim de, propiciar aumento no rendimento da cultura devido aos efeitos combinados e inter-relacionados do fornecimento de N e controle de pragas e doença, melhorando a qualidade do solo (ZHAO *et al.*, 2022). As leguminosas apresentam alta taxa de decomposição e o menor tempo de meia vida, quando comparada com as gramíneas (TORRES *et al.*, 2014).

A família das gramíneas apresenta importância ecológica e econômica com vasta diversidade de utilidades (BOLDRINI; LONGHI-WAGNE; BOECHAT, 2012). As gramíneas produzem quantidade considerável de biomassa e apresentam sistemas radiculares fibrosos eficientes na captura de nutrientes, como os nitratos residuais e os devolvem ao solo na forma

de N orgânico, além de reduzir a erosividade, compactação do solo, controlar patógenos e plantas daninhas (GRIFFITHS *et al.*, 2021; MORALES *et al.*, 2021). A utilização de gramíneas, como o *Pennisetum glaucum*, no SPD pode aumentar a estabilidade hídrica e os agregados secos do solo em comparação com o pousio (ABOUR *et al.*, 2021), além de apresentar alta produção de biomassa e valor nutritivo (BLANCO-CANQUI *et al.*, 2015; ALMEIDA *et al.*, 2020).

A mistura das plantas de cobertura pode apresentar diferentes características funcionais nos sistemas agrícolas, melhorando potencialmente os serviços ecossistêmicos, por ajudar a equilibrar os nutrientes do solo, aumentar a fertilidade e melhorar o uso de fertilizante mineral (BLANCO-CANQUI *et al.*, 2015). Ainda, elas aumentam a atividade de microrganismos solubilizadores, incrementam o teor de matéria orgânica, reduzem a lixiviação de P e melhoram a estrutura do solo, com seus sistemas radiculares. Isso contribui para uma maior disponibilidade de P para as plantas cultivadas, o que pode levar a uma melhor produtividade agrícola (CALONEGO; ROSOLEM, 2013; PAVINATO *et al.*, 2017).

## 2.4 O FÓSFORO

O fósforo (P) é um macronutriente de origem mineral, presente na litosfera nas rochas sedimentares (85%) e nas rochas ígneas (15%) (PEREIRA; COSTA; CARVALHO, 2021). Os depósitos de P não são distribuídos uniformemente no mundo, tendo maior prevalência em um único país, o Marrocos, respondendo por 40% total do P encontrado mundialmente, seguido dos Estados Unidos e China (VACCARI, 2009). Devido às reservas lavráveis de P serem finitas e a intensificação da utilização em práticas agrícola, o P tornou-se causa de preocupação referente a um esgotamento mundial dentro de algumas décadas acrescentando uma dimensão geopolítica à escassez de P (HALLAMA *et al.*, 2018).

O P total do solo ( $P_{total}$ ) compreende as frações do P na solução do solo e a fase sólida no solo, sendo encontrado na forma orgânica ( $P_o$ ) e inorgânica ( $P_i$ ) (frações), com diferentes graus de labilidade, e sua distribuição é dependente da natureza química do ligante, levando em consideração a energia de ligação entre o solo e o P (GATIBONI *et al.*, 2005). Destarte, a dinâmica do P no solo depende dos fatores ambientais, condições químicas, físicas e mineralógica do solo.

O  $P_o$  (5 – 80% do  $P_{total}$ ), é oriundo de resíduos vegetais depositados no solo, animais, do tecido microbiano e dos produtos de sua decomposição (PEREIRA; COSTA;

CARVALHO, 2021). Estima-se que o tecido vegetal, geralmente contém 0,05 a 0,5% de P (BINI; LOPES, 2016).

As principais formas de Po no solo estão em moléculas como os fosfatos diésteres (fosfolipídios com 5 a 7% de Po e ácido nucleico-P com ~3% do Po) e os fosfatos monoésteres (fosfatos de inositol (fitato) com 10 a 80% do Po). Os fosfatos diésteres são bastante suscetíveis ao ataque microbiano e representam uma fonte lábil de P (BINI, LOPES, 2016). Os fosfatos monoésteres representam a maior fração de Po do solo, eles são compostos de alta carga residual, sendo fortemente adsorvidos aos óxidos de Al, Ca e Fe, permanecendo protegidos química e fisicamente do ataque microbiano dificultando o processo de mineralização do P (DALAL, 1977; BINI; LOPES, 2016; HALLAMA *et al.*, 2018).

O Po pode contribuir para a nutrição das culturas através de carboxilatos exsudados das plantas e microbianos para mobilização e subsequente mineralização enzimática (NOVAIS; SMYTH, 1999), tornando o Pi disponível para as plantas (HALLAMA *et al.*, 2018).

O Pi é classificado em dois grupos, o P dos minerais primários, ou P estrutural, e o P adsorvido ou precipitado à fração coloidal mineral do solo. O Pi pode ser encontrado nas formas de P-não-lábil (não assimilável às plantas) e P-lábil (P solúvel). Este último, encontra-se nas formas de ácido fosfórico, ácido ortofosfórico, ácido monofosfórico e íon fosfato (NOVAIS; SMYTH, 1999; BINI; LOPES, 2016).

Frequentemente há a necessidade de transformar o P não lábil em P lábil, a fim de, torná-lo disponível para as plantas, tornando-se necessária a adubação fosfatada aliada a outras formas de manejo, como a calagem, que permitem a melhoria na fertilidade do solo pela disponibilidade do P para as plantas, atendendo os requerimentos nutricionais das culturas (NOVAIS; SMYTH, 1999; PEREIRA *et al.*, 2020). Desse modo, o P se configura como essencial para a vitalidade celular, por ser fator limitante no desenvolvimento vegetal, caso não seja fornecido pelo solo ou por quantidades adequadas de fertilizantes (CHIEN; PROCHNOW; TU, 2010).

A disponibilidade de P no solo para a planta é afetada pela capacidade do poder tampão do solo (fator intensidade), a qual está relacionada entre o fator quantidade (P-lábil) e intensidade (P-solução). A redução do P-solução está ocorrendo frequentemente através dos processos diversos, como a absorção dos nutrientes, imobilização, fixação, lixiviação e retrogradação (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Em solos mais intemperizados (eletropositivos), como latossolos (39% da área total do Brasil) e argissolos (aproximadamente 24% da superfície do Brasil), que juntos representam

aproximativamente 63% dos solos brasileiros (PEREIRA *et al.*, 2020), a capacidade de troca catiônica (CTC efetiva) diminui, a adsorção aniônica aumenta, diminui a saturação por bases, enquanto aumenta gradualmente a retenção de ânions, dessa maneira a disponibilidade de P para as plantas se torna reduzida (NOVAIS; SMYTH, 1999, GATIBONI *et al.*, 2013; PEREIRA; COSTA; CARVALHO, 2021).

A adsorção de P é característico principalmente em solos argilosos, em que o fator quantidade e intensidade é maior, quando comparado com solos arenosos. Além disso, o processo de intemperismo, altera as características do solo pode alterar sua função de fonte ou dreno de P para atender às necessidades das plantas ou competir com elas, fixando o P adicionado ao solo em sítios ativos (VINHA *et al.*, 2021).

As plantas absorvem P principalmente como íons ortofosfato primário e poucas quantidades de ortofosfato secundário (LOPES, 1998). No vegetal, o P é participante da composição metabólica dos vegetais, constituinte da composição estrutural do DNA e RNA (HELLMANN, 2020), além de ser um elemento crítico para o ATP (adenosina-5'-trifosfato), ácidos nucleicos, proteínas e fosfolipídios (CHIEN; PROCHNOW; TU, 2010). O P atua no crescimento e desenvolvimento vegetal, formação de frutos, alongamento celular e no crescimento radicular das plantas (PEREIRA, COSTA, CARVALHO, 2021), além disso, a ciclagem de P é um componente importante dos ciclos biogeoquímicos globais (REED *et al.*, 2015).

Existem alguns mecanismos que afetam o P do solo, são eles: remoção de biomassa das culturas colhidas, precipitação, temperatura média, drenagem, pH do solo, teor de fósforo inorgânico do material de origem, teor de enxofre em áreas de baixos retornos atmosféricos (DALAL, 1977), por erosão e lixiviação, e é acompanhado pelo acúmulo de formas de P de baixa disponibilidade (HALLAMA *et al.*, 2018). Contudo, são necessárias técnicas para repor ou disponibilizar os nutrientes essenciais removidos ou adsorvidos do solo, como a utilização de plantas de cobertura, aplicação de adubação fosfatada e a calagem (PEREIRA *et al.*, 2020).

#### **2.4.1 Fertilizantes fosfatados**

Os fertilizantes fosfatados (FP) são fabricados principalmente a partir do fosfato de rocha e os depósitos mais importantes são de origem sedimentar. Esses depósitos são formados nos oceanos e posteriormente elevados em massas de terra através de processos geológicos ou por tecnologias (RAJAN; UPSDELL, 2020).

Os fertilizantes fosfatados inorgânicos são as principais fontes de P nos solos agrícolas, em países desenvolvidos e em países em desenvolvimento, como no Brasil. A utilização dos FP na agricultura melhora a qualidade da cultura, por viabilizar P-disponível na solução do solo, necessário para atender a demanda necessária de alimentos (CHEIN *et al.*, 2011). Tendo maior eficiência em fertilizantes tratados com ácidos, como ácidos sulfúricos ( $H_2SO_4$ ) e fosfórico ( $H_3PO_4$ ).

No Brasil, os principais FP são os fosfatos totalmente acidulados: Superfosfato Simples (SSP) e Superfosfato Triplo (TSP); os fosfatos de amônio: Monoamônio fosfato (MAP) e diamônio de fosfato (DAP); termofosfatos (termofosfatos de magnésio) e fosfato natural (CHEIN *et al.*, 2011; HECKENMÜLLER; NARITA; KLEPPER, 2014).

O superfosfato simples é um fertilizante que é produzido a partir da reação entre o fosfato de rocha e o ácido sulfúrico. O ácido sulfúrico é adicionado ao fosfato de rocha para solubilizar o fosfato presente no material, tornando-o disponível para as plantas. O SSP contém cerca de 18% de pentóxido de P ( $P_2O_5$ ), que é a forma pela qual o fósforo é expresso nos fertilizantes. Cerca de 18 a 20% de cálcio (Ca) e entre 10 a 12% de enxofre (S). Portanto, o SSP é um fertilizante que fornece P, Ca e S para as plantas, contribuindo para seu desenvolvimento, saúde e produção (HECKENMÜLLER; NARITA; KLEPPER, 2014). O uso desse fertilizante auxilia no suprimento dos nutrientes necessários para as culturas, especialmente em solos deficientes nesses elementos (IDI *et al.*, 2023).

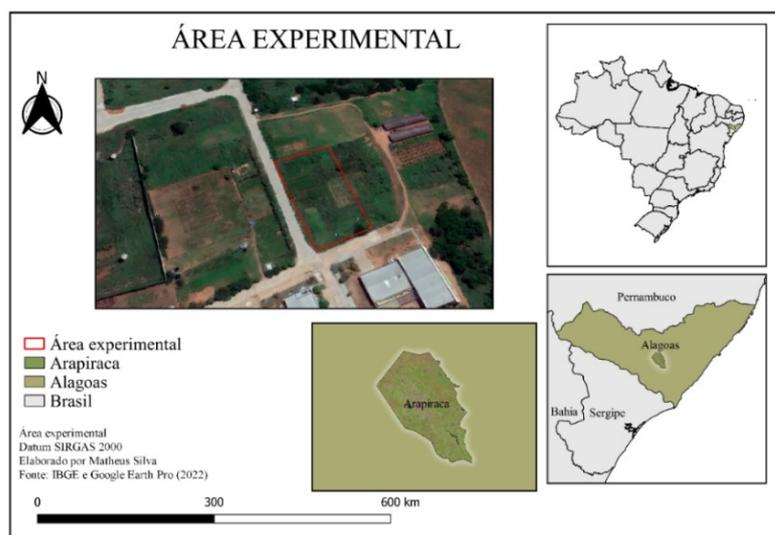
O fosfato natural é obtido através da moagem da apatita ou fosforita e pode ser dividido em dois tipos: fosfato natural pouco reativo e fosfato natural reativo (PR). O fosfato natural pouco reativo é de origem magmática e é mais adequado para culturas a longo prazo, como culturas perenes. Esse tipo de fertilizante contém cerca de 24% de  $P_2O_5$ , com no mínimo 4% solúvel em ácido cítrico, e cerca de 23 a 27% de Ca. Já o fosfato natural reativo é de origem sedimentar e possui uma maior solubilidade. Ele contém cerca de 29% de  $P_2O_5$  total, com no mínimo 9% solúvel em ácido cítrico, e cerca de 30 a 35% de Ca (RAJAN; WATKINSON; SINCLAIR, 1996; LEIKAM; ACHORN, 2005). Esses fosfatos naturais fornecem P às plantas de forma sustentável e duradoura em comparação com fertilizantes sintéticos e devido sua reação mais gradual no solo, fornecendo nutrientes por um longo período de tempo (NOLLA *et al.*, 2018).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

O estudo foi conduzido em condições de campo na área experimental da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) *campus* Arapiraca ( $9^{\circ}42'00''$  S,  $36^{\circ}41'12''$ W, 324 m de altitude) (Figura 3). De acordo com a classificação de Köppen o clima da região é do tipo As', tropical com estações de chuvas bem definidas (abril - agosto) e seca (setembro - março), com precipitação média anual de 850 mm e temperatura do ar média  $25^{\circ}\text{C}$  (ALVARES *et al.*, 2017).

Figura 2 - Área experimental da Universidade Federal de Alagoas, Campus Arapiraca

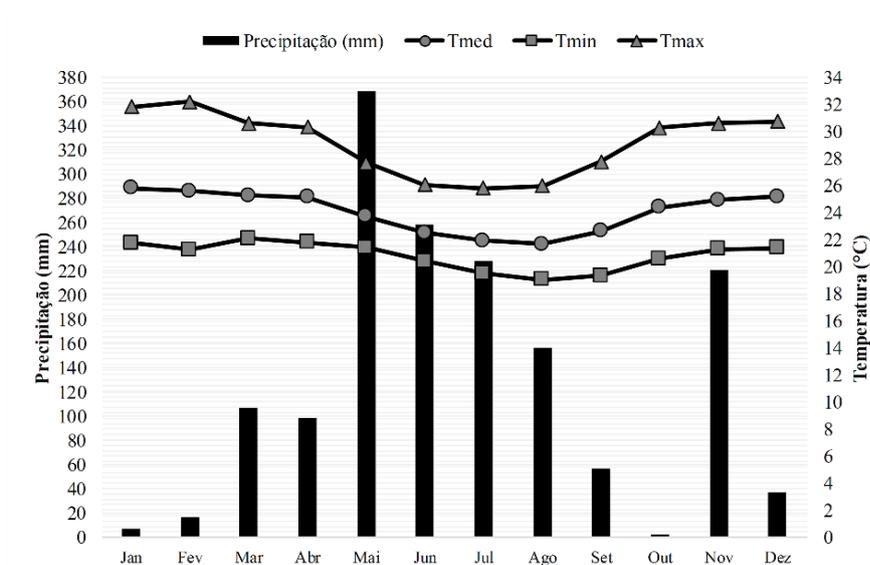


Fonte: IBGE (2022); Google Earth (2022).<sup>1</sup>

Os dados da precipitação pluvial e da temperatura do ar durante o período experimental (Figura 3), foram cedidos pelo Laboratório de Agrometeorologia do *Campus* Arapiraca/UFAL, que gerencia estação meteorológica automática (Micrologger – CR 1000, Campbell Scientific, Logan, Utah).

