

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA**

**DAYANNE CAMELO**

**SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS PROMOVIDOS POR DIFERENTES SISTEMAS DE  
CULTIVO DE *Clitoria ternatea* L. E *Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone**

**RECIFE**

**2024**

**DAYANNE CAMELO**

**SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS PROMOVIDOS POR DIFERENTES  
SISTEMAS DE CULTIVO DE *Clitoria ternatea* L. E *Cenchrus purpureus*  
(Schumach.) Morrone**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Zootecnia, da Universidade Federal Rural de  
Pernambuco, para obtenção  
do título de Doutora em Zootecnia

Área de concentração: Zootecnia

Orientador:  
Prof. Márcio Vieira da Cunha

Coorientadores:  
Prof. Dr. José Carlos Batista Dubeux Júnior  
Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Giselle Gomes Monteiro Fracetto

**RECIFE**

**2024**

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA

**SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS PROMOVIDOS POR DIFERENTES  
SISTEMAS DE CULTIVO DE *Clitoria ternatea* L. E *Cenchrus purpureus*  
(Schumach.) Morrone**

Tese elaborada por

DAYANNE CAMELO

Aprovada em

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Márcio Vieira da Cunha  
Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE  
Departamento de Zootecnia  
(Orientador)

---

Dr. Janerson José Coelho  
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mércia Virginia Ferreira dos Santos  
Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE  
Departamento de Zootecnia

---

Dr. Pedro Henrique Ferreira da Silva  
Instituto Nacional do Semiárido - INSA

---

Prof. Dr. Valdson José da Silva  
Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE  
Departamento de Zootecnia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Sistema Integrado de Bibliotecas  
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- C181s      Camelo, Dayanne  
              Serviços ecossistêmicos promovidos por diferentes sistemas de cultivo de *Clitoria ternatea* L. e *Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone / Dayanne Camelo. - 2024.  
              127 f.
- Orientador: Marcio Vieira da Cunha.  
              Coorientador: Jose Carlos Batista Dubeux Junior.  
              Inclui referências.
- Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Recife, 2024.
1. Biomassa microbiana. 2. Estoque de carbono. 3. Fixação biológica de nitrogênio. 4. Produtividade. 5. Sistemas consorciados. I. Cunha, Marcio Vieira da, orient. II. Junior, Jose Carlos Batista Dubeux, coorient. III. Título

Aos meus pais, José Maria Camelo (*in memoriam*) e Maria de Lourdes Nonato de Souza, e à minha irmã, Elysne Camelo, por todo amor incondicional, apoio e incentivo.

Quero compartilhar esta vitória e agradecer por tudo.

Vocês são a minha inspiração!

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

À Jeová, meu Deus, por me guiar nesta caminhada e me dar força e sabedoria.

Aos meus pais, Lourdes e José Maria (*in memoriam*), e à minha irmã Elysne, pelo amor, apoio, compreensão e incentivo em todos os momentos da minha vida.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, pela oportunidade de realizar um sonho.

À Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina, EECAC, pela concessão do espaço e auxílio para execução do experimento.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pela concessão da bolsa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Márcio Vieira da Cunha, pela orientação constante e dedicação nesta fase da minha carreira de formação profissional e pela confiança depositada.

Aos meus co-orientadores: Prof. Dr. José Carlos Batista Dubeux, e à Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Giselle Gomes Monteiro Fracetto, pelos conhecimentos compartilhados e pela disponibilidade durante todo o doutorado.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia (PPGZ), por compartilharem de forma brilhante seus conhecimentos e experiências ao longo do curso.

À *University of Florida*, por viabilizar as análises isotópicas.

À minha amiga Aline, que foi minha parceira no experimento e no laboratório, por toda ajuda e paciência nesse fase atribulada.

Aos amigos do grupo de pesquisa: Aurielle, Antonio, Chrislanne, Cristiane, Daniel, Diana, Géssica, Luciana, Lypson, Maikon, Nágila, Natalia, Pedro, Pedro Henrique, Rita, Telma, Tafnes e Thaise. Obrigada pelo companherismo nesta jornada.

Às bolsistas de Iniciação Científica, Brenda e Lígia, por toda ajuda no experimento e laboratório.

À família Câmara Lira, de forma especial à Cristina, Jane (*in memoriam*), Carolina, Francisco, Maria Helena, Gilberto, Sílvio e Domitila, que me acolheram com amor e cuidado em seu lar.

Aos amigos do Programa Nacional de Pós-Doutorado (PNPD): Italvan Milfont, Suellen Miranda e Williane Diniz, por toda ajuda e companherismo.

À banca examinadora desta Tese, pelas correções e sugestões que contribuíram para complementar este trabalho.

Finalmente, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste sonho.

Entregue o seu caminho a Jeová;  
Confie nele, e ele agirá em seu favor.

Salmo 37:5

## RESUMO

Sistemas consorciados de produção de forragem podem promover diversos serviços ecossistêmicos. Foi investigado o efeito de sistemas de cultivo de capim-elefante (*Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone) com diferentes portes (Elefante B - alto e Mott - baixo), consorciados ou não com cunhã (*Clitoria ternatea* L.), em diferentes épocas em clima tropical seco. Foram avaliadas as características agrônômicas, químicas e fixação biológica do capim-elefante e cunhã, e, em relação ao solo, foram determinadas a atividade microbiana, qualidade da matéria orgânica, glomalina, estoque de C e N. O monocultivo de capim-elefante foi adubado com N (300 kg de N ha ano<sup>-1</sup>). O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso com quatro repetições. A cunhã em monocultivo apresentou maior acúmulo de forragem (4.924 kg ha<sup>-1</sup>) e fixação biológica de nitrogênio (100 kg de N ha ano<sup>-1</sup>) do que consorciada com genótipos de capim-elefante (696 kg ha<sup>-1</sup> e 18 kg de N ha ano<sup>-1</sup>). Genótipos de porte alto e baixo não diferiram no acúmulo de forragem (18.135 e 15.138 kg ha<sup>-1</sup> em 540 dias). A relação folha/caule da cunhã (1,6) e do capim-elefante (1,4) foi semelhante para os diferentes sistemas de cultivo. O acúmulo de forragem e teor e estoque de N no solo não diferiram entre os monocultivos de capim-elefante (16.637 kg ha<sup>-1</sup>, 0,95 g kg<sup>-1</sup> e 1,49 Mg ha<sup>-1</sup>) e os consórcios com cunhã (13.694 kg ha<sup>-1</sup>, 0,90 g kg<sup>-1</sup> e 1,44 Mg ha<sup>-1</sup>). O monocultivo de cunhã estocou mais N na planta e no solo, em comparação aos demais sistemas de cultivo. As frações da matéria orgânica (ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e huminas), C e N da biomassa microbiana, quociente metabólico e microbiano do solo não diferiram entre os monocultivos de capim-elefante e os consórcios com cunhã, com médias 2,34 g kg<sup>-1</sup>; 2,11 g kg<sup>-1</sup>; 3,19 g kg<sup>-1</sup>; 285,50 mg kg<sup>-1</sup>; 37,77 mg kg<sup>-1</sup>; 0,15 mg C-CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> C-mic d<sup>-1</sup> e 2,30%, respectivamente. Na época chuvosa, o solo apresentou maior qualidade da matéria orgânica, teor de glomalina, atividade e biomassa microbiana, e maior quociente microbiano e de mineralização em comparação à época seca, na qual ocorreu maior teor e estoque de C, além da maior participação do capim-elefante na composição botânica em relação à Cunhã. Na camada superficial do solo (0-0,10 m) foi observada maior atividade microbiana, maior N-mic e menor relação C/N na microbiota. O estoque de C e N é maior na camada 0,20-0,40 m do solo. Comparado ao monocultivo com fertilizante nitrogenado, a inclusão da cunhã em capineiras de capim-elefante, independente do porte da gramínea, mantém ou incrementa serviços ecossistêmicos de provisão, regulação e suporte como acúmulo de forragem, fixação biológica de nitrogênio e o armazenamento de C e N do solo e na planta, qualidade da matéria orgânica e atividade microbiana.

**Palavras-chave:** Biomassa microbiana; Estoque de carbono; Fixação biológica de nitrogênio; Produtividade; Matéria orgânica do solo; Sistemas consorciados.

## ABSTRACT

Intercropped forage production systems can promote several ecosystem services. The effect of Elephant grass (*Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone) cultivation systems of different sizes (Elephant B - tall and Mott - short), intercropped or not with Butterfly pea (*Clitoria ternatea* L.), in different seasons in dry tropical climate. The agronomic, chemical characteristics and biological fixation of Elephant grass and Butterfly pea were evaluated. And in relation to the soil, microbial activity, quality of organic matter, glomalin, C and N stocks were determined. The Elephant grass monoculture was fertilized with N ( $300 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ). The experimental design used was randomized blocks with four replications. Butterfly pea in monoculture presents greater forage accumulation ( $4,924 \text{ kg ha}^{-1}$ ) and biological nitrogen fixation ( $100 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ) than when intercropped with Elephant grass genotypes ( $696 \text{ kg ha}^{-1}$  and  $18 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ). High and low genotypes do not differ in forage accumulation ( $18,135$  and  $15,138 \text{ kg ha}^{-1}$  in 540 days). The leaf/stem ratio of Butterfly pea (1.6) and Elephant grass (1.4) was similar for the different cultivation systems. Forage accumulation and N content and stock in the soil did not differ between Elephant grass monocultures ( $16,637 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $0.95 \text{ g kg}^{-1}$  and  $1.49 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) and intercrops with wedge grass ( $13,694 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $0.90 \text{ g kg}^{-1}$  and  $1.44 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). The Butterfly pea monoculture stores more N in the soil compared to other cropping systems. The fractions of organic matter (fulvic acids, humic acids and humins), C and N of microbial biomass, metabolic and microbial quotient of the soil did not differ between Elephant Grass monocultures and intercrops with Butterfly pea, with averages of  $2.34 \text{ g kg}^{-1}$ ;  $2.11 \text{ g kg}^{-1}$ ;  $3.19 \text{ g kg}^{-1}$ ;  $285.50 \text{ mg kg}^{-1}$ ;  $37.77 \text{ mg kg}^{-1}$ ;  $0.15 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ C-mic d}^{-1}$  and 2.30%, respectively. During the rainy season, there is a higher quality of organic matter, glomalin content, microbial activity and biomass, and a higher microbial and mineralization quotient compared to the dry season, which there is a higher C content and stock, in addition to the greater participation of Elephant grass in the botanical composition in relation to Butterfly pea. In the surface layer of the soil (0-0.10 m) higher microbial activity, higher N-mic and lower C/N ratio in the microbiota were observed. The stock of C and N is greatest in the 0.20-0.40 m layer of soil. Compared to monoculture with nitrogen fertilizer, the inclusion of Butterfly pea in Elephant grass weeds, regardless of the size of the grass, maintains or increases ecosystem services of provision, regulation and support such as forage accumulation, biological nitrogen fixation and the storage of C and Soil and plant N, quality of organic matter and microbial activity.

**Keywords:** Microbial biomass; Carbon stock; Biological nitrogen fixation; Productivity; Soil organic matter; Intercropping systems.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Pág.

### CAPÍTULO I

<b>Figura 1</b>	Genótipos de capim-elefante [ <i>Cenchrus purpureus</i> (Schum.) Morrone sin. <i>Pennisetum purpureum</i> Schum.] (A) de porte alto (cv. elefante B) e (B) de porte baixo (cv. Mott), Carpina, PE.....	18
<b>Figura 2</b>	Cunhã ( <i>Clitoria ternatea</i> L.) e a variação na coloração das flores, Carpina, PE.....	21
<b>Figura 3</b>	Cunhã consorciada com genótipos de capim-elefante (A) de porte alto (cv. elefante B) e (B) de porte baixo (cv. Mott), Carpina, PE.....	23

### CAPÍTULO II

<b>Figura 1</b>	Precipitação (A), temperatura máxima, média e mínima (B) das épocas chuvosas e secas durante o período experimental (2021-2023).....	54
<b>Figura 2</b>	Área experimental de capim-elefante e cunhã em diferentes sistemas de cultivo...	54
<b>Figura 3</b>	Altura dos genótipos de capim-elefante, consorciados ou não com a cunhã, em diferentes épocas do ano.....	58
<b>Figura 4</b>	Altura da cunhã consorciada ou não com genótipos de capim-elefante (A) em diferentes épocas do ano (B).....	59
<b>Figura 5</b>	Acúmulo de forragem (A e B) e taxa de acúmulo de forragem (C e D) de capim-elefante e cunhã em diferentes sistemas de cultivo e épocas do ano.....	59
<b>Figura 6</b>	Acúmulo de forragem (A) e taxa de acúmulo de forragem (B) de Cunhã em diferentes sistemas de cultivo e épocas do ano.....	60
<b>Figura 7</b>	Composição botânica de capim-elefante e cunhã em diferentes sistemas de cultivo (A) e épocas do ano (B).....	61
<b>Figura 8</b>	Composição morfológica (A) e relação folha/colmo (B) de capim-elefante em diferentes sistemas de cultivo e épocas do ano.....	62
<b>Figura 9</b>	Composição morfológica de cunhã em diferentes sistemas de cultivo e épocas do ano.....	63
<b>Figura 10</b>	Relação folha/colmo (A) e folha/vagem (B) de cunhã em diferentes sistemas de cultivo e épocas do ano.....	64
<b>Figura 11</b>	Estoque de carbono (A) e nitrogênio (B) de cunhã em diferentes sistemas de cultivo e épocas do ano.....	65
<b>Figura 12</b>	Quantidade de nitrogênio derivado da atmosfera (A) e nitrogênio fixado (B e C) na biomassa aérea da cunhã consorciada ou não com genótipos de capim-elefante em diferentes épocas do ano.....	66
<b>Figura 13</b>	Teor de N do solo em diferentes sistemas de cultivos e época do ano na profundidade de 0-0,10 m.....	67
<b>Figura 14</b>	Análise de componentes principais para as variáveis relacionadas a produtividade das forrageiras, teor e estoque de C e N na planta e no solo de diferentes sistemas de cultivo de capim-elefante (monocultivo ou consorciado com cunhã, A) e épocas do ano (B).....	70
<b>Figura 15</b>	Análise de componentes principais para as variáveis relacionadas à produtividade das forrageiras, fixação biológica de nitrogênio, teor e estoque de C e N na planta e no solo de diferentes sistemas de cultivo de cunhã (monocultivo ou consorciado com capim-elefante (A) e épocas do ano (B).....	72

**CAPÍTULO III**

<b>Figura 1</b>	Precipitação e temperatura média durante o período experimental (2021-2023)....	88
<b>Figura 2</b>	Quociente metabólico (qCO <sub>2</sub> ) do solo em diferentes sistemas de cultivos, época do ano nas profundidades de 0-0,10 (A), 0,10-0,20 (B) e 0,20-0,40 m (C).....	96
<b>Figura 3</b>	Quociente microbiano (qMIC) em diferentes sistemas de cultivos na profundidade de 0-0,10 (A), 0,10-0,20 (B) e 0,20-0,40 m (C).....	98
<b>Figura 4</b>	Quociente mineralização (qM) em diferentes sistemas de cultivos na profundidade de 0-0,10 (A), 0,10-0,20 (B) e 0,20-0,40 m (C).....	100
<b>Figura 5</b>	Análise de componentes principais para as variáveis relacionadas à atividade microbiana e matéria orgânica em diferentes sistemas de cultivo com capim-elefante e cunhã (A) e épocas do ano (B).....	102

## LISTA DE TABELAS

Pág.