<sup>1</sup> Disponível em: <https://earth.google.com/web/search/Universidade+Federal+de+Alagoas+-+Campus+de+Arapiraca>. Acesso em: 21 out. 2023.

Figura 3 - Precipitação e temperatura máxima (Tmax), temperatura média Tmed) e temperatura mínima ( Tmin ) mensal durante o período experimental



Fonte: Estação Meteorológica localizada na Universidade Federal de Alagoas – Campus Arapiraca (2022).

O solo local é classificado como ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico (SANTOS *et al.*, 2018), com atributos químicos e frações texturais nas camadas 0-10 e 10-20 cm apresentados (Tabela 2).

Tabela 2 - Atributos físicos e frações texturais das camadas 0-10 a 10-20 cm do solo da área experimental antes da instalação do experimento

Prof. (cm)	pH ( $H_2O$ )	MOS ( $g\ dm^{-3}$ )	A $P^3_+$	H <sup>+</sup> Al	C a <sub>2+</sub>	M g <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	P <sub>Mehlich-1</sub> ( $mg\ dm^{-3}$ )	C T C	V (%)	Ar ei a	Si lt e	Ar gil a
0-10	6.5	12,5	0	1.8	1.8	1.35	0.27	19.5	5.36	6.6	7.2	1.2	15.6
10-20	6.4	6.51	0	2.2	1.8	1.05	0.19	16.5	5.33	8.4	0.2	2.4	6

Prof= profundidade, MOS= Matéria orgânica do solo, CTC= Capacidade catiônica, V%= Saturação por base

Fonte: Dados da pesquisa (2020).

### 3.2 DELINEAMENTO ESTATÍSTICO E TRATAMENTOS

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com seis repetições, no esquema de parcelas subdivididas. Os tratamentos foram distribuídos em parcelas (8 x 35 m) representadas pelas fontes de fósforo: superfosfato simples (solúvel), fosfato natural reativo (reativa) e sem aplicação de fósforo (sem P) e subparcelas (8 x 5 m), representadas pelas plantas de cobertura: *Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, *Cajanus cajan*, *Dolichos lablab*, *Canavalia ensiformis*, *Pennisetum glaucum* e um tratamento sem cobertura (controle).

### 3.3 IMPLANTAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

As plantas de cobertura foram semeadas manualmente, dia 26 de abril de 2022, com espaçamento entre linhas de 0,25 m para o *Pennisetum glaucum* e de 0,5m para as demais plantas de cobertura. Não houve aplicação de adubações, corretivos ou defensivos agrícolas durante a estação das plantas de cobertura. O manejo de dessecação das plantas de cobertura foi realizado com glifosato, 60 dias após a semeadura (DAS).

A semeadura do milho, híbrido BM 990, ocorreu nos dias 28 e 29 de junho, sobre os resíduos das plantas de cobertura. O espaçamento entre linhas foi de 0,8 m e 0,20 m entre plantas.

A adubação de fundação ocorreu dia 18 de julho, com 70 kg ha<sup>-1</sup> de N (ureia, 46% N) e 20 kg ha<sup>-1</sup> de K (cloreto de potássio, 58% K). A aplicação de cobertura foi realizada dia 03 de agosto, com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N (sulfato de amônio, 20% N). A adubação fosfatada ocorreu dia 10 de agosto, com 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> das fontes superfosfato simples e fosfato natural reativo (Tabela 3).

Tabela 3 - Concentração de fósforo total e solúvel para o superfosfato simples e fosfato natural reativo

Fonte	Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )				Ca	S
	Tota l	Sol.CNA+ H <sub>2</sub> O	Sol. H <sub>2</sub> O	Sol. AC 2% (1:100)		
Superfosfato simples	-	19,0	16,0	-	16	10
Fosfato natural reativo	29,0	-	-	9,0	36	-

Sol. = solúvel, CNA = citrato neuro de amônio, AC = ácido cítrico.

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Os tratos culturas das plantas daninhas, pragas e doenças foram realizados conforme preconizado para a cultura na região.

Para suprir a necessidade hídrica no final do ciclo do milho, foi instalado um sistema de irrigação por gotejamento. O manejo da irrigação foi realizado levando em consideração a evapotranspiração da cultura determinada por meio de lisímetros de drenagem. O turno de rega adotado foi diário. Esse sistema utiliza tubos perfurados com pequenos gotejadores que liberam água de forma controlada e diretamente na zona radicular das plantas.

### 3.4 AVALIAÇÕES REALIZADAS

#### 3.4.1 Plantas de cobertura

Aos 60 dias após a semeadura, amostras foram cortadas rente ao solo (1 m<sup>2</sup>) em cada subparcela para determinação de massa verde da parte aérea das plantas de cobertura. Os materiais foram pesados em balança semi-analítica, e submetidas à secagem em estufa de circulação de ar forçada, com temperatura de 60 °C até atingir peso constante, determinando a produção de massa seca da parte aérea (MSPA).

O material seco foi triturado no moinho tipo Willey (com malha de 0,33 mm) nos dias 11 e 14 de julho, para determinação dos teores de macronutrientes N, P, K, Ca, Mg e S (TEDESCO *et al.*, 1995).

#### 3.4.2 Milho

A determinação da produtividade do milho e das características agronômicas, foram realizadas, utilizando seis plantas centrais de cada subparcela, desconsiderando a bordadura.

Uma planta completa, foi selecionada ao acaso em cada subparcela e armazenada em sacos de papel, sem os grãos e submetida à secagem em estufa de circulação de ar forçada, com temperatura de 60 °C, até atingir peso constante para determinação da massa seca da parte aérea (MSPA). O comprimento de espiga, foi mensurado com régua, da base ao ápice da espiga (Figura 5-A); e as demais variáveis por meio de contagem: número de fileira por espiga (NGE) (Figura 5-B), número de grãos por fileira (NGF) e número de grãos por espiga (NGE), multiplicando NFE x NGF.

As espigas foram debulhadas manualmente (Figura 5-C), pesadas em balança digital portátil (Gancho - 50kg). De cada amostra foi retirado ~150g de grãos, armazenados em saco de papel e submetidos à secagem forçada em estufa de circulação forçada de ar a 60° C até

atingir peso constante. Os grãos e a MSPA foram moídos no moinho tipo Willey (SP-32 – SPLABOR) (com malha de 0,33 mm), e em seguida acondicionados em recipientes plásticos para análises laboratoriais dos macronutrientes N, P, K, Ca, Mg e S.

A determinação de concentração de N foi determinada por meio de digestão sulfúrica, destilação e titulação pelo método Kjeldahl. O P, K, Ca e Mg foi extraído por meio de digestão nítrico-perclórica. O Ca e o Mg foram determinadas por espectrofotometria de absorção atômica, o K por espectrofotometria de chama e o P pelo método colorimétrico fosfovanadomolibdato em um espectrofotômetro (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

A produtividade de grãos, foi determinada pela massa de grãos colhidos em 9,0 m<sup>2</sup> de cada parcela. Os resultados foram corrigidos para o teor de umidade de 13%.

Figura 4 - Aferição do comprimento de espiga (A), vista longitudinal da espiga do milho com marcação para contagem de número de fileiras por espiga (B) e debulha manual (C)



Fonte: A autora (2023).

### 3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados obtidos foram submetidos a análise de variância (ANOVA) pelo teste F ( $p < 0,05$ ) e quando significativas, as médias foram comparadas pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ).

Todos os procedimentos estatísticos foram realizados com o software estatístico R, versão 4.1.2. (R CORE TEAM, 2021).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 PRODUTIVIDADE E EXTRAÇÃO DE NUTRIENTES DA PARTE AÉREA DAS PLANTAS DE COBERTURA

A produtividade da massa verde e seca foi influenciada apenas pelas espécies. Para os nutrientes, houve interação para P, Ca, Mg e S e efeito isolado apenas para espécies (Tabela 4).

Tabela 4 – Análise de variância para massa verde e seca e macronutrientes da parte aérea das plantas de cobertura em rotação com o milho em sistema conservacionista do solo.

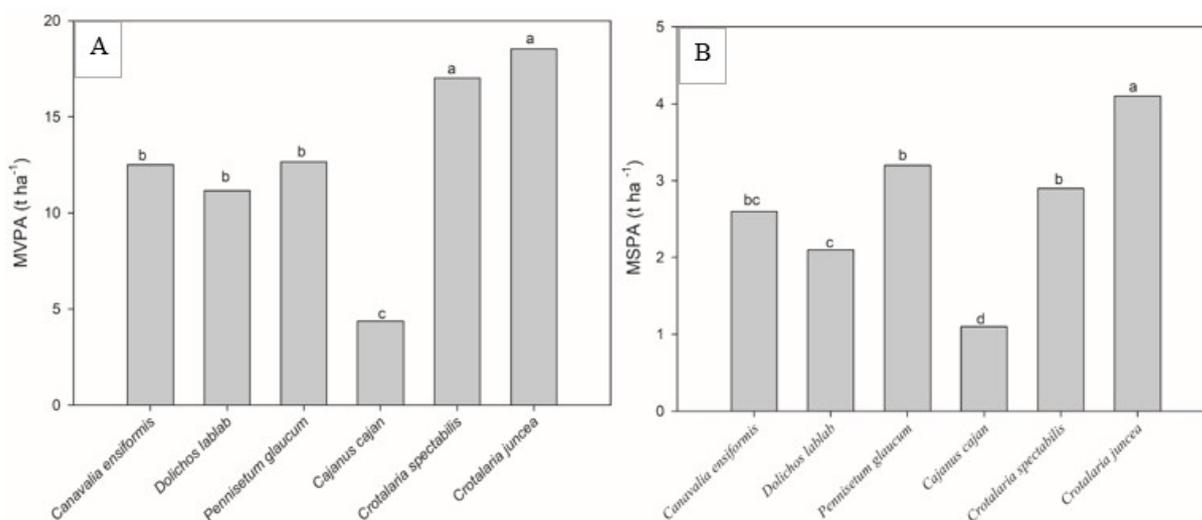
F. V	GL	QM							
		MVPA	MSPA	N	P	K	Ca	Mg	S
Bloco	5	20.63	0.5292	592,5	55.52	290.1	112.08	3.660	3.589
Fonte (F)	2	15.00 <sup>NS</sup>	1.120 6 <sup>NS</sup>	3478, 2 <sup>NS</sup>	136.0 5 <sup>NS</sup>	797. 7 <sup>NS</sup>	679.35*	2.857 <sup>NS</sup>	28.65 5**
Erro (a)	10	32.12	1.2196	1561.0	76.22	688.6	154.12	6.845	3.143
Espécie (E)	5	448.4 6*	18.091 0*	16233. 7*	691.7 5*	7780. 6*	2225.5 4*	233.96 7*	33.37 0*
F x E	10	19.90 <sup>NS</sup>	0.659 4 <sup>NS</sup>	481.5 <sup>NS</sup>	89.0 0*	234. 6 <sup>NS</sup>	111.35*	15.473*	7.131*
Erro (b)	75	12.09	0.6371	496.3	23.25	261.6	35.80	5.055	2.187
CV 1 (%)		44,59	41,52	55,92	53,80	46,78	63,32	36,85	43,73
CV 2 (%)		27,36	30,00	31,53	29,71	28,83	30,52	31,67	36,48

FV = fontes de variação, GL = graus de liberdade, MVPA = massa verde da parte aérea, MSPA = massa seca da parte aérea, CV = coeficiente de variação. \* = significativo ao nível de 0,05% de probabilidade; NS = não significativo pelo Teste F (p<0,05).

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

*Crotalaria juncea* e a *Crotalaria spectabilis* foram as plantas de cobertura que apresentaram os maiores rendimentos de massa verde, 18,5 t ha<sup>-1</sup> e 17 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Esses valores foram significativamente maiores em comparação com o *Cajanus cajan*, que teve um rendimento de apenas 4,4 t ha<sup>-1</sup>. Em relação a *Canavalia ensiformis*, *Dolichos lablab* e *Pennisetum glaucum*, as médias de rendimento de massa verde foram estatisticamente iguais, com cerca de 12,72 t ha<sup>-1</sup> (Figura 5 -A).

Figura 5 - Massa verde (A) e massa seca (B) da parte aérea das plantas de cobertura



MVPA= Massa verde da parte aérea, MSPA= Massa seca da parte aérea. Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: A autora (2023).

Os rendimentos de massa verde são importantes indicadores de produtividade das plantas de cobertura, uma vez que a massa verde se refere à quantidade total de biomassa produzida pelas plantas, quanto maior for a massa verde, maior é a quantidade de biomassa disponível para fornecer matéria orgânica ao solo (PACHECO *et al.*, 2011; WOLSCHICK *et al.*, 2016).

A biomassa das plantas de cobertura é rica em nutrientes, como N, P e K, importantes para a melhoria da qualidade do solo (RUDELL, 2022; BLANCO-CANQUI *et al.*, 2015). A quantidade de nutrientes acumulados pode variar dependendo de vários fatores, como as condições do solo e do clima, bem como a duração do período de crescimento da planta de cobertura (HARUNA; NKONGOLO, 2020).

A *Crotalaria juncea* foi a espécie que apresentou a maior produção de biomassa seca, alcançando 4,1 t ha<sup>-1</sup>, o que representa 2,72 vezes mais do que o *Cajanus cajan*, que produziu 1,1 t ha<sup>-1</sup> (Figura 5 - B).

A *Crotalaria juncea* é conhecida como uma espécie de rápido crescimento e de alta acúmulo de biomassa, o que pode explicar a sua maior produção em comparação com a *Cajanus cajan* (LEAL, *et al.*, 2012, CAVALCANTE *et al.*, 2012). Portanto, é essencial acompanhar o desenvolvimento das plantas e determinar do final da cultura para maximizar os benefícios e evitar a competição com a próxima safra comercial (ALONSO-AYUSO *et al.*, 2018), Além disso a *Crotalaria juncea* possui um sistema radicular profundo, o que possibilita uma maior absorção de água e nutrientes do solo (CHERUBIN *et al.*, 2022).

A diferença na produção de biomassa entre as plantas de cobertura pode estar associada a outros fatores como espécie, estágio de crescimento e época de término (MELKONIAN *et al.*, 2017). Se as plantas forem terminadas precocemente, antes de atingirem o seu potencial máximo de crescimento, elas podem ter uma produção de biomassa menor. Portanto, é importante considerar todos esses fatores ao escolher uma planta de cobertura, a fim de garantir uma maior produção de biomassa e maximizar os benefícios do sistema de cobertura vegetal.

Santos *et al.* (2020), observaram que a *Crotalaria juncea* teve maior rendimento de produção de biomassa do que o *Cajanus cajan*. Enquanto, em experimento conduzido por Carvalho *et al.* (2015), verificaram que o *Cajanus cajan* apresentou maior produtividade de matéria seca, em comparação à *Crotalaria juncea*. Portanto, os diferentes estágios de crescimento das plantas têm diferentes níveis de biomassa e composição de nutrientes, no entanto, realizar o corte durante a floração plena pode fornecer uma estimativa mais precisa de produção total de biomassa, uma vez que esse estágio geralmente corresponde a um aumento significativo no crescimento das plantas (WOLSCHICK *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2020).

Blanco-Canqui *et al.* (2022) ressaltam que o potencial de produção de biomassa de plantas de cobertura como a *Crotalaria juncea* fornecem quantidades significativas de matéria orgânica, favorecendo as propriedades do solo. Por outro lado, plantas com o ciclo vegetativo mais longo como *Cajanus cajan* teve uma baixa produção de biomassa devido ao corte precoce da cultura. De acordo com Pacheco *et al.* (2017), o acúmulo de matéria seca do *Cajanus cajan* aumenta significativamente com o tempo após a semeadura. Em 156 dias após a semeadura, a planta acumulou cerca de 57% mais matéria seca do que em 60 dias após a semeadura. Isso indica que a produção de biomassa da *Cajanus cajan* pode ser baixa se for cortada precocemente, antes de atingir seu potencial máximo de crescimento.

As espécies *Crotalaria spectabilis*, *Pennisetum glaucum* e *Canavalia ensiformis* apresentaram resultados estatisticamente iguais em relação à produção de biomassa, com uma média de aproximadamente 3 t ha<sup>-1</sup>. *Dolichos lablab* não diferiu de *Canavalia ensiformis* (Figura 5-B).

Resultados semelhantes foram encontrados no trabalho de Cavalcante *et al.* (2012), em que foi observado que *Crotalaria spectabilis* e *Canavalia ensiformis* tiveram o rendimento de produção estatisticamente iguais com ~3 t ha<sup>-1</sup> de massa seca. Isso indica que essas leguminosas têm um potencial semelhante para produzir uma quantidade significativa de biomassa em condições semelhantes de cultivo, o que pode ser valioso em sistemas agrícolas

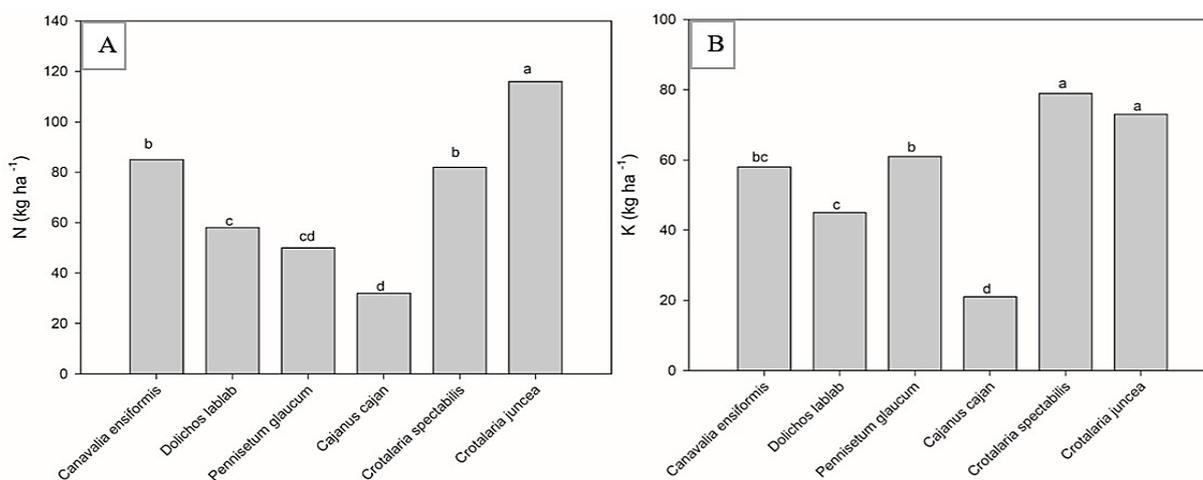
que visam maximizar a produção de matéria orgânica para melhorar a qualidade do solo e fornecer cobertura vegetal.

Outro fator a ser considerado é o teor de nutrientes da biomassa produzida pela espécie. Algumas espécies leguminosas, como *Crotalaria spectabilis* e *Canavalia ensiformis*, têm a capacidade de fixar  $N_2$  através da fixação biológica, o que pode enriquecer o solo com esse importante nutriente (SCHMITT *et al.*, 2021; BLANCO-CANQUI *et al.*, 2022). Essa habilidade pode ser especialmente benéfica em sistemas agrícolas que visam reduzir o uso de fertilizantes químicos.

Souza *et al.* (2019) confirmam que plantas de cobertura, como *Crotalaria juncea*, *Cajanus cajan* e *Pennisetum glaucum*, são eficazes na produção de biomassa seca. Essas espécies apresentaram os maiores rendimentos de massa seca no estudo, além de evidenciarem potencial para a conservação do solo e o aumento da rotação de culturas, uma vez que, a produção de biomassa seca está diretamente relacionada à formação de matéria orgânica do solo, que é fundamental para a sua saúde e fertilidade.

O maior acúmulo de N foi obtido na *Crotalaria juncea*, com  $116 \text{ kg ha}^{-1}$ , seguido da *Canavalia ensiformis* e *Crotalaria spectabilis* com 85 e  $82 \text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente. *Dolichos lablab* e *Pennisetum glaucum* também não diferiram entre si ( $\sim 54 \text{ kg ha}^{-1}$ ). O menor acúmulo de N foi encontrado no *Cajanus cajan* ( $32 \text{ kg ha}^{-1}$ ) (Figura 6-A).

Figura 6 - Extração de N e K pelas plantas de cobertura



Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: A autora (2023).

Essas diferenças podem ser explicadas pelas características fisiológicas e metabólicas das plantas. As leguminosas são conhecidas por sua alta capacidade de fixar  $N_2$  em simbiose com bactérias rizóbicas (MALONE *et al.*, 2022; ANDERSON *et al.*, 2022). Esse processo de

fixação permite que a conversão do  $N_2$  em forma utilizável para as plantas (BLANCO-CANQUI *et al.*, 2015; OBOUT *et al.*, 2021).

A escolha das plantas adequadas para garantir um bom suprimento de N no solo, especialmente em sistemas agrícolas sustentáveis, onde a redução do uso de fertilizantes nitrogenados é uma prioridade. Espécies como a *Crotalaria juncea*, a *Canavalia ensiformis* e a *Crotalaria spectabilis* podem ser boas opções de culturas de cobertura, pois além de melhorar a qualidade do solo, também são capazes de fixar o nitrogênio atmosférico e reduzir a necessidade de adubação nitrogenada.

Nos estudos desenvolvidos por Santos *et al.* (2020) e Cavalcante *et al.* (2012), foi observado que o *Cajanus cajan* acumulou valores elevados de N ( $78,6 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $218 \text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente) na mesma área em que o presente estudo foi realizado. Entretanto, os pesquisadores realizaram as análises dos macronutrientes em fases vegetativas diferentes as do presente trabalho. Portanto, compreender e abordar as limitações dessa espécie, como o ciclo vegetativo é crucial para melhorar a eficácia da fixação de N e aumentar a produção sustentável de alimentos.

Florentín *et al.* (2010) afirmam que a relação C/N relativamente baixa de leguminosas como a *Crotalaria juncea* favorece a decomposição da sua biomassa, resultando na liberação mais rápida de nutrientes no solo, permitindo que as culturas em sucessão possam utilizar os nutrientes de forma mais eficiente. A *Crotalaria spectabilis* e *Canavalia ensiformis* também são plantas que têm uma relação C/N semelhante, variando entre 10:1 e 20:1, favorecendo o crescimento, desenvolvimento das plantas e posteriormente a liberação dos nutrientes, como o N.

Os  $116 \text{ kg ha}^{-1}$  de N extraídos pela *Crotalaria juncea* no plantio no milho, equivalem à  $\sim 258 \text{ kg/ha}$  de ureia ou  $\sim 610 \text{ kg/ha}$  de sulfato de amônia, que correspondem a  $\sim 5$  e 12 sacas, respectivamente. A ureia e o sulfato de amônio, com  $\sim 45\%$  e  $\sim 19\%$  de N em peso, respectivamente, são fertilizantes nitrogenados comumente utilizados na agricultura. O alto acúmulo de N pela *Crotalaria juncea* sugere que essa espécie pode ser uma excelente opção para melhorar a disponibilidade de N no solo e promover um melhor crescimento das culturas subsequentes.

A *Crotalaria spectabilis* e *Canavalia ensiformis* também apresentaram acumulação de N significativa, com  $\sim 85 \text{ kg ha}^{-1}$ , equivalente a  $\sim 189 \text{ kg ha}^{-1}$  de ureia ou  $\sim 447 \text{ kg ha}^{-1}$  de sulfato de amônia, que correspondem a  $\sim 4$  sacas e 9 sacas, respectivamente. Assim, esses

valores representam uma estimativa dos fertilizantes nitrogenados sintéticos que podem ser substituídos pela biomassa das plantas de cobertura.

O N é um dos nutrientes mais importantes para o milho, pois desempenha um papel fundamental na produção de clorofila, no crescimento vegetativo e na formação de proteínas. O milho necessita de uma quantidade adequada e balanceada de N para alcançar seu máximo potencial de rendimento, sua falta prejudica o crescimento do milho, causando plantas pequenas, clorose (amarelamento) das folhas e baixa produção de grãos. Por outro lado, um suprimento excessivo de N pode levar à vegetação exuberante, com altas taxas de crescimento vegetativo, mas pouca formação de grãos. Isso ocorre porque o excesso de N pode favorecer o crescimento das folhas em detrimento da formação de espigas de milho (BISWAS; BA, 2016; BESEN *et al.*, 2020; PRADO, 2021).

O N não utilizado pelas plantas pode ser lixiviado para os lençóis freáticos, causando a poluição de corpos d'água e a eutrofização. Por isso, é fundamental aplicar a quantidade correta, na época certa e de maneira eficiente, para minimizar os riscos de perdas e garantir a sustentabilidade do sistema agrícola (BLANCO-CANQUI; CLAASSEN; PRESLEY, 2012; PRADO, 2021).

A *Crotalaria spectabilis* e a *Crotalaria juncea* acumularam 79 kg ha<sup>-1</sup> e 73 kg ha<sup>-1</sup> de K, respectivamente, o *Cajanus cajan* acumulou apenas 21 kg ha<sup>-1</sup> de K. As demais espécies analisadas apresentaram uma média de acumulação de aproximadamente 55 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 6-B).

O acúmulo de K pelas espécies *Crotalaria juncea* e *Crotalaria spectabilis* pode estar diretamente relacionada à alta capacidade de produção de biomassa durante seus ciclos vegetativos. Além disso, o sistema radicular dessas leguminosas, têm diferentes capacidades de extração e mobilização de K em camadas mais profundas do solo (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; CHERUBIN *et al.*, 2022).

As diferenças na extração de K entre as espécies podem ser atribuídas a fatores genéticos e fisiológicos, além das condições ambientais em que as plantas foram cultivadas. Essas espécies possuem raízes mais profundas e com maior densidade de pelos radiculares, o que aumenta a área de absorção e a eficiência na captação de nutrientes do solo. Além disso, as espécies de *Crotalaria* possuem mecanismos fisiológicos que facilitam a absorção e o transporte de K nas plantas, elas podem apresentar maior capacidade de mobilizar K nas raízes e transportá-lo para as partes aéreas, resultando no maior acúmulo de nutrientes (CASTRO *et al.*, 2017; SANTOS *et al.*, 2020; CHERUBIN *et al.*, 2022).

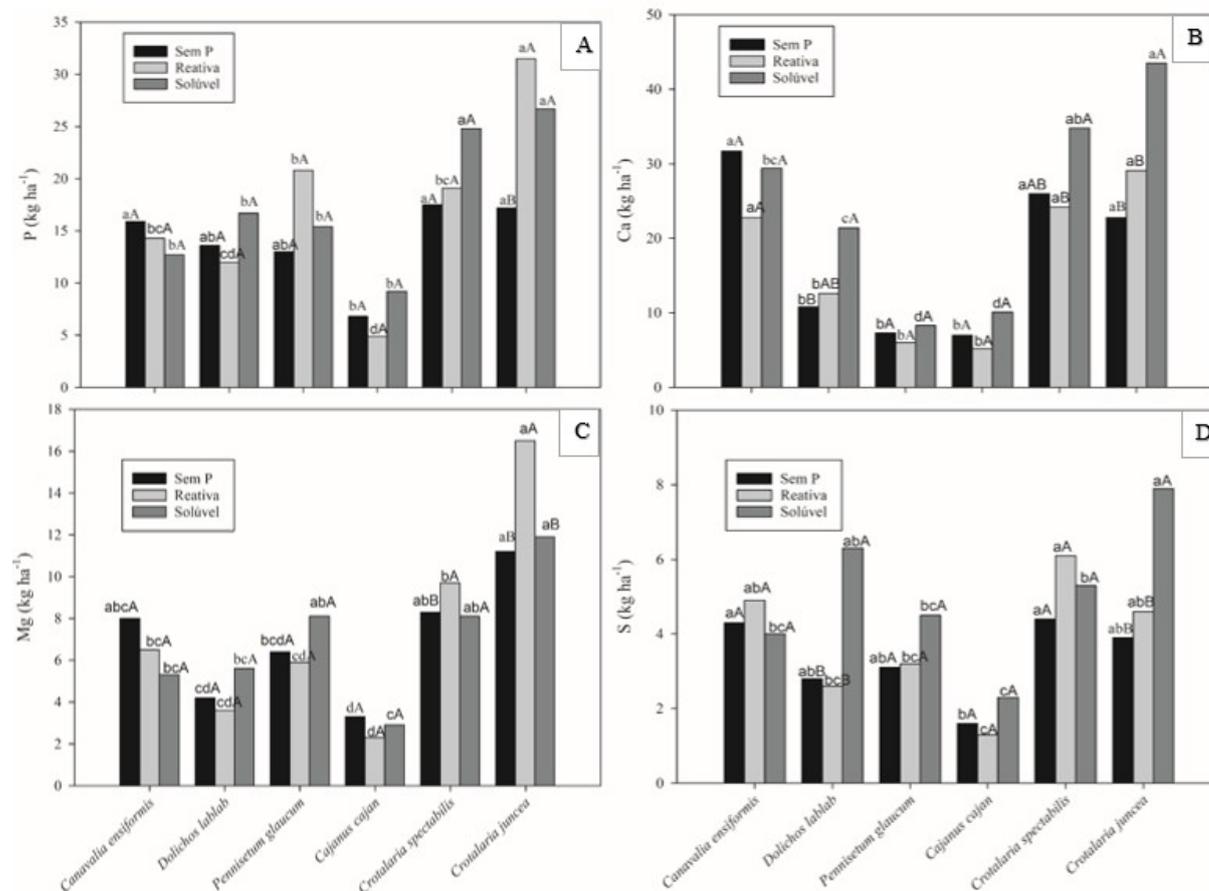
Em um estudo desenvolvido por Pacheco *et al.* (2015), foi observado que *Crotalaria juncea* e *Crotalaria spectabilis* tinham densidade radicular com altas resistências à penetração do solo, indicando sua capacidade de extrair K de camadas mais profundas do solo. Destacando que o potencial das espécies de *Crotalaria* para contribuir com o aumento do teor de K no solo e fornecer uma fonte adicional desse nutriente para as culturas subsequentes.

O K desempenha um papel fundamental no transporte de nutrientes, atuando como um componente essencial dos processos de transporte de água e assimilação de CO<sub>2</sub> nas plantas. O K é necessário para a síntese de proteínas e enzimas, sendo essencial para o metabolismo energético e a fotossíntese. Além disso, está envolvido na regulação da abertura e fechamento dos estômatos (TAIZ *et al.*, 2017).

Portanto, a presença adequada de K no solo e sua absorção pelas plantas são essenciais para o bom funcionamento desses processos fisiológicos (PRADO, 2021). A falta de K pode resultar em sintomas como amarelamento das folhas, redução do crescimento, diminuição da produção de biomassa e diminuição da resistência a estresses bióticos e abióticos (BATISTA *et al.*, 2018; GARCIA *et al.*, 2020). Portanto, o fornecimento adequado de K no solo pode promover o crescimento saudável das plantas, aumentar a produção e a qualidade dos produtos agrícolas.