### CAPÍTULO I

<b>Tabela 1</b>	Estoque de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo em sistemas de consorciados em ambientes tropicais.....	31
-----------------	---	----

### CAPÍTULO II

<b>Tabela 1</b>	Teor e estoque de carbono, nitrogênio e relação C/N de capim-elefante em diferentes sistemas de cultivo e épocas do ano.....	64
<b>Tabela 2</b>	Teor de carbono, nitrogênio e relação C/N de cunhã em diferentes sistemas de cultivo e épocas do ano ociente metabólico (qCO <sub>2</sub> ) do solo em diferentes sistemas de cultivos, época do ano nas profundidades de 0-0,10 (A), 0,10-0,20 (B) e 0,20-0,40 m (C).....	65
<b>Tabela 3</b>	Teor e estoque de C e N do solo em diferentes sistemas de cultivos, época do ano e profundidades.....	68

### CAPÍTULO III

<b>Tabela 1</b>	Características físicas e químicas de diferentes sistemas de cultivo na profundidade 0-40 cm.....	88
<b>Tabela 2</b>	Teores de carbono das frações ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH) e humina (HUM) e a relação ácido húmico/ácido fúlvico (AH/AF) em diferentes sistemas de cultivos e época do ano na profundidade 0-0,10 m.....	92
<b>Tabela 3</b>	Quantificação de glomalina facilmente extraível do solo (GFE), glomalina total (GT) e carbono da glomalina (C-glomalina) em diferentes sistemas de cultivos e época do ano na profundidade 0-0,10 m.....	92
<b>Tabela 4</b>	Respiração basal do solo (RBS), carbono e nitrogênio da biomassa do solo (C-mic e N-mic) em diferentes sistemas de cultivos e profundidades.....	

## SUMÁRIO

	<b>Pag.</b>
1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	16
2.1 Capim-elefante.....	16
2.2 Cunhã.....	20
2.3 Serviços ecossistêmicos prestados pelos sistemas consorciados gramínea e leguminosa.....	23
2.3.1 Produção de forragem.....	24
2.3.2 Fixação biológica de nitrogênio .....	25
2.3.3 Ciclagem de nutrientes .....	28
2.3.4 Armazenamento de carbono e nitrogênio no solo .....	31
REFERÊNCIAS .....	33
A INCLUSÃO DE CUNHÃ EM CAPINEIRA DE CAPIM-ELEFANTE REDUZ A NECESSIDADE DE FERTILIZAÇÃO NITROGENADA EM CLIMA TROPICAL SECO .....	49
RESUMO .....	50
ABSTRACT .....	51
1 INTRODUÇÃO.....	52
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	53
2.1 Descrição do local e estratégia de amostragem.....	53
2.2 Manejo da capineira.....	55
2.3 Avaliação das características agronômicas e químicas .....	55
2.4 Determinação da fixação biológica de nitrogênio da cunhã.....	56
2.5 Análises de solo .....	57
2.6 Análise estatística .....	57
3 RESULTADOS .....	58
3.1 Características agronômicas .....	58
3.2 Estoque e teor de C e N na planta.....	64
3.3 Fixação biológica de N.....	65
3.4 Estoque e teor de C e N no solo .....	66
3.5 Análise de componentes principais .....	68
4 DISCUSSÃO.....	73
5 CONCLUSÃO.....	77

REFERÊNCIAS .....	78
A INCLUSÃO DA CUNHÃ EM CAPINEIRA DE CAPIM-ELEFANTE MODIFICA A QUALIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA E AS CARACTERÍSTICAS MICROBIOLÓGICAS DO SOLO .....	83
RESUMO .....	84
ABSTRACT .....	85
1 INTRODUÇÃO.....	86
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	87
2.1 Descrição do local e estratégia de amostragem.....	87
2.2 Manejo da capineira.....	89
2.3 Análises de solo.....	89
2.4 Análise estatística.....	91
3 RESULTADOS .....	91
3.1 Frações da matéria orgânica do solo.....	91
3.2 Glomalina no solo.....	92
3.3 Atividade e biomassa microbiana.....	93
3.4 Quociente metabólico, microbiano e de mineralização.....	95
3.5 Análise de componentes principais.....	101
4 DISCUSSÃO.....	103
5 CONCLUSÕES.....	106
REFERÊNCIAS .....	107

## **CAPÍTULO 1**

---

### **REVISÃO DE LITERATURA**

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas consorciados de gramíneas e leguminosas fornecem uma série de serviços ecossistêmicos. Alguns destes serviços incluem, produção de forragem, armazenamento de carbono e nitrogênio, ciclagem de nutrientes e aumento da matéria orgânica do solo (REISS; DRINKWATER, 2022; SALES-SILVA *et al.*, 2023a; SILVA *et al.*, 2022a).

O capim-elefante [*Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone syn. *Pennisetum purpureum* Schumach] é uma gramínea de origem africana que possui grande importância para a pecuária brasileira, devido à sua alta produtividade (em torno de 66 t MS ha ano<sup>-1</sup>) e adaptação às condições edafoclimáticas das regiões subtropicais e tropicais (PEREIRA *et al.*, 2017; MONÇÃO *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2023). O capim-elefante apresenta um número considerável de genótipos, que se diferenciam pelo seu porte alto e baixo (CUNHA *et al.*, 2011; 2013; SINGH, 2013; SOUZA *et al.*, 2021).

Os genótipos de porte alto são amplamente cultivados para corte devido à sua alta produtividade de forragem, que está relacionada às características como alongamento do colmo e alta proporção deste componente morfológico na forragem colhida (VIANA *et al.*, 2015). Esses genótipos também possuem maiores percentuais de material senescente (SILVA *et al.*, 2021). Os genótipos de porte baixo apresentam maior relação folha/colmo, colmos menos lignificados e maior valor nutritivo. São cultivados para pastejo ou corte (VIANA *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2023).

No entanto, a produtividade e a perenidade do capim-elefante podem ser comprometidas pela ausência da reposição dos nutrientes do solo (DOURADO *et al.*, 2019). Essa dependência de fertilizantes é um desafio para o setor agrícola nacional, já que 80% dos fertilizantes são importados, tornando esse setor vulnerável às flutuações do mercado internacional. Com base nisso, foi desenvolvido o Plano Nacional de Fertilizantes 2022–2050 (PNL), que visa à redução da exportação de fertilizantes e o desenvolvimento de novas tecnologias (CASTRO; MINGOTI, 2023). A utilização de sistemas consorciados de gramíneas e leguminosas é uma opção, uma vez que a inclusão de leguminosas pode aumentar a entrada de nitrogênio via fixação biológica (ZHAO *et al.*, 2022a).

Um consórcio com bons resultados é do capim-elefante com cunhã (*Clitoria ternatea* L.) sob corte (LE MOS *et al.*, 2021; SALES-SILVA *et al.*, 2023a; SILVA *et al.*, 2023). Essa leguminosa herbácea pode fixar quase 100 kg de N ha ano<sup>-1</sup> via simbiose com *Rhizobium* spp. (TRAILL *et al.*, 2018). A quantidade de nitrogênio fixado varia com a espécie, proporção na composição botânica, manejo, sistema de cultivo, N no solo e outras condições ambientais

(COLLINO *et al.*, 2015; FREITAS *et al.*, 2011; TZANAKAKIS; STURITE; DÖRSCH, 2017; YU *et al.*, 2018). Estudos confirmam que gramíneas consorciadas com leguminosas eram beneficiadas com N oriundo da fixação biológica de nitrogênio (FBN) (VILLEGAS *et al.*, 2020). Também existem indícios que as gramíneas favorecem a FBN; por absorverem o N do solo, essa diminuição no teor de N no solo estimula a FBN (LEDGARD; STEELE, 1992).

Outro aspecto importante é a produtividade da cunhã, que pode chegar a 4,2 t MS ha<sup>-1</sup> em 270 dias (SILVA NETO *et al.*, 2023). A introdução de cunhã em capineiras de capim-elefante pode melhorar o valor nutritivo da forragem *in natura*, como também na forma de silagem (LEMOS *et al.*, 2021; SALES-SILVA *et al.*, 2023a; SILVA *et al.*, 2023). Esse consórcio também tem sido importante para preservação e manutenção de visitantes florais, garantindo a biodiversidade (MOTA, 2022).

Sob corte, o estoque de C e N de sistemas consorciados ocorre principalmente via sistema radicular, já que nesse manejo não ocorre a deposição de serrapilheira. Fornara e Tilman (2008) encontraram maior biomassa de raízes em sistemas consorciados de gramínea e leguminosa do que em monocultivo de gramíneas, que pode ser explicado pela maior entrada de N via FBN e a eficiência das gramíneas em utilizar o N.

Porém, pouco se sabe sobre o impacto desse consórcio sobre os micro-organismos do solo, que são responsáveis diretamente pela ciclagem dos nutrientes, por realizarem a decomposição e a mineralização da matéria orgânica do solo, liberando nutrientes para absorção pelas plantas (JACOBY *et al.*, 2017). Outras funções dos micro-organismos do solo estão relacionadas a nutrição das plantas, por exemplo, solubilizam o fosfato e fixam nitrogênio. Também favorecem o crescimento vegetal, por meio da produção de fitohormônios e atuam no biocontrole, eliminando os patógenos e induzindo a resistência das plantas. Além disso, realizam a biorremediação do solo (BERENDSEN *et al.*, 2012; GAIERO *et al.*, 2013; MARTÍNEZ-VIVEROS *et al.*, 2010; SACCÁ *et al.*, 2017). A atividade e a biomassa microbiana do solo fornecem respostas mais rápidas às mudanças climáticas e do uso do solo. Essas respostas podem ser utilizadas para ajudar a compreender o funcionamento e a sustentabilidade do ecossistema (FENG *et al.*, 2021; ZHAO *et al.*, 2015).

Alguns estudos indicam que a diversidade vegetal encontrada nos consórcios gramínea-leguminosa proporciona benefícios aos micro-organismos do solo, como a maior variabilidade de exsudatos liberados pelas raízes e maior biomassa microbiana (BAATH, 2018; JHARIYA *et al.*, 2018). O consórcio também impulsiona a qualidade da matéria orgânica (SHERROD; VIGIL; STEWART, 2019). Aproximadamente 25% do carbono presente na matéria orgânica no solo são oriundos da glomalina (SINGH; RAI; SINGH, 2016), que é uma proteína do solo

produzida pelos fungos micorrízicos arbusculares (FMA). Existe uma correlação positiva entre a glomalina e a atividade e biomassa microbiana (GISPERT *et al.*, 2013; WANG *et al.*, 2018). Além disso, a glomalina auxilia no sequestro de carbono do solo, devido a sua longa persistência no solo (até 42 anos ou mais) (RILLIG *et al.*, 2001).

A hipótese deste estudo é que os serviços ecossistêmicos de provisão, regulação e suporte, como produção de forragem, fixação biológica de nitrogênio, estoques de C e N, qualidade da matéria orgânica e glomalina do solo, assim como a atividade e biomassa microbiana, podem ser alterados por diferentes sistemas de cultivo (monocultivo com fertilização nitrogenada ou consórcio) de capim-elefante e cunhã, em diferentes épocas do ano (chuvosa e seca). Espera-se que a inclusão da cunhã em capineiras de capim-elefante aumente ou mantenha a produção de forragem, fixação biológica de nitrogênio e os estoques de C e N, qualidade da matéria orgânica, glomalina do solo e a atividade microbiana, em comparação ao monocultivo de capim-elefante.

Com base nisso, objetivou-se avaliar as características agronômicas e microbiológicas, a fixação biológica de nitrogênio, os estoques de C e N, a qualidade da matéria orgânica e a glomalina do solo em sistemas de cultivo de capim-elefante e cunhã, em diferentes épocas do ano.

O Capítulo I consiste numa revisão de literatura sobre o tema da tese. No Capítulo II foram abordadas as características agronômicas, a fixação biológica de nitrogênio e os estoques de C e N do solo. Já no Capítulo III foram investigadas as características microbiológicas, a qualidade da matéria orgânica e a glomalina do solo em diferentes de sistemas de cultivo de capim-elefante e cunhã, em distintas épocas do ano.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Capim-elefante**

O capim-elefante pertence à família Poaceae, subfamília Panicoideae, tribo Paniceae, e ao gênero *Cenchrus*, antigo *Pennisetum* (CHEMISQUY *et al.*, 2010). O gênero *Cenchrus* englobou o gênero *Pennisetum*, com base em caracteres morfológicos e análises moleculares, que indicam uma origem comum (KE *et al.*, 2021).

O capim-elefante possui hábito de crescimento cespitoso, de porte ereto, podendo ultrapassar três metros de altura, apresentando entrenós de 15 a 20 cm e diâmetro de até 2,5 cm. As folhas atingem até 1,25 m de comprimento, tendo no máximo 4,0 cm de largura, lígula curta e ciliada. Os colmos são cilíndricos, lisos e cheios, e nós proeminentes. Raízes rizomatosas. Inflorescências são classificadas como panículas espiciformes (PEREIRA *et al.*,

2010). É uma gramínea de metabolismo C<sub>4</sub>, que apresenta alta eficiência fotossintética (YAN *et al.*, 2021). A produção de biomassa depende das características edafoclimáticas e do genótipo, pode chegar a 55 t MS ha ano<sup>-1</sup> cv. IRI 381 (SOUZA *et al.*, 2021).

O capim-elefante tem origem na África tropical. Em 1905, foi publicada a primeira nota sobre seu valor forrageiro, após um missionário húngaro em Barume ter enviado material vegetativo para Zurich Botanical Gardens, na Suíça (BOONMAN, 1993). Após ser reconhecida como importante forrageira no início do século 20, o Coronel Napier de Bulawayo, Zimbábue, recomendou o capim-elefante como espécie forrageira ao Departamento da Agricultura da Rodésia, atual *Department of Agricultural Research & Extension Services of Zimbabwe*, sendo avaliado com sucesso por volta de 1910. A partir daí, ocorreu a difusão dessa espécie por países do trópico úmido (FREITAS *et al.*, 2010).

A introdução da espécie no continente americano ocorreu primeiramente nos Estados Unidos, em 1913, sendo conhecido como Napier, em homenagem ao coronel Napier, considerado o descobridor do capim-elefante (BURTON, 1944). Na América Central foi introduzido em Cuba em 1917. No Brasil, sua chegada ocorreu entre os anos de 1920 e 1921, pelos estados do Rio Grande do Sul e São Paulo, a partir de mudas oriundas dos Estados Unidos e de Cuba (JAUHAR, 1981; FARIA, 1993).

A partir de 1924, o Ministério da Agricultura realizou um plano de distribuição dos genótipos trazidos do exterior para os demais estados brasileiros, chegando, inicialmente, em Pernambuco, os genótipos Elefante A (Napier) e Elefante B (Merker) (VEIGA *et al.*, 1985). Esses genótipos foram as primeiras a serem avaliadas pela Universidade Federal Rural de Pernambuco e pelo Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA), que possui um banco importante de germoplasma da espécie, com cerca de 800 acessos (COELHO *et al.*, 1966; OTERO, 1952; PEREIRA *et al.*, 2001).

Durante a década de 1990, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) estabeleceu o programa de melhoramento genético do capim-elefante na Região Sudeste do Brasil, buscando o desenvolvimento e seleção de genótipos para uso em capineira e para pastejo. Com essa finalidade, o banco de germoplasma do capim-elefante (BAGCE), contava com mais de 100 acessos introduzidos de diferentes regiões do Brasil e do mundo (PEREIRA *et al.*, 2008).

O capim-elefante apresenta ampla variabilidade genética em relação às características morfológicas, reprodutivas, agronômicas e bromatológicas. Pereira *et al.* (2001) classificaram os genótipos de capim-elefante em cinco grupos por meio de caracteres morfológicos, destacados a seguir:

1. Cameroon: apresenta crescimento ereto, touceiras densas, colmos grossos, grande número de perfilhos basais, folhas largas e florescimento mais tardio. Ex.: Cameroon, Piracicaba, Venezuela, IRI-381 e BRS Capiacu;
2. Napier: caracterizado por touceiras abertas, colmos grossos, folhas alongadas, florescimento intermediário. Ex.: Napier, Mineiro e Taiwan A-146;
3. Merker: possui colmos finos, folhas finas e numerosas, florescimento precoce. Ex.: Merker e Merkeron;
4. Anão: apresenta porte baixo, entrenós curtos, com alta relação folha/colmo. Ex.: Mott e BRS Kurumi;
5. Híbridos: derivados de cruzamentos intraespecíficos (entre cultivares ou variedade) ou interespecíficos (entre espécies), possuem florescimento precoce, morfologia e características químicas intermediárias entre progenitores. Ex.: Mineiro x 23A, Mineiro x 293DA, Hexaploide, Paraíso, HV-241;

Os genótipos de capim-elefante também podem ser classificados pelo porte (Figura 1).

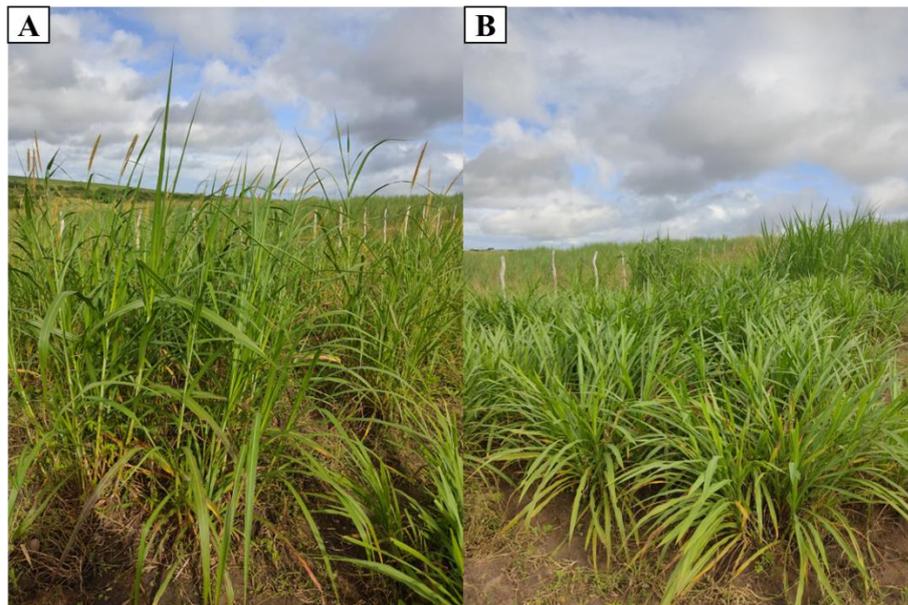


Figura 1. Genótipos de Capim-elefante [*Cenchrus purpureus* (Schum.) Morrone sin. *Pennisetum purpureum* Schum.] (A) de porte alto (cv. Elefante B) e (B) de porte baixo (cv. Mott), Carpina, PE.

Os genótipos de porte alto possuem elevada produtividade. O valor nutritivo da forragem produzida é considerado mediano, pois o caule em alongamento constitui uma fonte de dreno de assimilados e nutrientes para o acúmulo de tecidos de sustentação, o que resulta na diminuição do valor nutritivo da forragem (SOUZA *et al.*, 2021). No nível histológico, os

colmos dos genótipos de porte alto possuem paredes celulares espessas, compostas por vasos lignificados e anéis de esclerênquima responsáveis pela sustentação das plantas (PEIXOTO *et al.*, 2023). Esses fatores explicam a menor digestibilidade *in vitro* da matéria seca no genótipo de porte alto do que no genótipo de porte baixo (SOUZA *et al.*, 2017). Esses genótipos são recomendados para a formação de capineira.

O Elefante B, também conhecido como Merker, pertence aos genótipos de porte alto. Foi um dos primeiros genótipos introduzido no Brasil, com mudas provenientes de Cuba, e apresentou elevado número de perfilhos basilares e axilares em testes preliminares realizados pelo IPA (CAVALCANTE *et al.*, 2013).

Os genótipos de porte baixo possuem entrenós mais curtos, o que lhes confere menor altura quando comparado aos de porte alto. Apesar de produzir menor quantidade de forragem, produz forragem de maior valor nutritivo, em função da maior relação folha/colmo, visto que as folhas apresentam melhor valor nutritivo em relação aos colmos (CHAVES *et al.*, 2016; SOUZA, 2019; SILVA *et al.*, 2021). No nível histológico, os genótipos de porte baixo possuem feixes vasculares nas folhas de menor tamanho, menor área ocupada por células lignificadas no mesófilo e maior distância entre a epiderme e os feixes vasculares, sendo assim, maior região parenquimática (PEIXOTO *et al.*, 2023). Esses fatores podem favorecer a maior digestibilidade *in vitro* nestes genótipos.

Os genótipos de capim-elefante podem ser utilizados para pastejo ou capineira (SILVA *et al.*, 2021; SILVA *et al.*, 2023; VIANA *et al.*, 2018). Também podem ser usados para a produção de bioenergia, em especial, os genótipos de porte alto, por combinarem elevada produção com altos teores de componentes fibrosos, como a celulose e a lignina, importantes nos processos de geração de energia (SINGH, 2013). De maneira geral, os diferentes genótipos de capim-elefante, além de serem utilizados *in natura*, também podem ser consumidos na forma de forragem conservada, como feno ou silagem (GIMENES *et al.*, 2016; LEMOS *et al.*, 2021).

O Mott pertence aos genótipos de porte baixo e foi selecionado em 1977, na Geórgia – EUA, denominado capim-elefante anão “Tift N 75” (HANNA; MONSON, 1988), advindo de uma progênie autofecundada do Merkeron (RIBEIRO *et al.*, 1999). Para homenagear as pesquisas iniciais desenvolvidas pelo Prof<sup>o</sup>. Gerald O. Mott com o “Tift N 75”, denominaram este material de capim-elefante anão Mott, sendo esta considerada uma forragem de alta qualidade selecionada na Flórida (SOLLENBERGER, 1989) e introduzida no Brasil na década de 1980 (ALMEIDA *et al.*, 2000). Este genótipo é destinado ao pastejo por apresentar

menor elevação de seu caule e maior proporção de folhas ao longo do seu desenvolvimento (CRESTANI *et al.*, 2013), podendo atingir uma altura de até 1,8 m (ARAÚJO *et al.*, 2011).

Em relação ao manejo de colheita do capim-elefante, recomenda-se a intensidade 0-5 cm do solo (CÓSER *et al.*, 2000). Alguns estudos relataram que para cada centímetro de elevação nas alturas dos cortes houve redução de 22,8 kg ha<sup>-1</sup> na produção de matéria seca (SANTOS *et al.*, 2001a). Além disso, colheitas menos intensas resultaram em plantas mais altas, não favorecendo, assim, o desenvolvimento de gemas basais (SANTOS *et al.*, 2001b).

O capim-elefante é considerado uma planta exigente em fertilidade, devido ao seu elevado potencial de produção (FLORES *et al.*, 2012), respondendo muito à adubação nitrogenada. Martuscello *et al.* (2016) mostraram que houve aumento linear na produção de forragem e no teor de proteína bruta com dose de N até 150 kg ha ano<sup>-1</sup>. Esse resultado positivo da adubação nitrogenada é atribuído ao aumento da capacidade fotossintética da planta, e consequentemente aumenta o rendimento, teor de proteína bruta e digestibilidade (GELAYENEW *et al.*, 2019; TAIZ *et al.*, 2014). Além do mais, os solos são frequentemente deficientes de N, limitando o crescimento vegetal (FLORES *et al.*, 2013).

A espécie é propagada vegetativamente, seu estabelecimento e crescimento ocorre de forma rápida (NYAMBATI *et al.*, 2010). No entanto, esse tipo de propagação contribui para o aumento do custo de transporte e plantio da forrageira, bem como impossibilita o armazenamento das estacas por longo período (PEREIRA *et al.*, 2003).

Em relação à doença do capim-elefante, a helmintosporiose (*Helminthosporium* spp.) é uma das principais doenças foliareas (SANTOS; NEIVA, 2022). Os períodos chuvosos do ano tornam o capim-elefante mais susceptível à mancha ocular, causada pelo fungo *Helminthosporium sacchari* E.J. Butler e a ataques da cigarrinha das pastagens (*Zuila entreriana*) na fase de pupa (SILVA *et al.*, 2016). Estudo feito por Oliveira *et al.* (2011) concluíram que os genótipos Pusa Napier 1 P 31 e Roxo de Botucatu P 80 são genótipos que apresentam ampla adaptabilidade, com resistência ao *Helminthosporium* sp. na Zona da Mata de Pernambuco.

## 2.2 Cunhã

A *Clitoria ternatea* L., conhecida popularmente por cunhã, é uma espécie pertencente à família Fabaceae, subfamília Faboideae, tribo Phaseoleae, subtribo Clitoriinae (ABREU *et al.*, 2014; OGUIS *et al.*, 2019). A sua origem ainda é discutível. Há relatos que ocorreu na ilha Ternate, arquipélago na Indonésia (GUPTA; CHAHAL; BHATIA, 2010). Outros relatos

indicam que essa espécie é originária da Ásia, da América do Sul ou Central (GOMEZ; KALAMANI, 2003; AVALOS *et al.*, 2004; BARRO; RIBEIRO, 1983; COOK *et al.*, 2020).

É uma leguminosa tropical, perene, herbácea, bastante vigorosa e persistente (Figura 2; HANSON; ELLIS, 2020). Possui crescimento rasteiro e hábito volúvel (COOK *et al.*, 2020). A altura varia de 60 a 70 cm (BARRO; RIBEIRO, 1983). As folhas são pinadas, com cinco ou sete folíolos e pecíolos de 1,5 a 3 cm de comprimento (TAUR *et al.*, 2010) e as raízes são profundas (40 cm). As flores são axiliares, simples ou emparelhadas, com 42 mm de comprimento, 32 mm de largura, zigomorfas e bissexuais (ALURI; KUNUKU, 2021), com cor variando de azul a branca (MORRIS, 2009).



Figura 2. Cunhã (*Clitoria ternatea* L.) e a variação na coloração das flores, Carpina, PE.

A cunhã é uma planta autopolinizada (CHEN *et al.*, 2018; COOK *et al.*, 2020). Ela é principalmente polinizada por abelhas, borboletas e mariposas (MOTA, 2022). Produz cerca

de 8 a 11 sementes por vagem, sendo estas alongadas, pouco achatadas, com comprimento de 4,5 a 7,0 mm e de 3 a 4 mm de largura, cor marrom-escura a quase preto brilhante (ALI *et al.*, 2013). As sementes apresentam dormência, sendo necessária a escarificação mecânica ou química para acelerar sua germinação (DIAS, 1996; PATEL *et al.*, 2016). Essa leguminosa se desenvolve bem em uma grande variedade de solos, mas adapta-se melhor na faixa de pH de 6,5 a 8,0 (COOK *et al.*, 2020) Não suporta encharcamento do solo prolongado (BARRO; RIBEIRO, 1983; COOK *et al.*, 2020). Além de possuir tolerância à seca, adapta-se a regiões onde a precipitação é de apenas 380 mm/ano (BARROS; ROSSETTI; CARVALHO, 2004).