O maior acúmulo de P da parte aérea das plantas de cobertura ocorreu na *Crotalaria juncea* e fonte reativa (31,5 kg ha<sup>-1</sup>), em seguida *Crotalaria juncea* e *Crotalaria spectabilis* na fonte solúvel (26,7 e 24,8 kg ha<sup>-1</sup>). Por outro lado, o *Cajanus cajan* registrou o menor acúmulo de P com 4,9 kg ha<sup>-1</sup> na fonte reativa (Figura 7 - A).

Figura 7 - Acúmulo de nutrientes da parte aérea de plantas de cobertura em rotação com o milho em sistema conservacionista do solo



Médias seguidas pela mesma letra minúscula para fonte dentro de cada nível de espécie e maiúscula para espécie dentro de cada nível de fonte, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: A autora (2023).

Os resultados apresentados indicam que, na ausência de P, as espécies de plantas de cobertura *Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis* e *Canavalia ensiformis* apresentaram o maior acúmulo de P na parte aérea em comparação com o *Cajanus cajan*. Essas três espécies alcançaram um acúmulo médio de 17,5; 17,2 e 15,9 kg ha<sup>-1</sup> de P, respectivamente, enquanto o *Cajanus cajan* registrou um acúmulo menor, de apenas 6,8 kg ha<sup>-1</sup> de P (Figura 7- A).

Na fonte reativa de P, a *Crotalaria juncea*, extrai a maior quantidade de P, com um acúmulo de 31,5 kg ha<sup>-1</sup>. O *Pennisetum glaucum* também teve um acúmulo significativo, de 20,8 kg ha<sup>-1</sup>, e não diferiu estatisticamente das espécies *Crotalaria spectabilis* e *Canavalia ensiformis*, que acumularam 19,1 e 14,3 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Na fonte solúvel, não houve diferença estatística entre as espécies *Crotalaria juncea* e *Crotalaria spectabilis*, que acumularam em média 26,7 e 24,8 kg/ha de P, respectivamente (Figura 7- A).

Esses resultados indicam que as espécies de *Crotalaria*, especialmente *Crotalaria juncea*, têm uma capacidade significativa de absorver e acumular P, tanto na ausência de fontes externas de P quanto quando fornecido na forma reativa ou solúvel. As espécies *Canavalia ensiformis* e *Pennisetum glaucum* também apresentaram um bom desempenho em termos de acúmulo de P nessas fontes. Esses achados reforçam a importância das plantas de cobertura na ciclagem eficiente de nutrientes, como o P, no solo. O uso de espécies de plantas de cobertura adequadas pode contribuir para a melhoria da fertilidade do solo, reduzir a dependência de fertilizantes químicos e promover um sistema agrícola mais sustentável (BLANCO-CANQUI *et al.*, 2022; MORTENSEN *et al.*, 2021).

A capacidade da *Crotalaria juncea* acumular e utilizar eficientemente o P disponível no solo, pode estar associado a liberação exsudados radiculares, que influenciam na solubilização, mineralização de P e consequente aumento do P disponível, principalmente em solos deficientes (LAMBERS, 2019; ZHU *et al.*, 2023), além da presença de microrganismos simbióticos que promovem a absorção desse nutriente (ALVES *et al.*, 1999; SANTOS *et al.*, 2020; LOPES *et al.*, 2020). Rigon *et al.* (2022), também encontraram resultados similares ao do presente estudo ao investigar os efeitos da rotação de culturas e da qualidade dos resíduos na disponibilidade de P em solos tropicais.

A extração de P pelas crotalárias também pode se dar devido ao comprimento das raízes alcançando profundidades suficiente para absorver íons de P. A falta de P pode resultar em crescimento limitado das plantas, menor produção de flores e frutos, e deficiências em outros nutrientes (LOPES *et al.*, 2022). Além disso, a falta de P pode ter efeitos negativos significativos na produção de milho. Isso pode resultar em sintomas visíveis nas folhas, atrofiamento do crescimento das plantas, redução do desenvolvimento das raízes e redução da formação e preenchimento de grãos (LEIKAM; ACHORN, 2005; PRADO, 2021).

O acúmulo de P nas espécies *Canavalia ensiformis* e *Pennisetum glaucum* pode ser atribuído a diferentes fatores. No caso da *Canavalia ensiformis*, essa espécie possui um sistema radicular extenso e bem ramificado, com raízes que exploram camadas mais profundas do solo. Isso permite uma maior capacidade de absorver P disponível em camadas mais profundas do solo, onde outros cultivos podem não alcançar. Além disso, a *Canavalia ensiformis* é conhecida por ter uma alta taxa de fixação biológica de N, o que melhora a disponibilidade de nutrientes, incluindo o P, no solo (CHERUBIN, 2022; MADALÃO *et al.*, 2017).

Por outro lado, o *Pennisetum glaucum*, tem a capacidade de extrair e acumular P devido à sua resposta fisiológica e morfológica. Essa espécie possui raízes fibrosas e densas,

que podem explorar uma grande área do solo em busca de nutrientes, incluindo o P (PEREIRA, 2016; CABI, 2021). Portanto, a combinação de um sistema radicular eficiente, capaz de explorar camadas mais profundas do solo, fixar N, realizar exsudação de ácidos orgânicos e eficiência de absorção e utilização de P são fatores que favorecem o acúmulo de P nas espécies *Canavalia ensiformis* e *Pennisetum glaucum*.

No acúmulo de Ca, as espécies *Crotalaria juncea* e *Crotalaria spectabilis* apresentaram os maiores acúmulos na fonte solúvel, com valores de 43,5 kg ha<sup>-1</sup> e 34,8 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. O *Canavalia ensiformis* teve o terceiro maior acúmulo de Ca, com 31,7 kg ha<sup>-1</sup>, na fonte sem P. Por outro lado, *Cajanus cajan* e *Pennisetum glaucum* foram as espécies que registraram as menores acumulações de Ca na fonte reativa, com valores de 7,4 kg ha<sup>-1</sup> e 7,2 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 7 – B).

Esses resultados demonstram uma variação considerável na acumulação de Ca entre as espécies de plantas de cobertura e as fontes de nutrientes utilizadas. A diferença na capacidade de absorção e acúmulo de Ca pode estar relacionada a fatores genéticos, fisiológicos e características das raízes das diferentes espécies. O Ca está envolvido no desenvolvimento das plantas, na formação e fortalecimento da parede celular, conferindo rigidez e resistência às células das plantas, além de facilitar o transporte de íons e nutrientes (PRADO, 2021; WENDLING *et al.*, 2016). Sua deficiência pode causar distúrbios fisiológicos nas plantas, o enfraquecimento e a desintegração da parede celular, a redução da estabilidade das membranas celulares e a diminuição da resistência a doenças e estresses ambientais (TAIZ *et al.*, 2017).

Rosolem e Tiritano (2002), observaram que algumas espécies, *Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis* e *Pennisetum americanum* apresentaram alta biomassa da parte aérea e massa radicular. Descobriu-se também que as espécies de plantas de cobertura variavam em seus sistemas radiculares, estratégias de aquisição de nutrientes e concentrações de nutrientes. Essas descobertas sugerem que a combinação de plantas de cobertura de diferentes tipos de raízes em consórcios pode aumentar a absorção e o acúmulo geral de nutrientes, incluindo Ca.

Portanto, entender a capacidade de acumulação de Ca pelas espécies de plantas de cobertura pode ser útil para otimizar a disponibilidade desse nutriente no solo e melhorar o crescimento e a saúde das culturas subsequentes.

O maior acúmulo de Mg foi na palhada da *Crotalaria juncea* e fonte reativa, com um valor 16,5 kg ha<sup>-1</sup>. Seguido da mesma espécie nas fontes solúvel e sem P que não diferiram da *Crotalaria spectabilis*. A variação de acúmulo de Mg foi de 2,3 a 16,5 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 7 – C).

O Mg participa da fotossíntese, na ativação de enzimas e na síntese de clorofila. Além disso, está envolvido na síntese de proteínas, na replicação do DNA e na regulação da abertura e fechamento dos estomas, afetando as trocas gasosas e a perda de água nas plantas (TAIZ *et al.*, 2017; PRADO, 2021). O conhecimento sobre o acúmulo de Mg nas plantas otimiza o manejo agrícola e garante a disponibilidade adequada de nutrientes para as culturas, contribuindo para a saúde e produção agrícola eficiente.

A maior absorção de S ocorreu na palhada do *Dolichos lablab* e *Crotalaria juncea*, na fonte solúvel (7,9 e 6,3 kg ha<sup>-1</sup>) e não diferiu da *Crotalaria spectabilis* na fonte reativa (6,1 kg ha<sup>-1</sup>). As demais espécies foram estatisticamente iguais ( $p < 0,05$ ) dentro das fontes. O menor acúmulo de S foi observado no *Cajanus cajan*, com 1,3 kg ha<sup>-1</sup> na fonte reativa (Figura 7 –D).

Esses resultados indicam que as espécies de *Dolichos lablab* e *Crotalaria juncea* possuem uma maior capacidade de acumular S em sua biomassa quando comparadas às outras espécies estudadas. Isso pode estar relacionado à sua capacidade de absorver e utilizar o S presente no solo de forma mais eficiente. Já o *Cajanus cajan* apresentou um menor acúmulo de S, o que sugere que essa espécie tem uma menor capacidade de absorção ou utilização do S disponível no solo.

O S está envolvido em diversas funções nas plantas, como a síntese de aminoácidos, proteínas e vitaminas, além de atuar no transporte de nutrientes e na regulação de processos fisiológicos. O S também atua como um regulador do metabolismo vegetal e influencia os processos vegetais por meio de seu controle sobre os fitohormônios (JAHAN *et al.*, 2019; PRADO, 2021).

As plantas de cobertura se destacam como boas recicladoras de nutrientes, em que no presente estudo elas apresentaram maior acúmulo de N, K e Ca. Santo *et al.* (2020), também observaram os mesmos resultados para a extração de nutrientes. O acúmulo de nutrientes apresentou relação com a produção de massa seca. A *Crotalaria juncea* apresentou os melhores resultados, tanto para biomassa quanto para extração de nutrientes, especialmente o N, essencial para a cultura. Por outro lado, o *Cajanus cajan* teve a menor produção de biomassa, sendo a espécie com as menores acúmulo de nutrientes.

O acúmulo de nutrientes está diretamente relacionado com a produção de biomassa das plantas de cobertura. Quanto maior a produção de biomassa, maior será o acúmulo de nutrientes, uma vez que a biomassa serve como reservatório desses nutrientes (KOEENDER *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2020). Dentre as espécies avaliadas, a *Crotalaria juncea* se destacou, tanto em termos de biomassa produzida quanto na extração de nutrientes, especialmente de N, um nutriente essencial para o desenvolvimento das culturas. Por outro

lado, o *Cajanus cajan* apresentou uma menor produção de biomassa e, conseqüentemente, menores acumulações de nutrientes.

Cavalcante *et al.* (2012), corroboram em um estudo de condições semelhantes ao do presente trabalho em que leguminosas, como *Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, *Cajanus cajan*, *Canavalia ensiformis*, *Dolichos lablab* e *Mucuna aterrima*, indicam que quanto maior a produção de biomassa, maior o acúmulo de nutrientes, incluindo P, K, Ca, Mg, S, B, Mn e Zn.

Em suma, as plantas de cobertura desempenham um papel importante na reciclagem de nutrientes, contribuindo para a melhoria da fertilidade do solo e para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. A escolha adequada das espécies de cobertura pode influenciar diretamente no acúmulo de nutrientes e, conseqüentemente, na disponibilidade desses nutrientes para as culturas subsequentes (BARBOSA *et al.* 2020).

#### 4.2 PRODUTIVIDADE E BIOMETRIA DO MILHO

Não houve interação significativa na produtividade do milho em sucessão as plantas de cobertura e as fontes de P. A massa seca dos grãos, variou entre 6 e 6,5 t ha<sup>-1</sup> (sobre a palhada de *Dolichos lablab* e *Pennisetum glaucum*, respectivamente) (Tabela - 5).

Tabela 5 – Massa seca de grãos, massa seca da parte aérea, massa seca total e produtividade

Espécies	MSG	MSPA	MStotal	PROD
	-----t/ha-----			
<i>Canavalia ensiformis</i>	6,53	7,62	14,15	7,50
<i>Dolichos lablab</i>	6,00	8,13	14,11	6,89
<i>Pennisetum glaucum</i>	6,54	8,53	15,08	7,51
<i>Cajanus cajan</i>	6,36	8,07	14,42	7,28
<i>Crotalaria spectabilis</i>	6,29	11,25	17,56	7,24
<i>Crotalaria juncea</i>	6,46	9,07	15,52	7,42
Controle	6,46	6,89	12,45	6,40

MSG= Massa seca dos grãos, MSPA= Massa seca da parte aérea, SMtotal= Massa seca total, PROD= produtividade.

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

A massa seca da parte aérea, variou de 6,89 t ha<sup>-1</sup> no controle à 11,25 t ha<sup>-1</sup> na *Crotalaria spectabilis*. A massa seca total (grãos e palhada) variou de 12,45 t ha<sup>-1</sup> no controle, enquanto teve maior acúmulo de massa seca na *Crotalaria spectabilis* (17,56 t ha<sup>-1</sup>). A maior produtividade de grãos foi encontrada sobre a palhada do *Pennisetum glaucum* com 7,5 t ha<sup>-1</sup> (Tabela - 5).

Resultados semelhantes sobre o efeito de plantas de cobertura no rendimento da cultura subsequente, foram descritos por Carvalho *et al.* (2015). Os pesquisadores obtiveram a produtividade de ~8 t ha<sup>-1</sup> de grãos de milho. Pavinato *et al.* (2017), também obtiveram resultados semelhantes, em que a produtividade variou entre 7,5 – 8,8 t ha<sup>-1</sup>, além de não apresentar interação significativa entre as fontes de P (superfosfato simples, fosfato de rocha e sem aplicação de P). Além disso, esses estudos também não encontraram interação significativa entre as diferentes fontes de P. Isso sugere que as fontes de P testadas não influenciaram de forma substancial o rendimento do milho, podendo indicar que as variedades de milho utilizadas nos experimentos eram capazes de aproveitar eficientemente o P já presente no solo ou que a disponibilidade de P não foi um fator limitante para a produtividade do milho nesses estudos.

Esses resultados reforçam a ideia de que os efeitos das plantas de cobertura na produtividade das culturas subsequentes podem variar dependendo das condições específicas do solo, das práticas agrícolas utilizadas e do contexto em que são realizados os experimentos. Nesse caso, os resultados indicam que as plantas de cobertura e as fontes de P estudadas não tiveram um impacto significativo na produtividade do milho, demonstrando a necessidade de considerar as características e as condições específicas de cada sistema de cultivo antes de fazer recomendações práticas.

Existem várias causas possíveis para que não ocorra resultados significativos na produtividade do milho, como a disponibilidade de P no solo que pode ter sido acumulado nas plantas de cobertura e conseqüentemente, para o milho. Isso pode ter neutralizado qualquer efeito diferencial nas plantas de cobertura ou nas fontes de P sobre a produtividade do milho. Além disso, o milho é uma cultura capaz de explorar o solo para obter nutrientes, incluindo o P. Sua habilidade em absorver e utilizar o P disponível pode ter minimizado qualquer impacto das diferentes fontes e plantas de cobertura (SANTOS JUNIOR *et al.*, 2019; DODIG *et al.*, 2021; PEREIRA FILHO; BORGHI, 2022).

É possível que haja uma interação complexa entre as plantas de cobertura, as fontes de P e outros fatores bióticos ou abióticos, tornando difícil identificar um efeito significativo na

produtividade do milho. Esses fatores podem interagir de maneiras diferentes e em diferentes momentos do ciclo de cultivo, tornando o resultado variável.