A cunhã apresenta alto potencial para produção de forragem (329 a 4.900 kg MS ha<sup>-1</sup>) e bom valor nutritivo (162 a 245 g de MS kg<sup>-1</sup> de proteína bruta; 520 a 670 g de MS kg<sup>-1</sup> de fibra em detergente neutro; 362 a 487 g de MS kg<sup>-1</sup> de fibra em detergente ácido; 657 g de MS kg<sup>-1</sup> de digestibilidade *in vitro* da matéria seca) (MAHALA *et al.*, 2012; MAHFOUZ *et al.*, 2020; LEMOS *et al.*, 2021; SALES-SILVA *et al.*, 2023ab). É uma boa alternativa para produção de forragem no Nordeste do Brasil, devido à sua adaptabilidade e resistência em condições tropicais, e ao seu potencial de rebrota logo após o início da estação chuvosa (ABREU *et al.*, 2014; ZAKARIA *et al.*, 2018). É possível realizar até oito cortes por ano, com intervalos de 45 dias, devido a sua alta taxa de rebrota (HUTASOIT *et al.*, 2017).

A cunhã tem sido utilizada para produção de feno e silagem (BARROS; ROSSETTI; CARVALHO, 2004), banco de proteína (SANTOS, 2023), cobertura de solo (MISTURA *et al.*, 2010), forragem fresca no cocho (GOMEZ; KALAMANI, 2003), ornamentação e na produção de componentes bioativos de valor medicinal (ALURI; KUNUKU, 2021; GUPTA; CHAHAL; BHATIA, 2010; OGUIS *et al.*, 2019). Além disso, pode ser cultivada em consócio com gramíneas (Figura 3) para utilização na alimentação animal (LEMOS *et al.*, 2021; SALES-SILVA *et al.*, 2023a). Souza *et al.* (2017) obtiveram altas taxas de sobrevivência da cunhã (*Clitoria ternatea* L.) consorciada com o capim-buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) em pastagem cultivada no Semiárido Brasileiro, com valores que variaram de 37,8 a 76,9%. É indicada para utilização sob corte, pois quando pastejada com alta frequência apresenta redução do estande de plantas e tende a desaparecer.

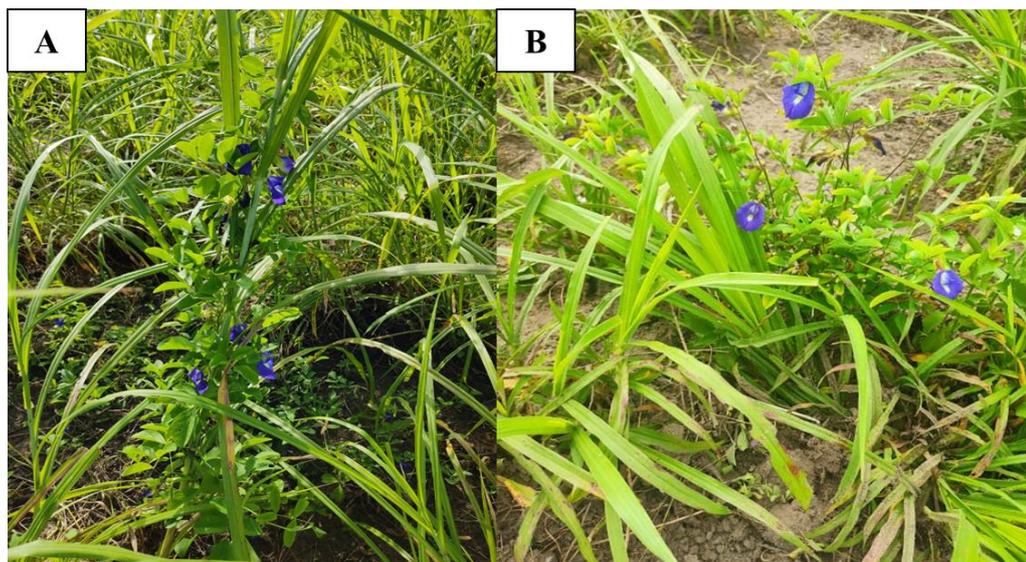


Figura 3. Cunhã consorciada com genótipos de Capim-elefante (A) de porte alto (cv. Elefante B) e (B) de porte baixo (cv. Mott), Carpina, PE.

Além da sua importância como forrageira, a cunhã se associa a bactérias diazotróficas que fixam o N atmosférico, adicionando N ao solo (MISTURA *et al.*, 2011). Estudos indicam que a cunhã é nodulada por bactérias do gênero *Rhizobium* e *Bradyrhizobium* e hospeda bactérias endofíticas não nodulíferas, *Bacillus* e *Leifsonia* (DUANGKHET *et al.*, 2018; NUNES *et al.*, 2018). Oliveira *et al.* (1996) observaram que em quatro ciclos de 56 dias houve 82% e 86% de N fixado planta<sup>-1</sup>, no monocultivo e consórcio com o capim-de-rhodes (*Chloris gayana* Kunth.), respectivamente. Al-Fredan (2011) encontrou 50% de N fixado planta<sup>-1</sup> na cunhã. Hosang *et al.* (2016) relataram que a cunhã pode fornecer um acúmulo de mais de 168 kg de N ha<sup>-1</sup> na biomassa acima do solo na forma de serrapilheira.

### 2.3 Serviços ecossistêmicos prestados pelos sistemas consorciados gramínea e leguminosa

Os serviços ecossistêmicos são benefícios providos pelos ecossistemas ao ser humano, o que inclui produtos, recursos e fatores ambientais necessários para sobrevivência e bem-estar (ZHAO *et al.*, 2020), podendo ser divididos em quatro categorias: serviços de provisão, regulação, suporte e cultural. No caso dos sistemas consorciados de gramíneas e leguminosas, os serviços de provisão incluem, entre outros, a produção animal, de fibra, madeira e produtos medicinais. Os serviços de regulação incluem a regulação climática (e.g. sequestro de carbono), controle de erosões, controle de plantas daninhas, qualidade da água e habitat para polinizadores e animais selvagens. Os principais serviços de suporte podem ser enumerados como fonte de produção primária, ciclagem de nutrientes, fixação biológica de nitrogênio e

captação de água. Já os serviços culturais envolvem áreas destinadas a fins educacionais, religiosos e ecoturismo (ZHAO *et al.*, 2020; DUBEUX JUNIOR *et al.*, 2022).

A seguir serão abordados detalhadamente alguns dos serviços de provisão (produção de forragem), suporte (fixação biológica de nitrogênio e ciclagem de nutrientes) e de regulação (armazenamento de carbono e nitrogênio no solo) em sistemas consorciados de gramínea e leguminosa.

### 2.3.1 Produção de forragem

A produção de forragem de sistemas consorciados de gramíneas e leguminosas é influenciada pela fertilização nitrogenada do capim, pela compatibilidade das espécies, pelo manejo do pastejo ou corte e por outros fatores. Apesar desses diferentes fatores que influenciam, muitos estudos têm relatado sucesso no consórcio de gramíneas e leguminosas.

Vieira *et al.* (2019) observaram no consórcio de capim-elefante cv. Merkeron Pinda (*Cenchrus purpureus* Schum.) e amendoim forrageiro cv. Amarillo (*Arachis pintoi* Krap. & Greg.) aumento de 1,8 para 2,4 t MS ha<sup>-1</sup> na massa de forragem, durante um período experimental de 11 meses sob pastejo. Isso se deve ao aporte de N pela inclusão da leguminosa que contribuiu positivamente para essa resposta produtiva.

Iqbal *et al.* (2019) avaliaram a produção de matéria seca do Sorgo (*Sorghum bicolor* L.) consorciado com feijão-guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp), Lab-Lab [*Lablab purpureus* (L.) Sweet] e feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.). Os autores reportaram incrementos de 18 a 52% na biomassa colhida.

Silva *et al.* (2023) estudaram genótipos de capim-elefante de diferentes portes consorciados ou não com a cunhã sob corte, durante um período experimental de 19 meses e encontraram maior estabilidade no acúmulo de forragem no consórcio do que no monocultivo.

Pereira *et al.* (2020) verificaram que o consórcio de capim-marandu [*Urochloa brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) R. Webster] e amendoim forrageiro sob pastejo aumentou a massa de forragem em 17%, quando comparado ao monocultivo. Nesse estudo, a proporção de leguminosas se encontrava em torno de 22%.

Esse incremento na produção de forragem se deve ao fato de as gramíneas serem beneficiadas quando consorciadas com leguminosas. Villegas *et al.* (2020) estudaram gramíneas consorciadas ou não com leguminosas sob pastejo. Esses autores comprovaram que as gramíneas quando consorciadas eram capazes de captar nitrogênio a partir de leguminosas, que obtinham via fixação biológica de nitrogênio. A transferência de nitrogênio pode ocorrer

através da senescência e decomposição de raízes e nódulos, exsudatos radiculares e micorrizas (THILAKARATHNA *et al.*, 2016).

A produção de forragem do consórcio também pode se assemelhar ao monocultivo, conforme observado por Jaramillo *et al.* (2018). Esses autores notaram que o acúmulo de forragem de capim-Tifton 85 (*Cynodon dactylon* L.) e amendoim forrageiro foi semelhante ao monocultivo da gramínea, em torno de 2.900 kg MS ha<sup>-1</sup>. Além do incremento na produção de forragem, o consórcio com leguminosas aumentou os teores de N ou proteína bruta (IQBAL *et al.*, 2019), carboidratos não-fibrosos (LEE, 2018), digestibilidade da matéria seca (MEDEIROS *et al.*, 2022), e reduz os teores de fibra e lignina em gramíneas consorciadas (SALES-SILVA *et al.*, 2023a). Esses resultados são observados em leguminosas herbáceas, arbustivas e arbóreas. A alteração na composição químico-bromatológica é atribuída à transferência de N pela serrapilheira e ao decaimento de raízes e nódulos no solo (TONTINI *et al.*, 2021).

Outro aspecto que influencia a produção de forragem é a compatibilidade entre espécies, que é a capacidade de duas espécies formarem um sistema harmônico e estável (ANDRADE *et al.*, 2012). Em condições tropicais, um dossel é considerado harmônico quando as leguminosas participam entre 20% e 45% da massa de forragem; esses valores são importantes para garantir a sobrevivência da leguminosa a longo prazo (THOMAS, 1992, 1995). Vários fatores são determinantes para a compatibilidade entre gramíneas e leguminosas, como: mecanismos de propagação, mecanismos de fuga, tolerância a desfolha e o manejo do pastejo ou corte (BLACK; LAIDLAW; O'KIELY, 2009).

Uma boa compatibilidade tem sido encontrada entre as gramíneas que apresentam hábito de crescimento ereto e as leguminosas trepadeiras (MARTÍNEZ-MAMIAN *et al.*, 2020), o que pode acontecer quando se consorcia capim-elefante e cunhã (SALES-SILVA *et al.*, 2023a; SILVA *et al.*, 2023). É importante considerar o hábito de crescimento das leguminosas. No caso das leguminosas arbóreas, a gramínea deve ser tolerante ao sombreamento para que não ocorra redução na produção de forragem. Lima *et al.* (2020) comprovaram que acúmulo de forragem sob pastejo foi maior para capim-braquiária a pleno sol do que sob sombra (54 vs. 27 kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>) das leguminosas arbóreas gliricídia [*Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp] e sabiá (*Mimosa caesalpinifolia* Benth).

### 2.3.2 Fixação biológica de nitrogênio

A fixação biológica de nitrogênio (FBN) é uma das razões mais importantes para integrar leguminosas forrageiras nos sistemas pecuários. A quantidade de FBN varia com a

espécie, proporção na composição botânica, manejo, teor de nitrogênio do solo e outras condições ambientais (temperatura, acidez, alcalinidade ou salinidade do solo, deficiências ou toxidez de outro nutriente, déficit ou excesso hídrico) que afetam o potencial de crescimento das espécies de leguminosas alvo (BARCELOS *et al.*, 2022; COSTA *et al.*, 2021; DEAK *et al.*, 2019; DEAK *et al.*, 2020; DOVRAT; SHEFFER, 2019; ELLI *et al.*, 2022; MUONI *et al.*, 2022; REIMER *et al.*, 2020; ROMANYÀ; CASALS, 2020; ZHAO *et al.*, 2022b).

A FBN é realizada pelo micro-organismos diazotróficos, que possuem um complexo enzimático conhecido como nitrogenase, e por isso conseguem converter N atmosférico (N<sub>2</sub>) em formas utilizáveis (NH<sub>3</sub>); primeiro por eles, e depois pelas plantas (amônio ou nitrato). Os compostos mais comuns formados por diazotróficos após a quebra do N<sub>2</sub> incluem: amônia, amônio, nitrato, nitrito, aminoácidos e bases nitrogenadas (HAYASHI, 2022; LADHA *et al.*, 2022; SANTOS, 2023; SOUMARE *et al.*, 2020;). Estes micro-organismos, predominantemente bactérias (MAHMUD *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2021), ocorrem tanto em vida livre quanto em associação com plantas (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006), sendo a mais conhecida e eficiente a simbiose entre os gêneros *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium*, *Sinorhizobium* e *Azorhizobium*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Gluconacetobacter Diazotrophicus* e leguminosas (BEKELE; YILMA, 2021; GUIMARÃES *et al.*, 2022; RODRÍGUEZ-NAVARRO *et al.*, 2022).

O uso de leguminosas pode reduzir o uso de fertilizantes nitrogenados nos sistemas consorciados, por ser capaz de inserir no sistema de 50 a 280 kg de N ha ano<sup>-1</sup> pela FBN, em clima tropical e temperado (DUBEUX JUNIOR *et al.*, 2017a; JARAMILLO *et al.*, 2021). A redução do uso de fertilizantes nitrogenados também reduz o risco de lixiviação de nitrogênio e contaminação dos lençóis freáticos (ANGLADE *et al.*, 2015). A proporção da leguminosa no sistema é muito importante, principalmente para evitar seu desaparecimento. Estimativas indicam que leguminosas, participando em 25% da composição botânica, fixam em torno de 60 kg N ha ano<sup>-1</sup>, proporcionando capacidade de suporte de animais equivalente à adubação anual com 100 kg de N ha ano<sup>-1</sup> (LIRA *et al.*, 2006; DUBEUX JUNIOR *et al.*, 2017a; JARAMILLO *et al.*, 2021).