A cultura do milho destaca-se como consumidora e exportadora de N, além de agir como uma fonte de reciclagem para Ca e K. Dessa forma, o plantio do milho em um sistema de rotação ou sucessão de culturas se revela altamente eficaz, devido a um aumento direto dos níveis de K, acúmulo de N e uma retenção de Ca e Mg no solo, o que beneficia consideravelmente a próxima cultura a ser plantada, além disso a extração dos nutrientes citados pode aumentar com o aumento na produtividade do milho (COELHO, 2006; REIS *et al.*, 2019).

Barbosa *et al.* (2020), sugerem que tanto o milho quanto a *Crotalaria juncea* têm potencial para acumular nutrientes, o que pode ser benéfico para a produtividade. A palhada deixada no solo contribui para as propriedades físicas proporcionando cobertura no solo e química devido ao acúmulo de nutrientes.

Houve interação significativa para número de grãos por fileira, número de grãos por espiga e comprimento de espiga, porém, número de fileiras na espiga não foi influenciada pelos tratamentos testados (Tabela - 6).

Tabela 6 - Análise de variância da biometria da cultura do milho em sucessão a plantas de cobertura

F. V	GL	QM			
		NFE	NGF	NGE	COE
Bloco	5	3.40	9.21	6320.1	1.14
Fonte (F)	2	0.19 <sup>ns</sup>	2.45 <sup>ns</sup>	2.7 <sup>ns</sup>	1.22 <sup>ns</sup>
Erro (a)	10	1.49	5.27	4274.7	3.76
Espécie (E)	5	1.57 <sup>ns</sup>	5.38 <sup>ns</sup>	4189.7 <sup>ns</sup>	1.41 <sup>ns</sup>
F x E	10	0.91 <sup>ns</sup>	9.93*	5029.1**	3.36**
Erro (b)	75	0.80	5.21	1951.5	1.19
CV 1 (%)		6.96	8.81	14.18	13.47
CV 2 (%)		5.08	8.76	9.58	7.58

FV = fontes de variação, GL = graus de liberdade, NFE= número de fileira de espiga, NGF=número de grão de fileira, NGF=número de grão por espiga, COE= Comprimento de espiga, CV = coeficiente de variação. \* = significativo ao nível de 0,05% de probabilidade e ns = não significativo pelo Teste F (p<0,05).

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

O número de grãos por fileira (NGF), foi estatisticamente igual sobre a palhada das plantas de cobertura e fontes de P, entretanto, no controle o menor rendimento ocorreu na fonte solúvel com 24 NGF (Tabela - 7).

Tabela 7 - Biometria do milho para número de grãos por fileira e número de grãos por espiga

Espécies	NGF			NGE		
	Sem P	Reativo	Solúvel	Sem P	Reativo	Solúvel
<i>Canavalia ensiformis</i>	25 aA	26 a A	26 aA	445 aA	471 aA	459 abA
<i>Dolichos lablab</i>	27 aA	26 aA	27 aA	484 aA	454 aA	495 aA
<i>Pennisetum glaucum</i>	24 aA	27 aA	26 aA	421 aB	460 aAB	498 aA
<i>Cajanus cajan</i>	25 aA	26a A	25 aA	429 aA	461 aA	417 bA
<i>Crotalaria spectabilis</i>	28 aA	25a A	27 aA	493 aA	446 aA	477 abA
<i>Crotalaria juncea</i>	27 aA	28a A	26 aA	465 aA	502 aA	455 abA
Controle	28 aA	25a AB	24 aB	492 aA	432 aAB	425abB

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ). NGF=número de grão por fileira, NGE=número de grão por espiga.

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

O número de grãos por espiga (NGE), não apresentou diferença significativa entre os tratamentos ( $p < 0,05$ ), entretanto variou de 417 NGE na fonte solúvel sobre palhada do *Cajanus cajan* à 502 na palhada da *Crotalaria juncea* e fonte reativa (Tabela - 7).

Os resultados indicam uma diferença não significativa no NGE entre os tratamentos, o que sugere que outros fatores podem ter uma influência mais proeminente na formação dos grãos nas espigas de milho, como doenças e pragas, genética das plantas, as condições ambientais e o manejo adequado do solo.

A variação nos valores do NGE pode indicar que as diferentes plantas de cobertura e fontes de P podem influenciar levemente a formação dos grãos nas espigas, mas essa influência não foi estatisticamente significativa. Essa variação pode ocorrer devido a diferenças nas propriedades das plantas de cobertura, como a composição química da palhada, a quantidade e a qualidade dos nutrientes liberados, bem como no modo como a planta de cobertura interage com o solo e influencia a disponibilidade de nutrientes. O NGE é uma característica importante para a produtividade do milho, pois um maior número de grãos por espiga geralmente está associado a uma maior produtividade (FATEH *et al.*, 2014).

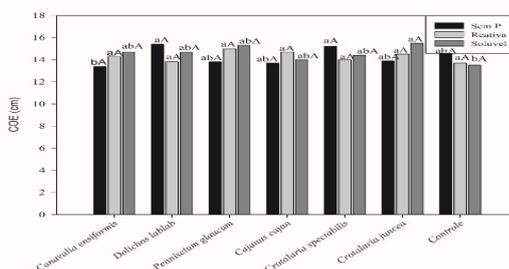
Em um trabalho semelhante desenvolvido por Santos Junior *et al.* (2019), foi observado que o número de fileiras de grãos na espiga, número de grãos por espiga e

comprimento da espiga não diferiram entre as plantas de cobertura estudadas, em que o *Canavalia ensiformis* teve resposta superior a *Crotalaria spectabilis*, sendo justificada pela produtividade de massa seca, concentração foliar e acúmulo de N superior no *Canavalia ensiformis*.

O comprimento das espigas variou de 13,5 a 15,5 cm, sendo *Pennisetum glaucum*, *Dolichos lablab* e *Crotalaria spectabilis*, os tratamentos que apresentaram os maiores comprimentos (Figura - 8). Essas plantas de cobertura podem contribuir para melhorar a estrutura do solo, aumentar a matéria orgânica e fornecer nutrientes, o que pode ter favorecido o crescimento e o desenvolvimento das espigas (CARVALHO *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2022)

Cargnelutti Filho e Toebe (2019), investigaram o número de plantas necessárias para modelar a produtividade de grãos de milho em função do comprimento da espiga e do diâmetro da espiga. Os autores, alcançaram os objetivos do trabalho e observaram que o comprimento das espigas pode desempenhar efeito significativo na determinação do rendimento e a produtividade do milho, devido as espigas mais longas terem o potencial de abrigar um maior número de grãos.

Figura 8 - Comprimento de espiga



Médias seguidas pela mesma letra minúscula para fonte dentro de cada nível de espécie e maiúscula para espécie dentro de cada nível de fonte, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: A autora (2023).

### 4.3 EXTRAÇÃO DE NUTRIENTE

Houve interação significativa para extração de P, K, Ca, Mg e S dos grãos e apenas P da parte aérea do milho. Para fonte e espécie, houve interação dos nutrientes P, K, Ca e Mg dos grãos, enquanto na parte aérea apenas para P e K na espécie apresentaram diferença significativa (Tabela - 8).

Tabela 8-Análise de variância dos macronutrientes extraídos pelos grãos e parte aérea do milho em sucessão às plantas de cobertura e fontes de P com solubilidade distintas

F. V.	G.L.	QM											
		Grãos						Parte aérea					
		N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
Bloco	5	0.7	176.8	87.35	0.07	4.71	0.	526	408.	23541	11	234.	16.8
		1	4				7	7.9	22	.8**	8.2	91*	9
Fonte (F)	2	0.2	1089.	378.4	0.30**	21.4	0.	226	64.9	13496	22	104.	11.9
		6	06***	2**		6**	2	1.9	7	.4	6.9	77	4
Erro (a)	10	0.6	79.83	43.61	0.04	1.72	0.	345	327.	3803.	58.	42.3	11.2
		9					6	0.2	20	2	62	5	6
Espécie (E)	5	0.9	587.0	161.7	0.1	11.0	0.	523	581.	28351	87.	154.	25.6
		9	5**	9***	3***	5***	9	6.6	35*	.6*	98	01	2
F x E	10	1.5	205.5	154.5	0.12	7.1	1.	402	629.4	13090.	89.	69.5	15.76
		8ns	4***	5***	***	5***	5	5.6ns	0**	3ns	16ns	2ns	ns
Erro (b)	75	0.7	68.60	30.93	0.02	1.83	0.	331	260.	7573.	80.	103.	12.9
		1					7	7.5	63	8	87	99	7
CV 1 (%)		18.	20.15	23.02	83.39	19.7	8.	64.	89.8	51.19	64.	36.9	66.6
		73				5	7	50	6		92	2	6
CV 2 (%)		18.	18.68	19.39	61.82	20.3	8.	63.	80.2	72.24	76.	57.8	71.5
		89				7	8	25	0		25	5	4

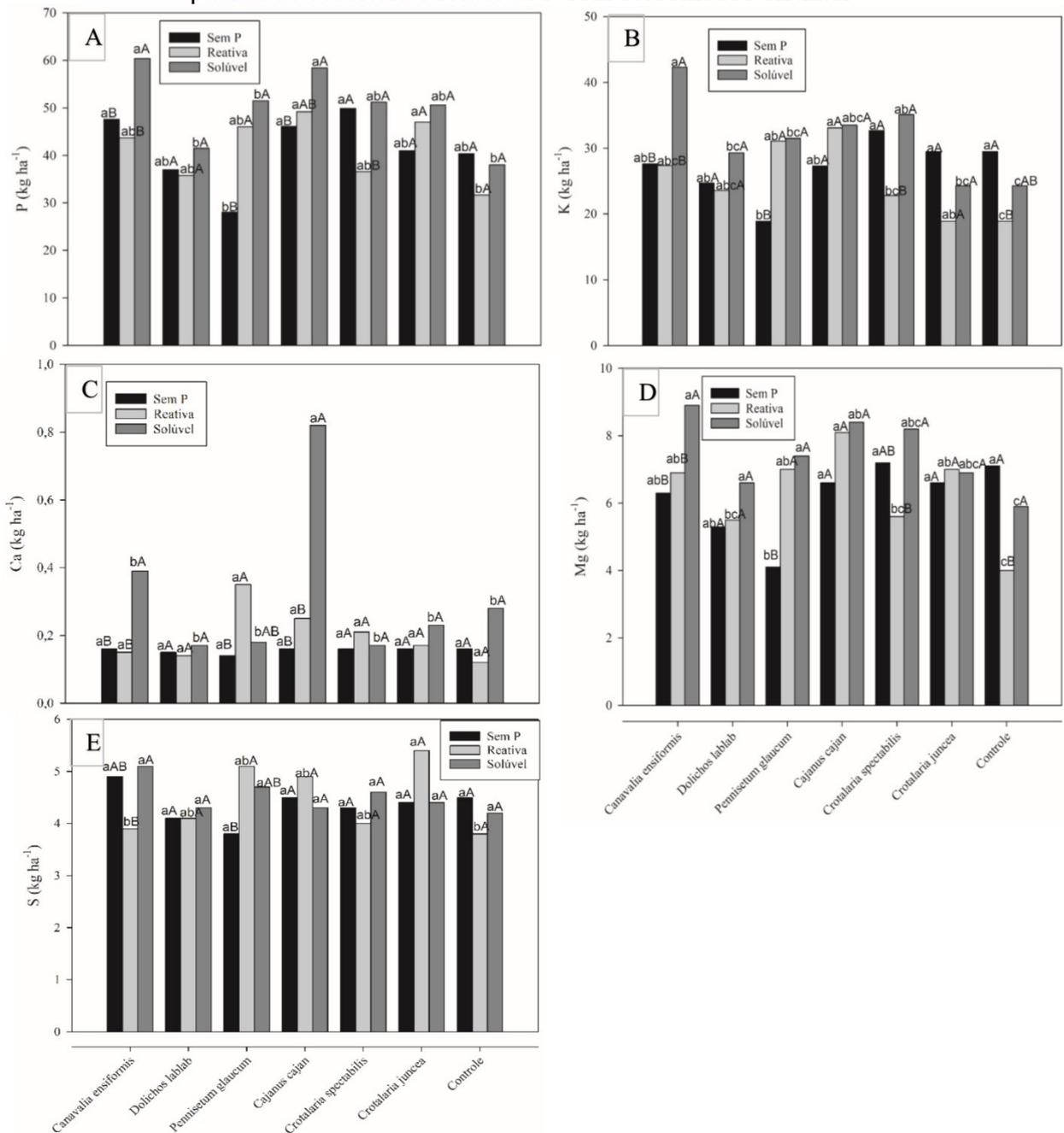
FV = fontes de variação, GL = graus de liberdade, N= nitrogênio, P =fósforo, K= potássio, Ca= cálcio, Mg= magnésio, S= enxofre, CV = coeficiente de variação. \* = significativo ao nível de 0,05% de probabilidade; NS = não significativo pelo Teste F (p<0,05).

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

O maior acúmulo de P no grão foi em sucessão ao *Canavalia ensiformis* na fonte solúvel com 60,4 kg ha<sup>-1</sup>, em seguida o *Cajanus cajan* e *Pennisetum glaucum* (58,4 e 51,5 kg ha<sup>-1</sup>). O acúmulo de P variou de 28 kg ha<sup>-1</sup> no *Pennisetum glaucum* na fonte sem P a 60,4 kg

ha<sup>-1</sup> na palhada do *Canavalia ensiformis* na fonte solúvel. Na palhada da *Crotalaria juncea*, e *Crotalaria spectabilis* o acúmulo de P não foi diferente estatisticamente dentro das fontes, exceto na fonte reativa para *Crotalaria spectabilis* (Figura 9-A).

Figura 9 – Interação do acúmulo dos macronutrientes dos grãos do milho em sucessão às plantas de cobertura e fontes de P com solubilidade distintas



Médias seguidas pela mesma letra minúscula para fonte dentro de cada nível de espécie e maiúscula para espécie dentro de cada nível de fonte, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: A autora (2023).

Os resultados sugerem que o uso do *Canavalia ensiformis* como cultura de cobertura pode ser uma estratégia eficiente para aumentar o acúmulo de P no solo. Ela pode ser plantada antes da cultura principal e, quando incorporada ao solo como palhada, pode contribuir para a disponibilidade de P para as plantas seguintes. As demais plantas avaliadas, como o *Cajanus cajan*, *Pennisetum glaucum*, *Crotalaria juncea* e *Crotalaria spectabilis*, ainda podem desempenhar um papel importante na ciclagem de nutrientes e no aumento da matéria orgânica do solo. Para alguns autores, o N proveniente da fixação biológica e sua disponibilidade no solo pode ser um fator limitante para a absorção eficiente de P pelas plantas. Portanto, uma melhor disponibilidade de N pode contribuir na absorção de P (ATIA, 2012; BLANCO-CANQUI; CLAASSEN; PRESLEY, 2012).

O sistema radicular profundo e extenso de plantas, como *Crotalaria spectabilis* e *Crotalaria juncea* geralmente permitem que explorem uma maior área do solo em busca de nutrientes, incluindo o P. Isso significa que elas são capazes de acessar nutrientes em camadas mais profundas do solo, onde outros tratamentos podem ter dificuldade em alcançar (BLANCO-CANQUI *et al.*, 2015).

Além disso, a produção de ácidos orgânicos e enzimas pelas raízes ajudam a solubilizar formas menos disponíveis de P no solo (WANG, LAMBERS, 2020). Do mesmo modo, microrganismos simbióticos, como cepas rizobacterianas e fungos de solo, desempenham um papel crucial na promoção da absorção de P, convertendo-o de uma forma indisponível para uma disponível, por alguns mecanismos, incluindo a produção de ácidos orgânicos, sideróforos e fosfatases (LV *et al.*, 2016). Portanto, a ação combinada de ácidos orgânicos liberados nas raízes e microrganismos simbióticos contribui para a solubilização e absorção de formas menos disponíveis de P no solo (FERREIRA *et al.*, 2015).

O maior acúmulo de K no grão foi 42,3 kg ha<sup>-1</sup> em sucessão ao *Canavalia ensiformis* na fonte solúvel. Em seguida, os maiores acúmulos de K ocorreram sobre a palhada da *Crotalaria spectabilis* (35,1 kg ha<sup>-1</sup>) na fonte reativa. O acúmulo de K no controle e *Pennisetum glaucum* foi o mesmo, com 19 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 9- B).

Na fonte sem P, *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria juncea* e controle acumularam mais K (32,7, 29,2 e 29,5 kg ha<sup>-1</sup>) e foram estatisticamente iguais aos demais tratamentos, exceto no *Pennisetum glaucum* (18,9 75 kg ha<sup>-1</sup>). Na fonte reativa, a extração variou de 18,9 a 33,1 kg ha<sup>-1</sup> para controle e *Cajanus cajan*, respectivamente. Na fonte solúvel o acúmulo de K variou de 24,3 kg ha<sup>-1</sup> no controle à 35,1 na *Crotalaria spectabilis* (Figura 9- B).

A diferença na extração de K entre as plantas de cobertura pode ser atribuída a uma combinação de fatores relacionados às características das plantas, às propriedades da palhada

e às interações entre as plantas e o solo. A *Crotalaria spectabilis* e *Crotalaria juncea* são espécies com maior capacidade naturalmente em extrair K do solo. Elas possuem sistemas radiculares mais profundos e extensos, o que lhes permite explorar uma maior área do solo e acessar os nutrientes disponíveis em camadas mais profundas (BLANCO-CANQUI *et al.*, 2015).

O maior acúmulo de Ca pelos grãos ocorreu na fonte solúvel sob a palhada do *Cajanus cajan* (0,82 kg ha<sup>-1</sup>) e a menor no controle 0,12 kg ha<sup>-1</sup>. O acúmulo de Ca nos demais tratamentos não apresentaram diferença significativa entre as fontes, exceto para *Canavalia ensiformis* e *Cajanus cajan*. No geral a fonte sem P foi menor ou igual na extração de Ca em comparação com as outras fontes mencionadas (Figura 9- C).

O maior acúmulo de Mg nos grãos, ocorreu na fonte solúvel sobre a palhada de *Canavalia ensiformis* com 8,9 kg ha<sup>-1</sup>, seguido do *Cajanus cajan* e *Crotalaria spectabilis* (8,4 e 8,2 kg ha<sup>-1</sup>). Enquanto a menor acumulação foi no controle com 4 kg ha<sup>-1</sup> de Mg na fonte reativa (Figura 9-D).

Nas diferentes plantas de cobertura analisadas, as maiores taxas de extração de Mg foram encontradas na fonte solúvel, exceto na *Crotalaria juncea* que a fonte reativa teve o maior acúmulo, não diferindo da fonte solúvel. Na fonte reativa, *Cajanus cajan* apresentou uma extração de Mg significativamente maior em comparação com o controle (4 kg ha<sup>-1</sup>), entretanto o acúmulo de Mg do *Cajanus cajan* foi estatisticamente igual ao *Pennisetum glaucum*, *Canavalia ensiformis* e *Crotalaria juncea* (Figura 9-D).

A nutrição adequada de Mg melhora o desenvolvimento inicial das plantas de milho, incluindo diâmetro basal do caule, massa seca da folha, massa seca da raiz e produção de grãos. Uma deficiência de Mg pode levar a problemas no metabolismo das plantas, reduzindo assim a produtividade do cultivo (CACATTO JUNIOR *et al.*, 2019). Portanto, é importante monitorar os níveis de Mg no solo e garantir uma nutrição balanceada para o desenvolvimento saudável e a produtividade do grão de milho.

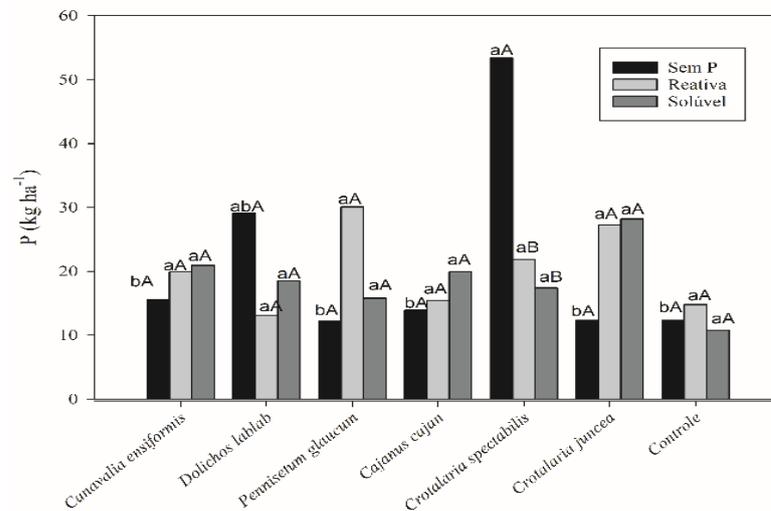
O acúmulo de S, foi superior na fonte reativa em sucessão à *Crotalaria juncea*. Nesse caso, houve um acréscimo de aproximadamente 42% (5,4 kg ha<sup>-1</sup>) em comparação ao controle, que acumulou 3,8 kg ha<sup>-1</sup> de S. Já as plantas *Dolichos lablab*, *Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis* e o controle não apresentaram diferenças significativas na extração de S no grão de milho. Isso indica que essas plantas de cobertura têm uma capacidade semelhante de acumular enxofre no grão, independentemente da fonte utilizada (Figura 9-E).

Na fonte solúvel, sobre a palhada do *Canavalia ensiforme*, a extração de S foi  $\sim 1,3$  kg ha<sup>-1</sup> maior que na fonte reativa. O grão extraiu  $\sim 34\%$  a mais de sem P (3,8 kg ha<sup>-1</sup>) sob a palhada do *Pennisetum glaucum*, na fonte reativa (Figura 9-E). Esses resultados sugerem que a *Crotalaria juncea* pode ser uma boa opção em sucessão para aumentar a acumulação de S no solo, já que apresentou um acúmulo significativamente maior quando a fonte reativa foi utilizada.

O S é um nutriente vital para o milho, sendo o quarto principal nutriente depois do N, P e K. O S é essencial para fotossíntese, formação da clorofila, síntese proteica e óleo do milho. Portanto, a disponibilidade de S no solo afeta não apenas a produtividade do milho, mas também sua qualidade nutricional (ARIRAMAN *et al.*, 2020; PRADO, 2021). Com o uso adequado de práticas agrícolas, como a rotação de culturas e o manejo de plantas de cobertura ricas em S, é possível promover uma melhor disponibilidade desse nutriente no solo e, conseqüentemente, melhorar o desenvolvimento e a produção do milho.

A maior extração de P da parte aérea do milho ocorreu sob a palhada de *Crotalaria spectabilis* (53,4 kg ha<sup>-1</sup>), na fonte sem P. Enquanto a menor quantidade de extração de P ocorreu sob a palhada do *Pennisetum glaucum* com 12,2 kg ha<sup>-1</sup> e este não diferiu estatisticamente dos demais tratamentos ( $p < 0,05$ ). Na fonte reativa e solúvel não houve diferença significativa entre os tratamentos ( $p < 0,05$ ). Na fonte reativa a extração de P variou entre 13,1 kg ha<sup>-1</sup> para *Dolichos lablab* e 30,1 kg ha<sup>-1</sup> para *Pennisetum glaucum* (aproximadamente o dobro da extração da fonte sem P) já na fonte solúvel a extração de P variou de 10,9 kg ha<sup>-1</sup> no controle a 28,2 kg ha<sup>-1</sup> na palhada da *Crotalaria juncea* (Figura - 10).

Figura 10 – Interação de acúmulo de P da parte aérea do milho em sucessão às plantas de cobertura e fontes de P com solubilidade distintas



Médias seguidas pela mesma letra minúscula para fonte dentro de cada nível de espécie e maiúscula para espécie dentro de cada nível de fonte, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: A autora (2023).

A extração de P pela parte aérea do milho é um fator importante a ser considerado para maximizar o rendimento e a qualidade da cultura. O P é essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas, sendo necessário para processos como a fotossíntese, síntese de DNA e RNA e transporte de energia (NOVAIS; SMYTH, 1999; PAVINATO *et al.*, 2017).

Os resultados mostram que a palhada de *Crotalaria spectabilis* promoveu a maior extração de P da parte aérea do milho, com uma quantidade de 53,4 kg ha<sup>-1</sup>. Isso indica que essa espécie de planta de cobertura é capaz de absorver e acumular uma quantidade significativa de P, disponibilizando-o para a cultura do milho. Por outro lado, a palhada de *Pennisetum glaucum* apresentou a menor extração de P, com 12,2 kg ha<sup>-1</sup>.

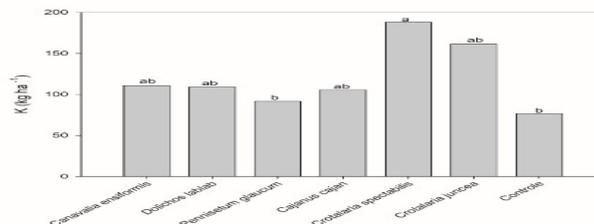
A extração de P da parte aérea do milho, nas fontes reativa e solúvel variou entre os tratamentos, mas não houve diferenças significativas entre eles. Isso indica que a escolha da palhada de planta de cobertura pode influenciar na extração de P pelo milho, mas outros fatores, como a disponibilidade do nutriente no solo, também podem afetar o processo de extração. Portanto, é importante considerar esses diferentes aspectos ao selecionar a planta de cobertura mais adequada para promover a extração e ciclagem de P (PAVINATO *et al.*, 2017, SANTOS *et al.*, 2020).

Esses resultados são relevantes para a prática agrícola, pois mostram que a escolha adequada da planta de cobertura pode influenciar na extração de nutrientes, como o P, pela

cultura principal. Dessa forma, o uso de plantas de cobertura com capacidade de absorção e acumulação de P pode contribuir para melhorar a disponibilidade desse nutriente para o milho, reduzindo a dependência de fertilizantes fosfatados e promovendo um manejo mais eficiente dos recursos. Além disso, a escolha correta pode promover a ciclagem de nutrientes e a melhoria da qualidade do solo, uma vez que as plantas de cobertura são capazes de captar e absorver nutrientes do solo, evitando sua lixiviação e perda (LEIKAM; ACHORN, 2005; CAVALCANTE *et al.*, 2012; ARIRAMAN *et al.*, 2020; PAVINATO *et al.*, 2017).

O maior acúmulo de K na parte aérea do milho, ocorreu sobre a palhada de *Crotalaria spectabilis*, com um valor de 188 kg ha<sup>-1</sup>. A palhada de *Crotalaria juncea* também apresentou uma alta acumulação de K, com um valor de 161 kg ha<sup>-1</sup>. As palhadas de *Cajanus cajan*, *Canavalia ensiformis* e *Dolichos lablab* mostraram um acúmulo K um pouco mais baixa, com valores de 106 kg ha<sup>-1</sup>, 111 kg ha<sup>-1</sup> e 119 kg ha<sup>-1</sup> respectivamente. No entanto, essas diferenças não foram estatisticamente significantes, indicando que essas palhadas não diferiram entre si em termos de acumulação de K (Figura - 11).

Figura 11 - Acúmulo de K da parte aérea do milho em sucessão as plantas de cobertura



Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: A autora (2023).

O K é um nutriente essencial para o crescimento e desenvolvimento do milho, desempenhando um papel importante em processos como a regulação osmótica, ativação de enzimas e transporte de fotoassimilados. O acúmulo de K nos diferentes tipos de palhada de planta de cobertura podem afetar a acumulação de K na parte aérea do milho. A *Crotalaria spectabilis* e a *Crotalaria juncea* se destacaram como as palhadas que promoveram maior acúmulo de K no presente estudo (ATIA, 2012; PRADO, 2021).

De acordo com os resultados apresentados, é possível inferir que a quantidade de nutrientes extraídos pela parte aérea do milho e deixada no solo, podem ser respostas das plantas de cobertura que antecederam a cultura do milho, acarretando na manutenção da fertilidade do solo. É evidente que as diferentes plantas de cobertura influenciam a acumulação de nutrientes, como N, P, K, Ca, Mg e S na cultura do milho, beneficiando a fertilidade do solo, uma vez que, ao se decompor, a palhada das plantas de cobertura libera os nutrientes armazenados, tornando-os disponíveis para as culturas subsequentes, contribuindo para a sustentabilidade agrícola (PIVA *et al.*, 2021; ZHAO *et al.*, 2022).

Ao reduzir a necessidade de aplicação de fertilizantes químicos, os agricultores podem economizar custos e reduzir o impacto ambiental associado a esses insumos. Além disso, a presença de uma biomassa significativa na superfície do solo, como a palhada das plantas de cobertura, ajuda a melhorar a estrutura do solo, aumentar a matéria orgânica e promover a atividade microbiana no solo, o que contribui para a saúde e fertilidade do sistema agrícola como um todo. Portanto, a utilização de plantas de cobertura adequadas, é uma estratégia importante para manter a fertilidade do solo e promover a sustentabilidade agrícola.

#### 4.4 EXTRAÇÃO TOTAL DE NUTRIENTES

Houve interação significativa apenas para extração total (grão e parte aérea do milho) de P. Para espécie houve interação para P e K (Tabela - 9).

Tabela 9 - Análise de variância da extração total (grãos e parte aérea) dos macronutrientes do milho em sucessão às plantas de cobertura e fontes de P com solubilidade distintas

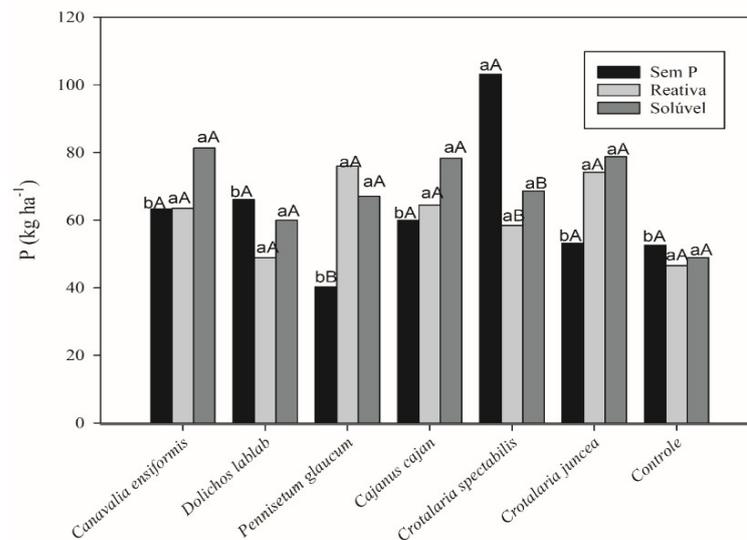
FV	GL	QM					
		N	P	K	Ca	Mg	S
Bloco	5	114.10	290.95	21167.6*	114.10	179.60*	12.11
Fonte (F)	2	238.40 <sup>NS</sup>	661.70 <sup>NS</sup>	12987.5 <sup>NS</sup>	238.40 <sup>NS</sup>	53.55 <sup>NS</sup>	8.83 <sup>NS</sup>
Erro (a)	10	59.79	298.53	3656.0	59.78	37.68	10.21
Espécie (E)	5	87.37 <sup>NS</sup>	1440.20*	30524.9*	87.37 <sup>NS</sup>	185.58 <sup>NS</sup>	24.34 <sup>NS</sup>
F x E	10	90.80 <sup>NS</sup>	1257.90 *	13923.3 <sup>NS</sup>	90.80 <sup>NS</sup>	88.37 <sup>NS</sup>	18.62 <sup>NS</sup>
Erro (b)	75	81.42	382.25	7776.3	81.42	111.72	15.16
CV 1 (%)		64.34	26.80	40.54	64.34	25.29	33.68
CV 2 (%)		75.08	30.33	59.12	75.08	43.55	41.04

FV = fontes de variação, GL = graus de liberdade, CV = coeficiente de variação. \* = significativo ao nível de 0,05% de probabilidade; NS = não significativo pelo Teste F ( $p < 0,05$ ).