A quantidade de FBN também varia de acordo com a espécie de leguminosa. O amendoim forrageiro pode fixar em torno de 123 a 280 kg de N ha ano<sup>-1</sup> (DUBEUX JUNIOR *et al.*, 2017b). Já os genótipos de *Desmanthus* spp. são capazes de adicionar no solo 62 a 93 kg de N ha ano<sup>-1</sup> (DINIZ, 2016). A cunhã é capaz de incorporar até 100 kg de N ha ano<sup>-1</sup> (TRAILL *et al.*, 2018). Freitas *et al.* (2011) encontraram valores de N derivado da atmosfera

em torno de 50, 79 e 61% para *Desmanthus pernambucanus*, *Macroptilium martii* e *Macroptilium lathyroides*, respectivamente.

Essa variação também depende da gramínea utilizada no consórcio. Por exemplo, Alfafa (*Medicago sativa* L.) fixa 109 kg N ha<sup>-1</sup> em monocultivo, 116 kg N ha<sup>-1</sup> em consórcio com *Elymus nutans* Griseb. ou 53 kg N ha<sup>-1</sup> em consórcio com *Agropyron cristatum* (L.) Gaertn. (YU *et al.*, 2018).

Bourscheidt *et al.* (2023) avaliaram durante um período experimental de 14 meses um sistema consorciado de braquiária BRS RB331 Ipyporã com amendoim forrageiro inoculado com *Azospirillum brasilense* sob corte. Esses autores observaram que esse sistema forneceu o equivalente a 58 kg N ha<sup>-1</sup>.

O sistema de cultivo influencia a FBN. As leguminosas em monocultivo podem fixar mais N do que quando consorciadas. Numa revisão feita por Sollenberger e Dubeux Junior (2022) é relatado que o amendoim forrageiro adiciona ao solo em torno de 200 kg N ha ano<sup>-1</sup> em monocultivo (DUBEUX JUNIOR *et al.*, 2017a). Porém, em cenário de consórcio, a leguminosa, em uma proporção de 30%, estes números diminuiriam para 60 kg N ha ano<sup>-1</sup>. Esse cenário não leva em consideração as interações entre espécies. Em contrapartida, estudo relata o efeito positivo do consórcio na FBN. A presença da gramínea aumenta a absorção de N, o que diminui o teor de N do solo. Consequentemente, gera um feedback positivo que estimula a FBN (LEDGARD; STEELE, 1992).

A FBN também é influenciada pela fertilização nitrogenada, pois acredita-se que esta, em curto prazo, pode resultar em um aumento na abundância de diazotróficos de crescimento rápido (FIERER; BRADFORD; JACKSON, 2007), uma vez que essas comunidades microbianas podem usar recursos dos fertilizantes para apoiar seu próprio crescimento vegetativo, em vez de fixar nitrogênio (POSTGATE, 1974), que é conhecido por ser um processo energeticamente caro (MANCINELLI; MCKAY, 1988). No entanto, a fertilização nitrogenada a longo prazo pode reduzir a FBN. Isso foi encontrado por Fan, Yuan e Liu (2019), que avaliaram um sistema de rotação de cultura de trigo e soja, e notaram que a FBN foi drasticamente reduzida (50%) após quase quatro décadas de fertilização nitrogenada.

E por fim, a FBN também é modificada pela época seca onde ocorre estresse hídrico, que reduz a sobrevivência dos rizóbios no solo (ZILLI *et al.*, 2013) e o estabelecimento da simbiose, levando à redução do número, massa e metabolismo dos nódulos, além da redução da atividade da nitrogenase (CHRISTOPHE *et al.*, 2011; PRUDENT *et al.*, 2016). O estresse hídrico pode prejudicar esta importante etapa inicial da simbiose, na qual ocorre a troca de

sinais moleculares entre a planta hospedeira e os rizóbios, e essa troca de sinais depende da difusão de tais moléculas na solução do solo (FREITAS *et al.*, 2022).

### 2.3.3 Ciclagem de nutrientes

Bactérias e fungos constituem mais de 90% da biomassa microbiana do solo, a qual representa cerca de 1,2%, 2,6 e 8,0% do C, N e P total do solo. Estima-se que o armazenamento global de C e N na biomassa microbiana é em torno de 16,7 Pg C e 2,6 Pg N na camada de 0 a 30 cm, e 23,2 Pg C e 3,7 Pg N na camada de 0 a 100 cm (XU; THORNTON; POST, 2013). A biomassa microbiana é a porção ativa na condução da decomposição e mineralização da matéria orgânica do solo (MOS). Assim, dada a sua alta sensibilidade as mudanças do solo, é utilizada como um indicador da qualidade do solo (DRENOVSKY *et al.*, 2010; SHAO *et al.*, 2015; SARITO *et al.*, 2020).

A diversidade das plantas encontrada nos sistemas consorciados influencia a biomassa microbiana do solo. A deposição de serrapilheira acima do solo e a mortalidade de raízes finas abaixo dele fornece uma maior quantidade de recursos de carbono e nutrientes que são disponibilizados para os micro-organismos do solo (LANGE *et al.*, 2015; KHLIFA *et al.*, 2017; MA; CHEN, 2018).

Estudos relatam que a biomassa radicular tende a contribuir significativamente mais para o aumento da MOS do que a serrapilheira da biomassa aérea (RASSE *et al.*, 2005; GHAFOR *et al.*, 2017; JACKSON *et al.*, 2017), posto que as raízes podem representar até 70% da biomassa total das plantas (POORTER *et al.*, 2012). No entanto, sua contribuição se dá principalmente na camada superficial do solo, mas também pode contribuir em camadas mais profundas (RASSE *et al.*, 2005; RUMPEL; KÖGEL-KNABNER, 2011; MAEGHT *et al.*, 2013).

As raízes protegem fisicamente a MOS, por auxiliar na formação de agregados, tornando o C do solo menos acessível à decomposição microbiana, estabilizando-o. Do ponto de vista químico, a serrapilheira oriunda das raízes é mais recalcitrante do que a de folhas (XIA *et al.*, 2015).

Ainda sobre a importância do sistema radicular, as raízes liberam exsudados que podem ser compostos de baixo peso molecular (por exemplo, aminoácidos, ácidos orgânicos, açúcares, fenólicos e vários outros metabólitos secundários) ou compostos de alto peso molecular (por exemplo, proteínas). Os exsudatos são os principais precursores da formação da MOS, uma vez que os micro-organismos do solo utilizam os exsudados de forma eficiente, convertendo-os em produtos secundários (BRADFORD *et al.*, 2013; COTRUFO *et al.*, 2013;

LEHMANN; KLEBER, 2015). Esses exsudatos podem ser ácidos orgânicos, que também podem atuar quebrando ligações de compostos presentes na MOS e, assim, expondo esses compostos à decomposição microbiana (KEILUWEIT *et al.*, 2015).

A mistura de espécies de grupos funcionais diferentes leva à liberação de exsudatos radiculares diferentes, que aumentam a biomassa microbiana, além de melhorar a eficiência metabólica microbiana e diminuir o quociente metabólico (EISENHAUER *et al.*, 2013). A diversidade vegetal também pode aumentar a proporção fungos:bactérias do solo (CHAPARRO *et al.*, 2012; CROWTHER *et al.*, 2019; REINHOLD-HUREK *et al.*, 2015). É reconhecido que essa diversidade aumenta a abundância de fungos, e não a abundância de bactérias (CHUNG *et al.*, 2007).

Laroca *et al.* (2018) comprovaram que a inclusão de leguminosas em sistema consorciado contribui para o aumento da biomassa microbiana e MOS, ocorrendo aumento do C e N presente na biomassa microbiana (188 e 97%), em comparação ao monocultivo. O consórcio também proporcionou valores menores de quociente metabólico ( $qCO_2$ ) e maiores de quociente microbiano ( $qMIC$ ), evidenciando que a biomassa microbiana não estava estressada e que utilizava de forma eficiente o C orgânico, ou seja, incorporando-o ao seu próprio metabolismo.

Como mencionado anteriormente, os sistemas consorciados possibilitam um aumento na produtividade. Esse aumento pode levar a maior quantidade de serrapilheira depositada no solo que serão decompostos pelos micro-organismos, resultando em aumento da atividade e biomassa microbiana do solo (CHEN *et al.*, 2019).

Essas alterações ocorrem devido à inclusão da leguminosa modificar a composição da serrapilheira adicionada ao solo, principalmente no que diz respeito a relação C/N. Quando esta é superior a 30/1, ocorre uma tendência de imobilização de nutrientes, enquanto abaixo desse valor, a mineralização e disponibilidade são favorecidas (SANTOS, 2023; DUBEUX JUNIOR *et al.*, 2007). Em monocultivo de gramíneas ( $C_4$ ), a relação C/N no material depositado é alta (28:1), sendo mais difícil de ser decomposto. Já a das leguminosas é em torno de 12:1 (WATTHIER *et al.*, 2020). A presença de moléculas recalcitrantes como lignina, celulose e hemicelulose, aliadas a elevadas relações C/N, contribuem significativamente para imobilização de N no solo (SOLLENBERGER *et al.*, 2019).

A maior relação C/N encontrada no consórcio de gramíneas e leguminosas também melhora a qualidade e estabilidade da MOS, no que diz respeito aos ácidos fúlvicos e ácidos húmicos e huminas. Sendo assim, os sistemas consorciados de gramíneas e leguminosas são uma opção para aumentar a MOS (CORDEIRO *et al.*, 2022). O maior armazenamento de C

nas frações mais recalcitrantes da MOS, como as substâncias húmicas, contribui para o aumento do tempo médio de C no solo (STEVENSON, 1994), o que pode resultar em maior armazenamento do elemento no ecossistema (PEGORARO *et al.*, 2011) e retardar a emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

Yang *et al.* (2021) resumiram a contribuição dos ácidos húmicos no aumento da capacidade de troca catiônica: (1) aumento da adsorção de cátions trocáveis, fornecendo grande área superficial para colóides inorgânicos; (2) dissociação dos grupos COOH e OH para produzir extremidades polares que formam complexos com cátions; e (3) aumenta a dissolução dos minerais do solo, que criam uma grande área superficial para reações químicas.

A mineralização da serrapilheira também dependerá da quantidade e composição química. Sua qualidade é influenciada pela composição botânica do pasto, estágio de desenvolvimento da planta, fertilidade do solo e uso de adubos (DUBEUX JUNIOR *et al.*, 2007). O ciclo de vida dessas plantas também influencia a biomassa microbiana. Estudo realizado por Moraes *et al.* (2019) mostrou que o sistema consorciado apenas com culturas perenes promove aumento da biomassa microbiana seguida pelo consórcio de perenes-anuais e anuais. Esse resultado foi atribuído ao aumento da MOS e maior estabilidade dos agregados no sistema consorciado com culturas perenes.

A maior agregação também está associada à presença de glomalina, uma glicoproteína estável produzida pelos fungos micorrízicos arbusculares. Por ser resistente à decomposição microbiana, perdurando por longos períodos (42 anos ou mais) (RILLIG *et al.*, 2001; GUNINA *et al.*, 2015), atua como um biofilme pegajoso e insolúvel que une minerais, argilas, matéria orgânica e microrganismos (RILLIG *et al.*, 2002, XU *et al.*, 2014; IRVING *et al.*, 2021). Estudos revelam correlação positiva entre a glomalina e a atividade e biomassa microbiana em vários ambientes de solo (GISPERT *et al.*, 2013; WANG *et al.*, 2018).

Vale ressaltar que as respostas da atividade e biomassa microbiana nos sistemas de cultivos tornam-se progressivamente mais fortes ao longo do tempo (REICH *et al.*, 2012; MA; CHEN, 2016). Eisenhauer *et al.* (2010) e Strecker *et al.* (2016) avaliaram as respostas dos micro-organismos do solo em sistemas consorciados de longo prazo e não encontraram resultados significativos, apesar dos vários anos de implantação dos sistemas. Esse atraso na resposta dos micro-organismos às mudanças nas comunidades vegetais se deve ao acúmulo de serrapilheira necessária para tal resposta (BARTELT-RYSER *et al.*, 2005; EISENHAUER *et al.*, 2010). A época do ano também influencia as respostas microbianas; Camelo *et al.* (2021)

observaram que no consórcio de palma forrageira e leguminosas arbóreas durante a época chuvosa ocorreu maior biomassa microbiana e quociente microbiano do solo.

#### 2.3.4 Armazenamento de carbono e nitrogênio no solo

O carbono orgânico total (C) e o nitrogênio total (N) do solo são indicadores “chave” nos ecossistemas, pois fornecem informações sobre a ciclagem de nutrientes (LAL, 2016; BÜNEMANN *et al.*, 2018; WIESMEIER *et al.*, 2019). Além disso, os teores de COT permitem inferir sobre o potencial do solo em mitigar a emissão de gases de efeito estufa (FRANZLUEBBERS, 2014).

A quantidade de COT e NT armazenado depende da qualidade e quantidade do material vegetal depositado (fonte), textura do solo, práticas de manejo e das condições climáticas (SIMPSON *et al.*, 2004; DENEFF *et al.*, 2007; LICHTER *et al.*, 2008; Tabela 1).

Tabela 1. Estoque de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo em sistemas de consorciados em ambientes tropicais.

Espécies vegetais	Profundidade	Condições climáticas	Manejo	C	N	Autores
	m	mm e °C		Mg ha <sup>-1</sup>		
<i>Brachiaria humidicola</i> + <i>Desmodium ovalifolium</i>	0-1,00	1.300 e 29,0	Pastejo	97	7	Tarré <i>et al.</i> (2001)
<i>Brachiaria brizantha</i> + <i>Cajanus cajan</i>	0-1,00	-	Pastejo	~150	~8	Sant-Anna <i>et al.</i> (2017)
<i>Cynodon dactylon</i> + <i>Arachis glabrata</i>	0-0,40	1.270 e 22,0	Pastejo	46	3	Silva <i>et al.</i> (2022b)
<i>Leymus chinensis</i> + <i>Medicago sativa</i>	0-0,40	410 e 4,9	Corte	~50	~6	Li <i>et al.</i> (2016)
<i>Panicum maximum</i> + <i>Vigna unguiculata</i>	0-0,80	906 e 30,0	Corte	81	-	Rai <i>et al.</i> (2023)

Os sistemas consorciados propiciam o maior acúmulo de COT e NT através do aumento da produção de biomassa vegetal acima e abaixo do solo (STEINBEISS *et al.*, 2008; BRISKE *et al.*, 2011; HOYLE *et al.*, 2013; CONG *et al.*, 2014; LANGE *et al.*, 2015). No entanto, em sistemas manejados sob corte pouca quantidade de serrapilheira é depositada acima do solo, o que reduz a ciclagem de nutrientes. Nesses sistemas, as raízes contribuem para o acúmulo de COT e NT (LIU *et al.*, 2011; DUBEUX JUNIOR; SOLLENBERGER, 2020). As raízes de gramíneas tropicais representam em média 53 a 76% de sua biomassa total (KANNO *et al.*, 1999).