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Apenas na fonte sem P, houve diferença significativa entre os tratamentos ( $p < 0,05$ ) para a extração total de P (parte aérea e grãos do milho). Entre os tratamentos, foi observado que a *Crotalaria spectabilis* apresentou a maior resposta em termos de acúmulo de P, com uma extração total de P, com  $103,2 \text{ kg ha}^{-1}$ . Isso representa um aumento de aproximadamente 96% em relação ao controle, que apresentou uma extração total de  $52,6 \text{ kg ha}^{-1}$  (Figura - 12).

Figura 12 - Extração total de P pelo milho em sucessão às plantas de cobertura e fontes de P com solubilidade distintas



Médias seguidas pela mesma letra minúscula e maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

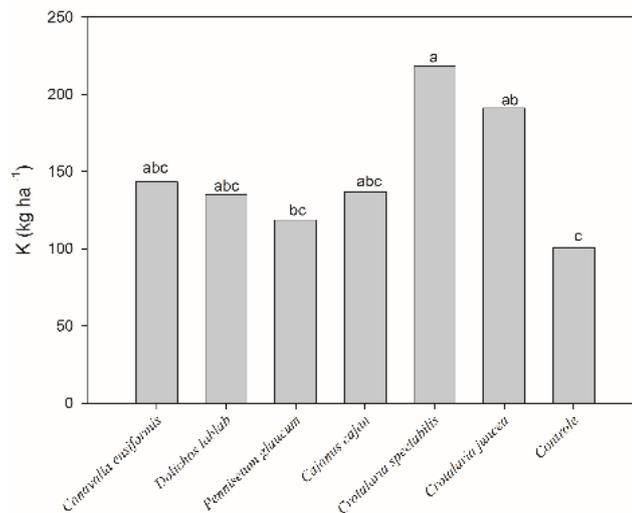
Fonte: A autora (2023).

Esses resultados indicam que a inclusão da palhada de *Crotalaria spectabilis* no sistema de cultivo de milho teve um efeito positivo significativo no acúmulo de P pela cultura, sugerindo que essa espécie é capaz de fornecer uma fonte significativa de P para o milho, resultando em um maior acúmulo do nutriente tanto na parte aérea quanto nos grãos da cultura. Além disso, esses dados têm implicações importantes para a prática agrícola, uma vez que indicam que o uso de determinadas espécies de plantas de cobertura, pode contribuir para uma melhor nutrição de P das culturas subsequentes.

O P é fundamental no metabolismo das plantas, pois tem funcionalidade na fotossíntese, na transferência de energia e no metabolismo dos carboidratos, ele desempenha um papel crítico na formação e enchimento dos grãos e na resposta do milho ao estresse (NOVAIS; SMYTH, 1999; PAVINATO *et al.*, 2017, SANTOS *et al.*, 2020).

O maior acúmulo total de K, ocorreu em sucessão a palhada da *Crotalaria spectabilis* (218,2 kg ha<sup>-1</sup>). Em seguida, na *Crotalaria juncea* com 191,1 kg ha<sup>-1</sup>, e teve menor acumulação no controle com 100,7 kg ha<sup>-1</sup>. *Canavalia ensiformis*, *Dolichos lablab*, *Pennisetum glaucum* e *Cajanus cajan* não apresentaram diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entretanto variaram de 135 a 143,3 kg ha<sup>-1</sup> (Figura - 13).

Figura 13 - Extração total de K pelo milho em sucessão com plantas de cobertura



Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).  
Fonte: A autora (2023).

Os dados sugerem que as plantas de cobertura, especialmente *Crotalaria spectabilis* e *Crotalaria juncea*, podem contribuir para o aumento do acúmulo total de K, fornecendo uma fonte adicional deste nutriente para a cultura. Entretanto, a disponibilidade adequada de K durante o ciclo de crescimento do milho é fundamental para garantir seu bom desenvolvimento, produção e qualidade dos grãos (ATIA, 2012).

Não houve diferença significativa para extração total de N, Ca, Mg e S (Tabela - 10).

Tabela 10 - Extração total (grãos e parte aérea) de N, Ca, Mg e S do milho em sucessão com plantas de cobertura e controle

Espécies	N	Ca	Mg	S
	-----kg/ha-----			
<i>Canavalia ensiformis</i>	187,2a	9,3a	23,8a	9,2a
<i>Dolichos lablab</i>	197,4a	12,2a	24,2a	10,1a
<i>Pennisetum glaucum</i>	192,7a	11a	22,6a	8,9a
<i>Cajanus cajan</i>	180,7a	12,5a	23,9a	9,2a
<i>Crotalaria spectabilis</i>	227,6a	15,9a	28,4a	11,6a
<i>Crotalaria juncea</i>	201,6a	13,2a	28a	9,7a
Controle	162,3a	10a	19a	7,8a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

De acordo com os resultados apresentados, se pode inferir que parte da acumulação de nutrientes extraídos pelo milho podem ser oriundos da biomassa das plantas de cobertura e das fontes de P., no entanto, outros fatores também podem influenciar o acúmulo de nutrientes no milho, como o manejo e disponibilidade de nutrientes no solo.

No geral, as plantas de cobertura, especialmente aquelas com alta produção de biomassa e capacidade de acumulação de nutrientes, como *Crotalaria juncea* e *Crotalaria spectabilis*, podem ter um impacto positivo na cultura do milho, aumentando a disponibilidade de nutrientes essenciais como N, P, K, Ca, Mg e S. Isso pode reduzir a necessidade de aplicação de fertilizantes, além de melhorar a fertilidade do solo a longo prazo. Além disso, as plantas de cobertura também ajudam a melhorar a saúde do solo, aumentando a matéria orgânica e a atividade microbológica, o que pode resultar em benefícios adicionais para a cultura do milho.

As plantas de cobertura protegem e acumulam biomassa na superfície do solo, retendo umidade e disponibilizando nutrientes, como o N, importante para o rendimento e qualidade do milho (PIVA *et al.*, 2021). Estudos anteriores em regiões secas (CAVALCANTE *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2020) destacaram que a *Crotalaria juncea* atingiu estágio de florescimento com 60-65 dias após a semeadura (DAS). Scavo *et al.* (2020), mencionam que este é o período ideal para o término do cultivo das plantas de cobertura, por ser nesta fase que as plantas apresentam os maiores acúmulos de matéria seca e nutrientes foliares. Essa constatação valida os resultados do presente estudo, já que as plantas foram cultivadas por apenas 60 DAS.

## 5 CONCLUSÕES

*Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis* e *Canavalia ensiformis* obtiveram os maiores rendimentos de massa seca. As plantas de cobertura acumularam maiores quantidades de N, K e Ca. O controle apresentou os menores acúmulos de nutrientes.

Não houve efeito significativo no rendimento do milho. A produtividade dos grãos variou de aproximadamente 6,4 t ha<sup>-1</sup> no controle a cerca de 8 t ha<sup>-1</sup> em sucessão ao *Canavalia ensiformis*. A absorção dos nutrientes N, P e Ca pelo grão e parte aérea do milho foi influenciada pelas plantas de cobertura e pelas fontes de P, com tendência de maiores quantidades para a fonte reativa.

Embora as plantas de cobertura não tenham mostrado respostas significativas na produtividade de grãos, os nossos resultados indicam que elas têm um forte potencial de acumular nutrientes, favorecendo a fertilidade do solo, podendo a longo prazo diminuir a necessidade de fertilizantes químicos.

A *Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis* e *Canavalia ensiformis* são espécies excelentes para o sistema de semeadura direta. No entanto, mais pesquisas são necessárias para determinar a adequação dessas espécies especificamente no sistema de plantio direto no estado de Alagoas.

## REFERÊNCIAS

- ADETUNJI, A. T. *et al.* Management impact and benefit of cover crops on soil quality: a review. **Soil and Tillage Research**, v. 204, oct. 2020.
- ALBUQUERQUE, A. W. D. *et al.* Plantas de cobertura e adubação nitrogenada na produção de milho em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 7, p. 721–726, 2013.
- ALONSO-AYUSO, M. *et al.* Assessing cover crop management under actual and climate change conditions. **Science of The Total Environment**, v. 621, p. 1330–1341, 2018.
- AMANULLAH.; FAHAD, S. Integrated nutrient management in corn production: symbiosis for food security and grower's income in arid and semiarid climates. *In*: AMANULLAH; FAHAD, S. (edit.). **Corn: production and human health in changing climate**. [S.l.]: Intech Open, 10 oct. 2018.
- ANDERSON, W. *et al.* Winter legume cover effects on yields of biomass-sorghum and cotton in Georgia. **Agronomy Journal**, v.114, n. 2. 2022.
- ARIRAMAN, R. *et al.* Effect of sulphur nutrition on growth parameters, yield parameters, yield, nutrient uptake, quality and economics of maize: a review. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 9, n. 6, p. 1632–1636, 2020.
- ARRIAGA, F. J.; GUZMAN, J.; LOWERY, B. Conventional agricultural production systems and soil functions. **Soil Health and Intensification of Agroecosystems**, p. 109-125, 2017.
- ATIA, R. H. Effect of nitrogen fertilization levels on potassium absorption by some wheat varieties in northern delta region. **Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering**, v. 3, n. 2, p. 207–218, 2012.
- BARBOSA, I. R. *et al.* Dry matter production and nitrogen, phosphorus and potassium uptake in *Crotalaria juncea* and *Crotalaria spectabilis*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 50, 2020.
- BARROS, J. F. C.; CALADO, J. G. **A cultura do milho**. Évora, PO: Universidade de Évora, 2014.
- BATISTA, M. A. *et al.* Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral. *In*: BRANDÃO FILHO, J. U. T. *et al.* **Hortaliças-fruto**. Maringá, PR: EDUEM, 2018. p. 113-162.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.105-112, 1997
- BESSEN, M. R. *et al.* Produtividade de milho e retorno econômico em sistema integrado de produção com doses de nitrogênio. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 19, n. 1, p. 94–103, 2020.

- BISWAS, D. K.; MA, B. L. Effect of nitrogen rate and fertilizer nitrogen source on physiology, yield, grain quality, and nitrogen use efficiency in corn. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 96, n. 3, p. 392–403, 2016.
- BLANCO-CANQUI, H.; CLAASSEN, M. M.; PRESLEY, D. R. Summer cover crops fix nitrogen, increase crop yield, and improve soil–crop relationships. **Agronomy Journal**, v. 104, n. 1, p. 137–147, 2012.
- BLANCO-CANQUI, H. *et al.* Cover crops and ecosystem services: insights from studies in temperate soils. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 6, 2015.
- BLANCO-CANQUI, H. *et al.* Can cover crops improve soil ecosystem services in water-limited environments? A review. **Soil Science Society of America Journal**, v. 86, n. 1, 2022.
- BOLDRINI, I. I.; LONGHI-WAGNER, H. M.; BOECHAT, S. C. **Morfologia e taxonomia de gramíneas Sul-Rio-Grandenses**. Porto Alegre, RS: EDUFRGS, 2008.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. **Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista**. Brasília, DF: MAA, 2012.
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, p. 3–22, 2005.
- BÜNEMANN, E. K. *et al.* Soil quality: a critical review. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 120, p. 105–125, 2018.
- CABI. Pennisetum glaucum (pearl millet). **CABI Compendium**, Wallingford, UK, 17 nov. 2021. Disponível em: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/cabicompendium.39766>. Acesso em: 9 jul. 2023.
- CACATTO JUNIOR, R. C. *et al.* Magnesium sources and inoculation with Azospirillum brasilense in the initial development of maize. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 7, p. p170, 2019.
- CALONEGO, J.; ROSOLEM, C. A. Phosphorus and potassium balance in a corn-soybean rotation under no-till and chiseling. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 96, n.123-131, 2013.
- CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do solo**. 2. ed. Piracicaba, SP: ESALQ, 2016.
- CARGNELUTTI FILHO, A.; TOEBE, M. Reference sample size for multiple regression in corn. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.55, e 01400, 2020.
- CARVALHO, A. M. *et al.* Manejo de plantas de cobertura na floração e na maturação fisiológica e seu efeito na produtividade do milho. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 50, n. 7, p. 551–561, 2015.

CASTRO FILHO, A. M. G. *et al.* **Prospecção de demandas tecnológicas de cadeias produtivas e sistemas naturais**. Brasília, DF: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Departamento de Pesquisa e Difusão de Tecnologia, 1998.

CASTRO, G. F. D. *et al.* Plantas de cobertura em sucessão ao milho para silagem em condições do cerrado. **Journal of Bioenergy and Food Science**, v. 4, n. 1, p. 37–49, 2017.

CHERUBIN, M. R. *et al.* **Guia prático de plantas de cobertura: aspectos fitotécnicos e impactos sobre a saúde do solo**. Piracicaba, SP: ESALQ, 2022.

CHIEN, S. H. *et al.* Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 89, n. 2, p. 229–255, 2011.

CIAMPITTI, I. A.; VYN, T.J. Grain nitrogen source changes over time in maize: a review. **Crop Science**, n. 53, p. 366-377, 2013.

CIAMPITTI, I. A.; ELMORE, R. W.; LAUER, J. **Fases do desenvolvimento da cultura do milho**. Manhattan, KS: Kansas State University Agricultural Experiment Station: Cooperative Extension Service, oct. 2016.

CIVIDANES, F. J. Efeitos do sistema de plantio e da consorciação soja-milho sobre artrópodes capturados no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 1, p. 15–23, 2002.

COELHO, A. M. Nutrição e adubação do milho. **Circular Técnica**, Sete Lagoas, MG: Embrapa, n. 78, p. 1-10, dez. 2006.

COELHO, J. D. Milho: produção e mercados. **Caderno Setorial ETENE**, Fortaleza, CE: BNB, ano 6, n. 182, ago. 2021.

CONAB. Grãos: safra 2022/23: 10º levantamento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF: Conab, v. 10, n. 10, jul. 2023.

CUBAS, L. A. *et al.* Lessons from relatives: C4 photosynthesis enhances CO2 assimilation during the low-light phase of fluctuations. **bioRxiv**, 07 apr. 2023. Preprint.

DABNEY, S. M. *et al.* Using cover crops and cropping systems for nitrogen management. *In*: DELGADO, J. A.; FOLLETT, R. (ed.). **Advances in nitrogen management for water quality**. Ankeny, Iowa: Soil Water Conservation Society, 2011. p. 230-281.

DALAL, R. C. Soil organic phosphorus. **Advances in Agronomy**, San Diego, CA, v. 29, p. 83–117, 1977.

DODIG, D. *et al.* Dynamics of maize vegetative growth and drought adaptability using image-based phenotyping under controlled conditions. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, 11 may 2021.

EHLERINGER, J.; CERLING, T.; HELLIKER, B. C4 photosynthesis, atmospheric CO2, and climate. **Oecologia**, v. 112, p. 285–299, 1997.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Londrina, PR: Planta, 2006.