A diversidade arquitetônica das raízes permite explorar diferentes camadas, alterando a deposição espacial e temporal das entradas de COT e NT (CONG *et al.*, 2014; DUPONT *et al.*, 2014; LANGE *et al.*, 2015). Existe correlação positiva entre o crescimento radicular e o acúmulo de COT no solo (ROSOLEM; LI; GARCIA, 2016). Isso ocorre devido ao seu maior teor de celulose (BAI *et al.*, 2020) e também por promoverem maior proteção física do C em microagregados, particularmente em sistemas com maior aporte de N (KONG; SIX, 2010).

A inclusão de leguminosas nos sistemas aumenta o aporte de N no solo via FBN. A alta qualidade da serrapilheira de leguminosas aumenta a ciclagem do N no sistema (LEMAIRE *et al.*, 2011), através de aumentos nas taxas de deposição e decomposição. Dubeux Junior *et al.* (2007) observaram que o tempo de decomposição de gramíneas tropicais eram, em média, de 174 dias; já as leguminosas, de 67 dias.

Acreditou-se por muitos anos que a maior taxa de decomposição encontrada na leguminosa, em comparação à gramínea, representava perdas para o sistema (KOHMANN *et al.*, 2019), enquanto a serrapilheira, que não se decompõe, contribuía para a estabilidade da matéria orgânica do solo (BERG; MCCLAUGHERTY, 2008). No entanto, estudos demonstram que o material rapidamente degradado contribui com uma grande quantidade de C para o solo (BIRD *et al.*, 2008; RUBINO *et al.*, 2010). Essa contribuição é atribuída aos compostos microbianos produzidos durante a decomposição (MAMBELLI *et al.*, 2011) e não por componentes recalcitrantes presentes (MARSCHNER *et al.*, 2008). Tem sido sugerido que os constituintes vegetais lábeis são a fonte dominante de produtos microbianos porque são utilizados de forma mais eficiente pelos micro-organismos (COTRUFO *et al.*, 2013). Esta descoberta apoia que a maior degradabilidade dos resíduos de leguminosas não diminui o potencial das leguminosas em acumular C e N no solo.

A maior deposição de resíduos vegetais estimula os micro-organismos do solo (PETERSON; LAJTHA, 2013), favorecendo a mineralização e a disponibilidade de nutrientes (LEFF *et al.*, 2012). No entanto, a produção vegetal pode ser limitada pela baixa precipitação e alta temperatura, o que demonstra a relevância de escolher espécies adaptadas a tais condições climáticas (ZHOU; TALLEY; LUO, 2009).

Cordeiro *et al.* (2022) comprovaram que sistemas consorciados de gramíneas e leguminosas com alta produção permitiram alta eficiência na incorporação de C ao solo. Já os seus monocultivos não aumentaram o armazenamento de C (KUMAR *et al.*, 2019). Lira Junior *et al.* (2020) comprovaram que sistemas consorciados elevam o armazenamento de C e N no solo. Os autores atribuem isso à deposição de serrapilheira das leguminosas que se decompõem mais rapidamente, comparada à de gramíneas (APOLINÁRIO *et al.*, 2015).

Jamarillo *et al.* (2021a) compararam o teor N na serrapilheira de gramíneas que receberam adubação nitrogenada com sistemas consorciados de gramíneas e leguminosas e encontraram concentração de N semelhante nos sistemas estudados, indicando retorno de N semelhante.

O consórcio de Amendoim forrageiro e Capim-humidicola [*Urochloa humidicola* (Rendle) Schweick.] aumentou o acúmulo de C em 20%, em comparação com Capim-humidicola em monocultivo, em uma profundidade de 1 m (FISHER *et al.*, 1994). Já o consórcio de Desmodium [*Desmodium heterocarpon* (L.)] com capim-humidicola aumentou o acúmulo de C no solo (0-1 m de profundidade) de 0,66 Mg C ha ano<sup>-1</sup> para a monocultivo, para 1,17 Mg C ha ano<sup>-1</sup> para o consórcio, num período de nove anos (TARRÉ *et al.*, 2001).

O aumento de C e N no solo beneficia os próximos ciclos e espécies em sistemas de integração lavoura-pecuária. Laroca *et al.* (2018) comprovaram que a diversificação na fase de pastagem (gramíneas + leguminosas) aumenta o teor de C e N no solo, o que reflete em aumento na produtividade no próximo ciclo (fase de lavoura). Uma característica importante é o ciclo de vida das plantas. Estudo realizado por Fultz *et al.* (2013) observaram que os teores de C aumentaram 22% em um período de 13 anos em um sistema consorciado com espécies perenes, em relação ao com espécies anuais. Esses autores concluem que espécies perenes são amplamente responsáveis pelo aumento da estabilidade e do sequestro de C.

A idade de estabelecimento do sistema consorciado também interfere no armazenamento de C. Em geral, à medida que o tempo passa, maior é o estoque de C no solo (LIU *et al.*, 2011; VERTÈS; MARY, 2014; JOHNSTON *et al.*, 2017). Nos três primeiros anos, o sistema armazena C principalmente na camada superficial (WHITEHEAD *et al.*, 1990), com subsequente armazenamento em camadas mais profundas do solo (RUMPEL; LEHMANN; CHABBI, 2018).

## REFERÊNCIAS

- ABREU, M. L. C. *et al.* *Clitoria ternatea* L. as a potential high quality forage legume. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, v. 27, n. 2, p. 169-178, 2014.
- AL-FREDAN, M. A. A. Nitrogen fixing legumes in the plant communities. **American Journal of Environmental Sciences**, v. 7, n. 2, p.166-172, 2011.
- ALI, Z. *et al.* Intra-specific genetic diversity and chemical profiling of different accessions of *Clitoria ternatea* L. **Industrial Crops and Products**, v. 43, p. 768-773, 2013.
- ALMEIDA, E. X. *et al.* Oferta de forragem de Capim-elefante anão 'Mott' e a dinâmica da pastagem. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.29, p.1281-1287, 2000.
- ALURI, J. S. R; KUNUKU, V. R. A study on pollination ecology of butterfly pea, *Clitoria ternatea* L. (Fabaceae). **Species**, v. 22, n. 69, p. 29-35, 2021.

- ANDRADE, C. M. S. *et al.* Productivity, utilization efficiency and sward targets for mixed pastures of marandugrass, forage peanut and tropical kudzu. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 41, p. 512-520, 2012.
- ANGLADE, J.; BILLEN, G.; GARNIER, J. Relationships for estimating N<sub>2</sub> fixation in legumes: incidence for N balance of legume-based cropping systems in Europe. **Ecosphere**, v. 6, n. 3, p.1-24, 2015.
- APOLINÁRIO, V. X. O. *et al.* Tree legumes provide marketable wood and add nitrogen in warm-climate silvopasture systems. **Agronomy Journal**, v. 107, p. 1915-1921, 2015.
- ARAÚJO, S. A. C. *et al.* Produção de matéria seca e composição bromatológica de genótipos de Capim-elefante anão. **Archivos de Zootecnia**, v. 60, n. 229, p. 83-91, 2011.
- AVALOS, J. F. V. *et al.* Agrotecnia e utilización de *C. ternatea* en sistemas de producción de carne y leche. **Revista Técnica Pecuária**, v. 1, n. 42, p.79-96, 2004.
- BÅÅTH, E. Temperature sensitivity of soil microbial activity modeled by the square root equation as a unifying model to differentiate between direct temperature effects and microbial community adaptation. **Global Ecology and Biogeography**, v. 24, p. 2850-2861, 2018.
- BAI, X. *et al.* Root cellulose drives soil fulvic acid carbon sequestration in the grassland restoration process. **Catena**, v. 191, p. 104575, 2020.
- BARCELOS, J. P. Q. *et al.* Soil acidity amelioration improves N and C cycles in the short term in a system with soybean followed by maize-guinea grass intercropping. **Geoderma**, v. 421, p. 115909, 2022.
- BARRO, C.; RIBEIRO, A. The study of *Clitoria ternatea* L. hay as a forage alternative in tropical countries. Evolution of the chemical composition at four different growth stages. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 34, p. 780-782, 1983.
- BARROS, N. N.; ROSSETTI, A. G.; CARVALHO, R. B. Feno de Cunhã (*Clitoria ternatea* L.) para acabamento de cordeiros. **Ciência Rural**, v. 34, n. 2, p. 499-504, 2004.
- BARTELT-RYSER, J. *et al.* Soil feedbacks of plant diversity on soil microbial communities and subsequent plant growth. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 7, n. 1, p. 27-49, 2005.
- BEKELE, M.; YILMA, G. Nitrogen fixation using symbiotic and non-symbiotic microbes: A review article. **Biochemistry and Molecular Biology**, v. 6, n. 4, p. 92-98, 2021.
- BERENDSEN, R. L. *et al.* The rhizosphere microbiome and plant health. **Trends in Plant Science**, v. 17, n. 8, p. 478-486, 2012.
- BERG, B.; MCCLAUGHERTY, C. (eds.). **Plant litter: Decomposition, humus formation, carbon sequestration**. Springer, Berlin. 332 p. 2008.
- BIRD, J.A.; KLEBER, M.; TORN, M. S. <sup>13</sup>C and <sup>15</sup>N stabilization dynamics in soil organic matter fractions during needle and fine root decomposition. **Organic Geochemistry**, v. 39, n. 4, p. 465-477, 2008.
- BLACK, A. D.; LAIDLAW, A. S.; O'KIELY, P. Comparative growth and management of white and red clovers. **Irish Journal of Agriculture and Food Research**, v. 48, p. 149-166, 2009.

- BOONMAN, J. G. **East Africa's grasses and fodders: their ecology and husbandry**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht: The Netherlands. 1993. 343p.
- BOURSCHEIDT, M. L. B. *et al.* Highlighting the benefits of biological nitrogen fixation on agronomic, physiological, and nutritive value traits of Brachiaria grass. **European Journal of Agronomy**, v. 143, p. 126730, 2023.
- BRADFORD, M. A. *et al.* Empirical evidence that soil carbon formation from plant inputs is positively related to microbial growth. **Biogeochemistry**, v. 113, p. 271-281, 2013.
- BRISKE, D. D. *et al.* Origin, persistence, and resolution of the rotational grazing debate: integrating human dimensions into rangeland research. **Rangeland Ecology and Management**, v. 64, p. 325-334, 2011.
- BÜNEMANN, E. K. *et al.* Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105-125, 2018.
- BURTON, G. W. Hybrids between napier grass and catabil millet. **The Journal of Heredity**, v.35, n.1, p.227-332, 1944.
- CAMELO, D. *et al.* Soil microbial activity and biomass in semiarid agroforestry systems integrating forage cactus and tree legumes. **Agronomy**, v. 11, n. 8, p. 1558, 2021.
- CASTRO, G. S. A.; MINGOTI, R. **Produção nacional de fertilizantes: potencial expansão do setor de fertilizantes produzidos no Brasil. Propostas para o Brasil 2023-2026**. Agronegócio. 71 p. 2023.
- CAVALCANTE, M. *et al.* Potencial produtivo de *Pennisetum* spp. sob níveis de nitrogênio na Zona da Mata de Pernambuco. **Archivos de Zootecnia**, v. 62, n. 240, p. 501-512, 2013.
- CHAPARRO, J. M. *et al.* Manipulating the soil microbiome to increase soil health and plant fertility. **Biology and Fertility of Soils**, v. 48, p. 489-499, 2012.
- CHAVES, C.S. *et al.* Valor nutritivo e cinética de degradação in vitro de genótipos de Capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schumach) sob dois intervalos de desfolhação e duas alturas de resíduo pós-pastejo. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 68, p. 1351-1359, 2016.
- CHEMISQUY, M.A. *et al.* Phylogenetic studies favour the unification of *Pennisetum*, *Cenchrus* and *Odontelytrum* (Poaceae): a combined nuclear, plastid and morphological analysis, and nomenclatural combinations in *Cenchrus*. **Annals of Botany**, v. 106, n. 1, p. 107-130, 2010.
- CHEN, C. *et al.* Meta-analysis shows positive effects of plant diversity on microbial biomass and respiration. **Nature communications**, v. 10, n. 1, p.1332, 2019.
- CHEN, L. H. *et al.* Application of butterfly pea flower extract in mask development. **Scientia Pharmaceutica**, v. 86, n. 53, p. 1-9, 2018.
- CHRISTOPHE, S. *et al.* Plant N fluxes and modulation by nitrogen, heat and water stresses: a review based on comparison of legumes and non legume plants. **Abiotic stress in plants—mechanisms and adaptations**, p. 79-118, 2011.
- CHUNG, H. *et al.* Plant species richness, elevated CO<sub>2</sub>, and atmospheric nitrogen deposition alter soil microbial community composition and function. **Global Ecology and Biogeography**, v. 13, p. 980–989, 2007.