FAO. Food Systems. **FAO**, Rome, 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/food-systems/en/>. Acesso em: 13 fev. 2023.

FATEH, M. *et al.* Effects of density and nitrogen fertilizer on number of ear, number of grains and grain weight in maize cultivars. **International Journal of Biosciences**, v. 4, n. 11, p. 76–82, 1 jan. 2014.

FEBRAPDP. **O que é?** Sistema de plantio direto, Ponta Grossa, PR: FEBRAPDP, 2023. Disponível em: <https://plantiodireto.org.br/sistema-plantio-direto-o-que-e>. Acesso em: 28 fev. 2023.

FERRAZ-ALMEIRA, R. Erosão do solo e rotas de uso e produção na região do mitopiba, Brasil. **Revista Brasileira de Agricultura**, v. 98, p. 1-1, 2023.

FERREIRA, A. C. B. *et al.* Cover plants in second crop: nutrients in straw and cotton yield in succession. **Pesq. Agropec. Trop.**, v. 53, 2023.

FLORENTÍN, M. A. *et al.* Green manure/cover crops and crop rotation in conservation agriculture on small farms. **Integrated Crop Management**, v. 12, 2010.

GALON, L. *et al.* Influência dos fatores abióticos na produtividade da cultura do milho. **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológica**, v. 4, n. 3, 2010.

GARCIA, F. H. S. *et al.* Níveis de nutrientes em cambissolo háplico cultivado com leguminosas consorciadas com cynodon. **Revista Brasileira de Higiene e Sanidade Animal: RBHSA**, v. 14, n. 2, p. 174–184, 2020.

GATIBONI, L. C. *et al.* Chemical fractionation of soil phosphorus forms: uses and limitations. **Top. Soil Sci**, v. 8, p. 221-278, 2013.

GATIBONI, L. C. *et al.* Phosphorus forms and availability assessed by  $^{31}\text{P}$ -NMR in successive cropped soil. **Comm. Soil Sci. Plant Anal.**, v. 36, p. 2625-2640, 2005.

GITTI, D. C. Manejo da adubação do Milho Safrinha. *In*: FUNDAÇÃO MS. **Tecnologia e produção: Milho Safrinha e culturas de inverno**. Maracaju, MS: Fundação MS, 2014. p.13-116.

GRIFFITHS, M. *et al.* Optimisation of root traits to provide enhanced ecosystem services in agricultural systems: A focus on cover crops. **Plant Cell Environ**, v. 45, p. 751-770, 2022.

HALLAMA, M. *et al.* Hidden miners: the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. **Plant and Soil**, v. 434, n. 1–2, p. 7–45, 2019.

HAN, S. Y., *et al.* Comparative transcriptomics reveals the role of altered energy metabolism in the establishment of single-cell C4 photosynthesis in *Bienertia sinuspersici*. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023.

HARUNA, S. I.; NKONGOLO, N. V. Influence of cover crop, tillage, and crop rotation management on soil nutrients. **Agriculture**, v. 10, n. 6, p. 225, 2020.

HECKENMÜLLER, M.; NARITA, D.; KLEPPER, G. Global availability of phosphorus and its implications for global food supply: an economic overview. **Kiel Working Paper**, n. 1897, jan. 2014.

HELLMANN, E. Translational regulation of phosphate affects shoot phosphate levels and biomass. **Plant Physiology**, v.183, p. 818–819, 2020.

HERNÁNDEZ, E. D. *et al.* The nutraceutical value of maize (*Zea mays* L.) landraces and the determinants of its variability: A review. **Journal of Cereal Science**, v. 103, 2022.

HERNANI, L. C.; KURIHARA, C. H.; SILVA, W. D. Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 23, p. 145-154, 1999.

IBGE. **Censo agropecuário**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

IDI, A, A, B. *et al.* Manufacture of simple superphosphate from Tahoua rock phosphate. **World Journal of Advanced Research and Reviews**, v. 18, n. 2, p. 1139–1148, 2023.

JAHAN, B. *et al.* Sulfur availability potentiates phytohormones-mediated action in plants. **Plant Signaling Molecules: Role and Regulation under Stressful Environments**, Espana: Elsevier, p. 287–301, 1 jan. 2019.

KOEFENDER, J. *et al.* Biomass and nutrient cycling by winter cover crops. **Rev. Ceres**, v. 63, n.6, p. 816-821, 2016.

LEAL, M. A. A. *et al.* Desempenho de crotalária cultivada em diferentes épocas de semeadura e de corte. **Rev. Ceres**, v. 59, n.3, p. 386-391, 2012.

LEAL, M. A. A. *et al.* Desempenho de crotalária cultivada em diferentes épocas de semeadura e de corte. **Rev. Ceres**, v. 59, n.3, p. 386-391, 2012.

LEIKAM, D. F. *et al.* Phosphate fertilizers: production, characteristics, and technologies. *In*: SIMS, J. T.; SHARPLEY, A. N. **Phosphorus: agriculture and the environment**. Hoboken, NY: John Willey, 2005. p. 23–50.

LEMESSA, F.; WAKJIRA, M. Cover crops as a means of ecological weed management in agroecosystems. **Journal of Crop Science and Biotechnology**, v.18, p.123-135, 2015.

LOPES, J. R. F.; DANTAS, M. P.; FERREIRA, F. E. P. Variabilidade da precipitação pluvial e produtividade do milho no semiárido brasileiro através da análise multivariada. **Nativa**, v. 7, n. 1, p. 77-83, 2019.

LOPES, V. A. *et al.* Phosphorus acquisition from phosphate rock by soil cover crops, maize, and a buckwheat–maize cropping system. **Scientia Agricola**. v.79, n.4, 2022.

LÓPEZ, R. E. S. *Canavalia ensiformis* (L.) DC (Fabaceae). **Revista Fitos**, v. 7, n. 03, p. 146–154, 2012.

- MADALÃO, J. C. *et al.* Action of *Canavalia ensiformis* in remediation of contaminated soil with sulfentrazone. **Bragantia**, v. 76, n. 2, p. 292–299, 2017.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba., SP: POTAFOS, 1997.
- MALONE, L. C. *et al.* Cover crops in a Wisconsin annual cropping system: feasibility and yield effects. **Agronomy Journal**, v. 114, n. 2, p. 1052–1067, 2022.
- MELKONIAN, J. *et al.* Estimating nitrogen mineralization from cover crop mixtures using the precision nitrogen management model. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 5, p. 1944–1959, 2017.
- MONZÓN, A. D. D. *et al.* Resposta das culturas de milho e soja à aplicação de gesso com calcário em sistema de plantio direto. **Revista Cultivando o Saber**, v. 15, p. 105–118, 2022.
- MORALES, M. E. *et al.* Efecto de los cultivos de cobertura invernales sobre el microbioma del suelo: revisión sistemática de la literatura. **Revista Argentina de Microbiología**, v. 54, n. 1, p. 57-70, 2022.
- MORTENSEN, E. O. *et al.* Short-term cover crop carbon inputs to soil as affected by long-term cropping system management and soil fertility. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 311, 2021.
- NLEYA, T.; CHUNGU, C.; KLEINJAN, J. Corn growth and development. *In*: CLAY, D. E. *et al.* (edit.). **iGrow corn: best management practices**. Brookings, SD: South Dakota State University, mar. 2019. p. 1-9.
- NOLLA, A. *et al.* Characterization and potential of organic and mineral phosphate fertilizer used in the annual agriculture. **Scientific Electronic Archives**, v. 11, n. 3, p. 6-15, 2018.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1999.
- OBOUR, A. K. *et al.* Cover crops to improve soil health in the North American Great Plains. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 6, p. 4590–4604, 2021.
- PACHECO, L. P. *et al.* Biomass yield in production systems of soybean sown in succession to annual crops and cover crops. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.52, n.8, p.582-591, 2017.
- PACHECO, L. P. *et al.* Produção de fitomassa e acúmulo e liberação de nutrientes por plantas de cobertura na safrinha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 17–25, 2011.
- PACHECO, L. P. *et al.* Influência da densidade do solo em atributos da parte aérea e sistema radicular de crotalária. **Pesq. Agropec. Trop.**, v. 45, n. 4, p. 464-472, 2015.
- PAES, M. C. D. Aspectos físicos, químicos e tecnológicos do grão de milho. **Circular Técnica**, Sete Lagoas, MG: EMBRAPA, n. 75, dez. 2006.

PAVINATO, P. S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A. Compostos orgânicos de extratos vegetais e seu efeito no uso de fósforo no solo-capacidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n.10, p.1379-1388, 2008.

PAVINATO, P. S. *et al.* Effects of cover crops and phosphorus sources on maize yield, phosphorus uptake, and phosphorus use efficiency. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 3, p. 1039-1047, 2017.

PEREIRA, D. S.; COSTA, Y. K. S.; CARVALHO, L. B. O elemento P: formas e dinâmica em solos tropicais. **Revista Agronomia Brasileira**, v. 5, 2021.

PEREIRA, D. S. *et al.* Availability and fractionation of phosphorus in soils with different physicochemical characteristics. **Agro@ambiente On-line**, v. 14, 2020.

PEREIRA FILHO, I. A.; BORGHI, E. **Cultivares de milho para safra 2022/2023**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2022.

PEREIRA FILHO, I. A. **Cultivo do milheto**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2016.

PIRES, C. A. B.; SARTO, M. M.; LIN, J. S. Long-term effect of tillage practices and nitrogen fertilization on corn yield. **Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports**, v. 6, n. 9, 2020.

PIVA, A. Safra de grãos de Alagoas é a que mais cresce no Brasil. **Revista Oeste**, 11 ago. 2023. Disponível em: <https://revistaoeste.com/agronegocio/safra-de-graos-de-alagoas-e-a-que-mais-cresce-no-brasil/>. Acesso em: 23 ago. 2023.

PIVA, J. T. *et al.* Use of winter cover crops improves maize productivity under reduced nitrogen fertilization: a long-term study. **Bragantia: Boletim Técnico do Instituto Agrônômico do Estado de São Paulo**, v. 80, 2021.

PRADO, R. DE M. **Nutrição de plantas**. São Paulo, SP: Unesp, 2021.

RAJAN, S. S. S.; UPSDELL, M. P. Environmentally friendly agronomically superior alternatives to chemically processed phosphate fertilizers: phosphate rock/sulfur/Acidithiobacillus sp. combinations. *In*: SPARKS, D. L. (edit.). **Advances in Agronomy**. Cambridge, MA: Elsevier, mar. 2021. p. 183–245. (Advances in agronomy; 167).

RAJAN, S. S. S.; WATKINSON, J. H.; SINCLAIR, A. G. Phosphate rocks for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, v. 57, p. 77-159, 1996.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2021.

REIS, A. S. *et al.* Manejo da adubação em sistema de plantio direto nos atributos químicos, físicos e biológicos de um latossolo vermelho cultivado com milho. **Cultivando o Saber**, v. 12, n 3, p. 1-13, 2019.

RIBEIRO, S. Cultura do milho no Brasil. **Revista Científica Semana Acadêmica**, v.1, n.1, 2014.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. How a corn plant develops. **Special Bulletin**, Iowa, n. 48. 1993.

RUIS, S. J.; BLANCO-CANQUI, H. Cover crops could offset crop residue removal effects on soil carbon and other properties: **Agronomy Journal**, v. 109, n. 5, p. 1785–1805, 2017.

SANTOS, H. P.; TOMM, G. O. Disponibilidade de nutrientes e teor de matéria orgânica em função de sistemas de cultivo e de manejo de solo. **Ciência Rural**, v.33, p. 477-486, 2003.

SANTOS, V. R. dos. *et al.* Biomass accumulation, extraction and nutrient use efficiency by cover crops. **Society and Development**, v. 9, n. 10, 2020.

SANTOS, W. O. *et al.* Coeficientes de cultivo e necessidades hídricas da cultura do milho verde nas condições do semiárido brasileiro. **Irriga**, Botucatu, v. 19, n.4, p. 559-572, 2014.

SANTOS JUNIOR, A. C. S. *et al.* Maize productivity in succession to cover crops, nitrogen fertilization and inoculation with *Azospirillum brasilense*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, n.12, p.966-971, 2019.

SCHIEBELBEIN, B. *et al.* **Plantas de cobertura e as inter-relações com a saúde do solo**. Piracicaba, SP: ESALQ, 2022.

SCHMIDT, D. M.; LIMA, K. C.; JESUS, E. dos S. Variabilidade climática da disponibilidade hídrica na região Semiárida do Estado do Rio Grande do Norte. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 3, p. 483–491, 2018.

SCHMITT, M. B. *et al.* Factors affecting the establishment and growth of cover crops intersown into maize (*Zea mays L.*), **Agronomy**, v. 11, n. 4, 4 apr. 2021.

SEAB; DERAL. **Milho, análise de conjectura, 2018**. Curitiba, PR: SEAB: DERAL, 2018. Disponível em: <http://www.agricultura.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=240>. Acesso em: 27 out. 22.

SHI, X. *et al.* Dissecting heterosis during the ear inflorescence development stage in maize via a metabolomics-based analysis. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 212, 2019.

SICHOCKI, D. *et al.* Resposta do milho safrinha à doses de nitrogênio e de fósforo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 13, n. 1, p. 48–58, 2014.

SIX, J. *et al.* Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, v. 241, n. 2, p. 155-176, apr. 2002.

SOUSA, D. C. *et al.* Dry mass accumulation, nutrients and decomposition of cover plants. **The Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 5, p. 152, 2019.

SSSA. **Cover crops**. Madison, WI; SSSA, 2023. Disponível em: <https://www.soils.org/publications/soils-glossary>. Acesso em: 15 jul. 2022.

TAIZ, L. *et al.* **Plant physiology and development**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 4th ed. Sunderland: Sinauer Associates, Inc., 2006.

TORRES, J. L. R. *et al.* Cultivo de feijão e milho em sucessão a plantas de cobertura. **Caatinga**, v. 27, n. 4, p. 117-125, 2014.

TREADWELL, D. D. *et al.* Potential for Sunn Hemp (*Crotalaria juncea*) to utilize soil potassium. **Allen Institute for AI**, 1 dec. 2009.

VACCARI, D. A. Phosphorus: a looming crisis. **Scientific American**, v. 300, n. 6, p. 54-59, 2009.

VALDERRAMA, M. *et al.* Fontes e doses de nitrogênio e fósforo em feijoeiro no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 39, n. 3, p. 191-196, 2009.

VINHA, A. P. C. *et al.* Adsorção de fósforo em solos de regiões tropicais. **Nativa**, v. 9, n. 1, p. 30–35, 2021.

WANG, Y.; LAMBERS, H. Root-released organic anions in response to low phosphorus availability: recent progress, challenges and future perspectives. **Plant and Soil**, p. 135-156, 2020.

WENDLING, M. *et al.* Influence of root and leaf traits on the uptake of nutrients in cover crops. **Plant and Soil**, v. 409, n. 1, p. 419–434, 2016.

WOLSCHICK, N. H. *et al.* Cobertura do solo, produção de biomassa e acúmulo de nutrientes por plantas de cobertura. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 15, n. 2, p. 134–143, 2016.

YOUNG J. P. W. Phylogenetic classification of nitrogen-fixing organisms. *In*: STACEY, G.; BURRIS, R.; EVANS, H. (edit.). **Biological nitrogen fixation**. New York: Chapman and Hall, 1992. p. 43-86.

ZENG, L.; CHEN, C. Using remote sensing to estimate forage biomass and nutrient contents at different growth stages. **Biomass & Bioenergy**, v. 115, p. 74–81, 2018.

ZHAO, J. *et al.* Global systematic review with meta-analysis reveals yield advantage of legume-based rotations and its drivers. **Nature Communications**, v.13, n. 4926, 22 aug. 2022.