- COELHO, M. *et al.* Adubação nitrogenada de capim como possível solução ao problema da proteína nos trópicos. **Boletim Técnico IPA**, Recife, 1966. 21p.
- COLLINO, D. J. *et al.* Biological nitrogen fixation in soybean in Argentina: relationships with crop, soil, and meteorological factors. **Plant and Soil**, v. 392, p. 239-252, 2015.
- CONG, W. F. *et al.* Plant species richness promotes soil carbon and nitrogen stocks in grasslands without legumes. **Journal of Ecology**, v. 102, p. 1163-1170, 2014.
- COOK, B. G. *et al.* **Tropical Forages: An interactive selection tool**. Second and Revised ed. International Center for Tropical Agriculture (CIAT), Cali, Colombia and International Livestock Research Institute (ILRI), Nairobi, Kenya, 2020.
- CORDEIRO, C. F. S. *et al.* Soil organic carbon stock is improved by cover crops in a tropical sandy soil. **Agronomy Journal**, v. 114, n. 2, p. 1546-1556, 2022.
- CÓSER, A.C.; MARTINS, C.E.; DERESZ, F. Capim-elefante: formas de uso na alimentação animal. **Embrapa Gado de Leite**, 27 p. 2000.
- COSTA, E. M. *et al.* Acid and high-temperature tolerant *Bradyrhizobium* spp. strains from Brazilian soils are able to promote *Acacia mangium* and *Stizolobium aterrimum* growth. **Symbiosis**, 83, n. 1, p. 65-78, 2021.
- COTRUFO, M. F. *et al.* The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter? **Global Ecology and Biogeography**, v. 19, p. 988–995. 2013.
- CRESTANI, S. *et al.* Steers performance in dwarf elephant grass pastures alone or mixed with *Arachis pintoi*. **Tropical animal health and production**, v. 45, n. 6, p. 1369-1374, 2013.
- CROWTHER, T. W. *et al.* The global soil community and its influence on biogeochemistry. **Science**, v. 365, n. 6455, p. eaav0550, 2019.
- CUNHA, M. V. *et al.* Association between the morphological and productive characteristics in the selection of elephant grass clones. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, n. 3, p. 482-488, 2011.
- CUNHA, M.V. *et al.* Adaptabilidade e estabilidade da produção de forragem por meio de diferentes metodologias na seleção de clones de *Pennisetum* spp. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 4, p. 681-686, 2013.
- DEAK, E. A. *et al.* Effects of soil temperature and moisture on biological nitrogen fixation in soybean crop. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 8, p. 1327-1334, 2019.
- DEAK, E. A. *et al.* Soil humidity as a productive conditioner of soybean culture through inoculation, co-inoculation and rooting. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, n. 6, p. 932-939, 2020.
- DENEF, K. *et al.* Microaggregate-associated carbon as a diagnostic fraction for management-induced changes in soil organic carbon in two Oxisols. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, p. 1165-1172, 2007.
- DIAS, M. C. Métodos para superação da dormência em sementes de Cunhã (*Clitoria ternatea* L.) e sua influência na germinação. **Revista UA**, v. 4-5, n.1-2, p. 39-46, 1996.

- DINIZ, W. P. S. **Caracterização morfológica e nutricional de acessos de *Desmanthus* spp. submetidos a duas intensidades de corte**. 2016. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Zootecnia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.
- DOURADO, D. L. *et al.* Canopy structure and forage nutritive value of elephant grass subjected to different stocking rate and N fertilization in the “Mata Seca” ecoregion of Pernambuco. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 48, p. e20180134, 2019.
- DOVRAT, G.; SHEFFER, E. Symbiotic dinitrogen fixation is seasonal and strongly regulated in water-limited environments. **New Phytologist**, v. 221, n. 4, p. 1866-1877, 2019.
- DRENOVSKY, R. E. *et al.* Land use and climatic factors structure regional patterns in soil microbial communities. **Global Ecology and Biogeography**, v. 19, p. 27-39, 2010.
- DUANGKHET, M. *et al.* Isolation and characterization of rhizobia from nodules of *Clitoria ternatea* in Thailand. **Plant Biotechnology**, v. 35, n. 2, p. 123-129, 2018.
- DUBEUX JR, J. C. B. *et al.* Invited Review: Ecosystem services provided by grasslands in the Southeast United States. **Applied Animal Science**, v. 38, p. 648–659, 2022.
- DUBEUX JR, J. C. B. *et al.* Biological N<sub>2</sub> fixation, belowground responses, and forage potential of rhizoma peanut cultivars. **Crop Science**, v. 57, n. 2, p. 1027-1038, 2017b.
- DUBEUX JR, J. C. B. *et al.* Nutrient cycling in warm-climate grasslands. **Crop Science**, v. 47, n. 3, p. 915-928, 2007.
- DUBEUX JR, J. C. B. *et al.* Tree legumes: an underexploited resource in warm-climate silvopastures. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 46, p. 689-703, 2017a.
- DUBEUX JR, J. C. B.; SOLLENBERGER, L. E. **Nutrient Cycling in Grazed Pastures**. In Management Strategies for Sustainable Cattle Production in Southern Pastures. pp. 59-75. Academic Press. 2020.
- DUPONT, S. T. *et al.* Root traits and soil properties in harvested perennial grassland, annual wheat, and never-tilled annual wheat. **Plant and Soil**, v. 381, p. 405–420. 2014.
- EISENHAUER, N. *et al.* Plant diversity effects on soil food webs are stronger than those of elevated CO<sub>2</sub> and N deposition in a long-term grassland experiment. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 17, p. 6889-6894, 2013.
- EISENHAUER, N. *et al.* Plant diversity effects on soil microorganisms support the singular hypothesis. **Ecology**, v. 91, p.485–496. 2010.
- ELLI, E. F. *et al.* Climate change and management impacts on Soybean N fixation, soil N mineralization, N<sub>2</sub>O emissions, and seed yield. **Frontiers in Plant Science**, 13, 2022.
- FAN, X.; YUAN, G.; LIU, W. Response strategies of N-fixation by epiphytic bryophytes to water change in a subtropical montane cloud forest. **Ecological Indicators**, v. 135, p. 108527, 2022.
- FARIA, V. P. Evolução no uso do Capim-elefante: uma visão histórica. In: Simpósio sobre manejo de pastagens. **Anais**. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1993. 329p.
- FENG, H. *et al.* On-farm assessment of cover cropping effects on soil C and N pools, enzyme activities, and microbial community structure. **The Journal of Agricultural Science**, v. 159, n. 3-4, p. 216-226, 2021.

- FIERER, N.; BRADFORD, M. A.; JACKSON, R. B. Toward an ecological classification of soil bacteria. **Ecology**, v. 88, n. 6, p. 1354-1364, 2007.
- FISHER, M. J. *et al.* Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in South American savannas. **Nature**, v. 371 p. 236-238. 1994.
- FLORES, R. A. *et al.* Adubação nitrogenada e idade de corte na produção de matéria seca do Capim-elefante no Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 1282-1288, 2012.
- FLORES, R. A. *et al.* Nitrogênio e idade de corte na qualidade da biomassa de capimelefante para fins agroenergéticos cultivado em Latossolo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 1, p. 127-136, 2013.
- FORNARA, D. A.; TILMAN, D. Plant functional composition influences rates of soil carbon and nitrogen accumulation. **Journal of Ecology**, v. 96, p. 314–322. 2008.
- FRANZLUEBBERS, A. J. Climate change and integrated croplivestock systems in temperate-humid regions of North and South America: Mitigation and adaptation. In J. Fuhrer & P. J. Gregory (Eds.), **Climate change impact and adaptation in agricultural systems** (pp. 124–139). Oxfordshire, UK: CAB International. 2014.
- FREITAS, A. D. S. *et al.* Nodulação e fixação de nitrogênio por forrageiras de caatinga cultivadas isoladamente no semiárido paraibano. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, p. 1856-1861, 2011.
- FREITAS, E. V. *et al.* Capim-elefante: origem, taxonomia e caracterização. In: LIRA, M. A. *et al.* **Capim elefante: fundamentos e perspectivas**. Recife: IPA/UFRPE, 2010. Capítulo 1, p. 15-28.
- FREITAS, V. F. *et al.* Strategies to deal with drought-stress in biological nitrogen fixation in soybean. **Applied Soil Ecology**, v. 172, p. 104352, 2022.
- FULTZ, L. M. *et al.* Organic carbon dynamics and soil stability in five semiarid agroecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 181, p. 231-240. 2013.
- GAIERO, J. R. *et al.* Inside the root microbiome: bacterial root endophytes and plant growth promotion. **American Journal of Botany**, v. 100, n. 9, p. 1738-1750, 2013.
- GELAYENEW, B. *et al.* Effect of harvesting height and nitrogen fertilization on herbage yield and nutritional qualities of elephant grass in the central highlands of Ethiopia. **Global Veterinaria**, v. 21, n. 5, p. 287-297, 2019.
- GHAFOOR, A. *et al.* Fate of straw-and root-derived carbon in a Swedish agricultural soil. **Biology and Fertility of Soils**, v. 53, n. 2, p. 257-267, 2017.
- GIMENES, F. M. A. *et al.* Forage mass and agronomic traits of Elephant grass genotypes under free-growth and conventional cutting systems. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 37, n. 4, p. 2577-2587, 2016.
- GISPERT, M. *et al.* The impact of land management and abandonment on soil enzymatic activity, glomalin content and aggregate stability. **Geoderma**, v. 202–203, p. 51–61. 2013.
- GOMEZ, S. M.; KALAMANI, A. Butterfly Pea (*Clitoria ternatea* L.): A nutritive multipurpose forage legume for the Tropics - An overview. **Pakistan Journal of Nutrition**, v. 2, n. 6, p. 374-379, 2003.

- GUIMARÃES, G. S. *et al.* Pointing out opportunities to increase grassland pastures productivity via microbial inoculants: Attending the society's demands for meat production with sustainability. **Agronomy**, v. 12, n. 8, p. 1748, 2022.
- GUNINA, A.; KUZ'YAKOV, Y. Sugars in soil and sweets for microorganisms: Review of origin, content, composition and fate. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 90, p. 87-100, 2015.
- GUPTA, J. K.; CHAHAL, J.; BHATIA, M. *Clitoria ternatea* (L.): Old and new aspects. **Journal of Pharmacy Research**, v. 11, n. 3, p. 2610-2614, 2010.
- HANNA, W.W.; MONSON, W. G. Registration of Tifton N75 napiergrass germplasm. **Crop Science**, v. 28, p. 870-871, 1988.
- HANSON, J.; ELLIS, R. H. Progress and challenges in ex situ conservation of forage germplasm: grasses, herbaceous legumes and fodder trees. **Plants**, v. 9, p. 446, 2020.
- HAYASHI, K. Nitrogen cycling and management focusing on the central role of soils: a review. **Soil Science and Plant Nutrition**, 68, n. 5-6, p. 514-525, 2022.
- HOSANG, E. *et al.* Nitrogen contribution from forage legume in maize farming system in West Timor, Indonesia. Solutions to Improve Nitrogen for the World. **Proceedings of**, p. 1-4, 2016.
- HOYLE, F. C. *et al.* Capacity for increasing soil organic carbon stocks in dryland agricultural systems. **Soil Research**, v. 51, p. 657–667, 2013.
- HUTASOIT, R. *et al.* Evaluation of four pasture legumes species as forages and cover crops in oil palm plantation. **Jurnal Ilmu Ternak dan Veteriner**, v. 22, p. 124–134, 2017.
- IQBAL, M. A. *et al.* Forage sorghum-legumes intercropping: effect on growth, yields, nutritional quality and economic returns. **Bragantia**, v. 78, p. 82-95, 2019.
- IRVING, T. B. *et al.* A critical review of 25 years of glomalin research: A better mechanical understanding and robust quantification techniques required. **New Phytologist**, v. 232, p. 1572–1581. 2021.
- JACKSON, R. B. *et al.* The ecology of soil carbon: pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 48, p. 419-445, 2017.
- JACOBY, R. *et al.* The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition—current knowledge and future directions. **Frontiers in plant science**, v. 8, p. 1617, 2017.
- JARAMILLO, D. M. *et al.* Annual and perennial peanut species as alternatives to nitrogen fertilizer in bermudagrass hay production systems. **Agronomy Journal**, v. 110, p. 2390-2399. 2018.
- JARAMILLO, D. M. *et al.* Litter mass, deposition rate, and decomposition in nitrogen-fertilized or grass-legume mixed grazing systems. **Crop Science**, v. 61, p. 2176-2189. 2021.
- JAUHAR, P. P. The eternal controversy on the Latin name of pearl millet. **Indian Journal of Botany**, v.4, p.1-4, 1981.
- JHARIYA, M. K. *et al.* **Leguminous trees an innovative tool for soil sustainability.** Legumes for soil health and sustainable management, p. 315-345, 2018.

- JOHNSTON, A. E. *et al.* Changes in soil organic matter over 70 years in continuous arable and ley–arable rotations on a sandy loam soil in England. **European Journal of Soil Science**, v. 68, n. 3, p. 305-316. 2017.
- KANNO, T., M. C. *et al.* Root biomass of five tropical grass pastures under continuous grazing in Brazilian savannas. **Japanese Journal of Grassland Science**, v. 45, n. 1, p. 9-14, 1999.
- KE, Y. *et al.* Single-cell transcriptome profiling of buffelgrass (*Cenchrus ciliaris*) eggs unveils apomictic parthenogenesis signatures. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 9880, 2021.
- KEILUWEIT, M. *et al.* Mineral protection of soil carbon counteracted by root exudates. **Nature Climate Change**, v. 5, n. 6, p. 588-595, 2015.
- KHLIFA, R. *et al.* Do temperate tree species diversity and identity influence soil microbial community function and composition? **Ecology and evolution**, v. 7, n. 19, p. 7965-7974, 2017.
- KOHMANN, M. M. *et al.* Legume proportion in grassland litter affects decomposition dynamics and nutrient mineralization. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 3, p. 1079-1089, 2019.
- KONG, A. Y. Y.; SIX, J. Tracing root vs. residue carbon into soils from conventional and alternative cropping systems. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 74, p. 1201–1210. 2010.
- LADHA, J. K. *et al.* Biological nitrogen fixation and prospects for ecological intensification in cereal-based cropping systems. **Field Crops Research**, v. 283, p. 108541, 2022.
- LAL, R. Soil health and carbon management. **Food and Energy Security**, v. 5, p. 212–222. 2016.
- LANGE, M. *et al.* Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. **Nature communications**, v. 6, n. 1, p. 6707, 2015.
- LAROCA, J. V. S. *et al.* Qualidade do solo e produtividade de soja em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 11, p. 1248-1258, 2018.
- LEDGARD, S. F.; STEELE, K. W. Biological nitrogen fixation in mixed legume/grass pastures. **Plant and Soil**, v. 141, p. 137-153, 1992.
- LEE, M. A. A global comparison of the nutritive values of forage plants grown in contrasting environments. **Journal of Plant Research**, v. 131, n. 4, p. 641-654, 2018.
- LEFF, J. W. *et al.* Experimental litterfall manipulation drives large and rapid changes in soil carbon cycling in a wet tropical forest. **Global Change Biology**, v. 18, n. 9, p. 2969-2979, 2012.
- LEHMANN, J.; KLEBER, M. The contentious nature of soil organic matter. **Nature**, v. 528, n. 7580, p. 60-68, 2015.
- LEMAIRE, G. *et al.* (Ed.). **Grassland productivity and ecosystem services**. Wallingford: Cabi, 2011.
- LEMOS, M. F. *et al.* Grass size and butterfly pea inclusion modify the nutritional value of elephant grass silage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 56. 2021.

- LI, Q. *et al.* Grass–legume ratio can change soil carbon and nitrogen storage in a temperate steppe grassland. **Soil and Tillage Research**, v. 157, p. 23-31, 2016.
- LICHTER, K. *et al.* Aggregation and C and N contents of soil organic matter fractions in a permanent raised bed planting system of the highlands of Central Mexico. **Plant Soil**, v. 305, p. 237–252. 2008.
- LIMA, H. N. B. *et al.* Herbage responses of signalgrass under full sun or shade in a silvopasture system using tree legumes. **Agronomy Journal**, v. 112, p. 1839-1848. 2020.
- LIRA JUNIOR, M. A., *et al.* Legume-based silvopastoral systems drive C and N soil stocks in a subhumid tropical environment. **Catena**, v. 189, p. 104508. 2020.
- LIRA, M. A. *et al.* Sistemas de produção de forragem: alternativas para sustentabilidade da pecuária. **Anais de Simpósios da 43ª Reunião Anual da SBZ - João Pessoa - PB**: 405-423 p. 2006.
- LIU, K. *et al.* Grazing intensity and nitrogen fertilization affect litter responses in ‘Tifton 85’ bermudagrass pastures: I. Mass, deposition rate, and chemical composition. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 1, p. 163-168, 2011.
- MA, Z.; CHEN, H. Y. H. Effects of species diversity on fine root productivity in diverse ecosystems: a global meta-analysis. **Global Ecology and Biogeography**, v. 25, n. 11, p. 1387-1396, 2016.
- MA, Z.; CHEN, H. Y. H. Positive species mixture effects on fine root turnover and mortality in natural boreal forests. **Global Ecology and Biogeography**. v. 121, p. 130–137. 2018.
- MAEGHT, J. L. *et al.* How to study deep roots—and why it matters. **Frontiers In Plant Science**, v. 4, p. 299, 2013.
- MAHALA, A. G. *et al.* Effect of plant age on DM yield and nutritive value of some leguminous plants (*Cyamopsis tetragonoloba*, *Lablab purpureus* and *Clitoria ternatea*). **International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science**, v. 2, n. 12, p. 502-508, 2012.
- MAHFOUZ, H. *et al.* Integrated effect of planting dates and irrigation regimes on morpho-physiological response, forage yield and quality, and water use efficiency of clitoria (*Clitoria ternatea* L.) in arid region. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 66, n. 2, p. 152-167, 2020.
- MAHMUD, K. *et al.* Current progress in nitrogen fixing plants and microbiome research. **Plants**, v. 9, n. 1, p. 97, 2020.
- MAMBELLI, S., J.A. *et al.* Relative contribution of foliar and fine root pine litter to the molecular composition of soil organic matter after in situ degradation. **Organic Geochemistry**, v. 42, n. 9, p. 1099-1108, 2011.
- MANCINELLI, R. L.; MCKAY, C. P. The evolution of nitrogen cycling. **Origins of Life and Evolution of the Biosphere**, v. 18, p. 311-325, 1988.
- MARSCHNER, B. *et al.* How relevant is recalcitrance for the stabilization of organic matter in soils? **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 171, n. 1, p. 91-110, 2008.
- MARTÍNEZ-MAMIAN, C. A. *et al.* Agronomic behavior of forage mixtures with *Canavalia brasiliensis* for the dry tropics. **Sylwan**, v. 164, p. 177–194. 2020.

- MARTÍNEZ-VIVEROS, O. *et al.* Mechanisms and practical considerations involved in plant growth promotion by rhizobacteria. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 10, n. 3, p. 293-319, 2010.
- MARTUSCELLO, J.A. *et al.* Características produtivas e fisiológicas de Capim-elefante submetido à adubação nitrogenada. **Archivos de Zootecnia**, v. 65, n. 252, p. 565-570, 2016.
- MEDEIROS, G. R. *et al.* Forragens adaptadas ao Semiárido: impactos na cadeia produtiva do Nordeste. In: II Simpósio Paraibano de Conservação e Utilização de Forragens, 2 ed, 2022, Areia. **Anais [...]** Recife: Even3 Publicações, 2022. p. 164-175.
- MISTURA, C. *et al.* Adubação orgânica no cultivo da Cunhã na região semiárida do Brasil. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 11, n. 3, p. 581-594, 2010.
- MISTURA, C. *et al.* Germinação e desenvolvimento de plântulas de Cunhã em função da salinidade. **Revista Brasileira Saúde Produção Animal**, v. 12, n. 2, p. 306-317, 2011.
- MONÇÃO, F. P. *et al.* Productivity and nutritional value of BRS Capiacu grass (*Pennisetum purpureum*) managed at four regrowth ages in a semiarid region. **Tropical Animal Health and Production**, v. 52, p. 235-241, 2020.
- MORAES, J. M. A. S. *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi in integrated crop livestock systems with intercropping in the pasture phase in the Cerrado. **Rhizosphere**. v. 11, p. e100165. 2019.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: UFLA, 2006. 729 p.
- MORRIS, B. Characterization of butterfly pea (*Clitoria ternatea* L.) accessions for morphology, phenology, reproduction and potential nutraceutical, pharmaceutical trait utilization. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 56, p. 421–427, 2009.
- MOTA, M. A. A. **Aspectos morfológicos e produtivos da *Clitoria ternatea* L. em diferentes sistemas de cultivo**: impacto na diversidade e comportamento de visitantes florais. 2022. 73f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Programa de Pós-graduação em Zootecnia, Universidade Federal Rural de Pernambuco.
- MUONI, T. *et al.* Effects of management practices on legume productivity in smallholder farming systems in sub-Saharan Africa. **Food and Energy Security**, v. 11, n. 2, 2022.
- NUNES, G. F. O. *et al.* Polyphasic characterization of forage legumes root nodule bacteria isolated from semiarid region in Brazil. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n. 3, p. 612-624, 2018.
- NYAMBATI, E.M. *et al.* Production; characterization and nutritional quality of Napier grass [*Pennisetum purpureum* (Schum.)] cultivars in Western Kenya. **African Journal of Plant Science**, v. 4, n. 12, p. 496-502, 2010.
- OGUIS, G. K. *et al.* Butterfly pea (*Clitoria ternatea*), a cyclotide-bearing plant with applications in agriculture and medicine. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 1-23, 2019.
- OLIVEIRA, J. P. *et al.* Avaliação da fixação e transferência de nitrogênio na associação gramíneas-leguminosas forrageiras tropicais, através da diluição isotópica do <sup>15</sup>N. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 25, n. 2, p. 210-222, 1996.
- OLIVEIRA, T. N. *et al.* Estabilidade e adaptabilidade de clones de *Pennisetum* sp. sob pastejo: Mancha ocular. **Archivos de Zootecnia**, v. 60, n. 231, p. 725-732, 2011.

OTERO, J. R. Capim-elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum.). In: OTERO, J. O. **Informações sobre algumas plantas forrageiras**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, p.38-43. 1952.

PATEL, J. *et al.* Effect of seed treatment on germination and flavonoids diversity in accessions of butterfly pea (*Clitoria ternatea*). **The Indian Journal of Agriculture Science**. v. 86, p. 1553–1558, 2016.

PEGORARO, R. F. *et al.* Estoques de carbono e nitrogênio nas frações da matéria orgânica em Argissolo sob eucalipto e pastagem. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 2, p. 261-273, 2011.

PEIXOTO, T. V. F. R. *et al.* Histological arrangements of plant tissue of different elephant grasses as influenced by their genotypes. **African Journal of Range and Forage Science**, v. 40, n. 4, p. 325-334, 2023.

PEREIRA, A. V. *et al.* BRS Kurumi and BRS Capiaçú-New elephant grass cultivars for grazing and cut-and-carry system. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 17, n. 1, p. 59-62, 2017.

PEREIRA, A. V. *et al.* Melhoramento de forrageiras tropicais. In: NASS, L. L. *et al.* **Recursos genéticos e melhoramento de plantas**. Rondonópolis: Fundação Mato Grosso. p.549-602, 2001.

PEREIRA, A. V. *et al.* Melhoramento genético de *Pennisetum purpureum*. In: RESENDE, R.M.S., VALLE, C.B. and JANK, L. (eds) **Melhoramento de forrageiras tropicais**. Campo Grande, Embrapa, 2008. p. 89-116.

PEREIRA, A. V. *et al.* *Pennisetum Purpureum*. In: FONSECO, D.M., MARTUSCELLO, J.A. (Ed), **Plantas Forrageiras**. Viçosa: UFV, cap. 6, p. 197-219, 2010.

PEREIRA, A. V. *et al.* Tendências do melhoramento genético e produção de sementes forrageira no Brasil. In: Simpósio sobre atualização em genética e melhoramento de plantas. **Anais**. Lavras: UFLA, 2003. p. 36-63.

PEREIRA, J. M. *et al.* Production of beef cattle grazing on *Brachiaria brizantha* (Marandu grass) *Arachis pintoi* (forage peanut cv. Belomonte) mixtures exceeded that on grass monocultures fertilized with 120 kg N/ha. **Grass and Forage Science**, v. 75, n. 1, p. 28-36, 2020.

PETERSON, F. S.; LAJTHA, K. J. Linking aboveground net primary productivity to soil carbon and dissolved organic carbon in complex terrain. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 118, p. 1225–1236. 2013.

POORTER, H. *et al.* Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. **New Phytologist**, v. 193, n. 1, p. 30-50, 2012.

POSTGATE, J. R. New Advances and Future Potential in Biological Nitrogen Fixation: Fourth Stenhouse-Williams Memorial Lecture. **Journal of Applied Microbiology**, v. 37, n. 2, p. 185-202, 1974.

PRUDENT, M. *et al.* How nitrogen fixation is modulated in response to different water availability levels and during recovery: A structural and functional study at the whole plant level. **Plant and Soil**, v. 399, p. 1-12, 2016.

- RASSE, D. P. *et al.* Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. **Plant and Soil**, v. 269, n. 1-2, p. 341-356, 2005.
- REICH, P. B. *et al.* Impacts of biodiversity loss escalate through time as redundancy fades. **Science**, v. 336, p. 589–592. 2012.
- REIMER, M. *et al.* Reliance on biological nitrogen fixation depletes soil phosphorus and potassium reserves. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 118, n. 3, p. 273-291, 2020.
- REINHOLD-HUREK, B. *et al.* Roots shaping their microbiome: global hotspots for microbial activity. **Annual Review of Phytopathology**, v. 53, p. 403-424, 2015.
- REISS, E. R.; DRINKWATER, L. E. Promoting enhanced ecosystem services from cover crops using intra-and interspecific diversity. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 323, p. 107586, 2022.
- RIBEIRO, K. G.; GOMIDE, J. A.; PACIULLO, D. S. C. Adubação nitrogenada do Capim-elefante cv. Mott: 2. valor nutritivo ao atingir 80 e 120 cm de altura. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 28, p. 1194-1202, 1999.
- RILLIG, M. C. *et al.* Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils. **Plant Soil**, v. 233, p. 167–177. 2001.
- RILLIG, M. C.; WRIGHT, S. F.; EVINER, V. T. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: Comparing effects of five plant species. **Plant Soil**, v. 238, p. 325–333. 2002.
- RODRÍGUEZ-NAVARRO, D. *et al.* Selection and characterization of Spanish Trifolium-nodulating rhizobia for pasture inoculation. **Systematic and Applied Microbiology**, v. 45, n. 2, p. 126290, 2022.
- ROMANYÀ, J.; CASALS, P. Biological Nitrogen Fixation Response to Soil Fertility Is Species- Dependent in Annual Legumes. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 2, p. 546-556, 2020.
- ROSOLEM, C. A.; LI, Y.; GARCIA, R. A. Soil carbon as affected by cover crops under no-till under tropical climate. **Soil Use and Management**, v. 32, p. 495–503. 2016.
- RUBINO, M. *et al.* Carbon input belowground is the major C flux contributing to leaf litter mass loss: Evidences from a <sup>13</sup>C labelled leaf litter experiment **Soil Biology and Biochemistry**, v.42, p. 1009–1016. 2010.
- RUMPEL, C.; KÖGEL-KNABNER, I. Deep soil organic matter—a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. **Plant and Soil**, v. 338, p. 143-158, 2011.
- RUMPEL, C.; LEHMANN, J.; CHABBI, A. ‘4 per 1,000’initiative will boost soil carbon for climate and food security. **Nature**, v. 553, n. 7686, p. 27-28, 2018.
- SACCÁ, M. L. *et al.* Ecosystem services provided by soil microorganisms. In: **Soil biological communities and ecosystem resilience**. Springer International Publishing, 2017. p. 9-24.
- SALES-SILVA, T. B. *et al.* Does the presence of tall or dwarf elephant grass genotypes change the nutritive value of butterfly pea in grass–legume intercrops? **African Journal of Range Forage Science**, p. 1-10, 2023a.

- SALES-SILVA, T. B. *et al.* The growth habits of tropical legumes affect the nutritive herbage value more than harvesting frequency. **Crop and Pasture Science**, v. 75, n. 1, p. NULL-NULL, 2023b.
- SANT-ANNA, S. A. C. *et al.* Changes in soil organic carbon during 22 years of pastures, cropping or integrated crop/livestock systems in the Brazilian Cerrado. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 108, p. 101-120, 2017.
- SANTOS, E.A.; SILVA, D.S.; QUEIROZ FILHO, J.L. Aspectos produtivos do Capim-elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum.) cv. Roxo no Brejo Paraibano. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 30, p. 31-36, 2001a.
- SANTOS, E.A.; SILVA, D.S.; QUEIROZ FILHO, J.L. Composição química do Capim-elefante cv. Roxo cortado em diferentes alturas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 30, n. 1, p. 18-23, 2001b.
- SANTOS, M. V. F. **Pastagens tropicais: dos fundamentos ao uso sustentáveis**. Suprema Gráfica, Minas Gerais, p. 570. 2023.
- SANTOS, M. V. F.; NEIVA, J. N. M. **Culturas Forrageiras no Brasil: Uso e Perspectivas**. Suprema Gráfica, Minas Gerais, p. 492. 2022.
- SARTO, M. V. *et al.* Soil microbial community, enzyme activity, C and N stocks and soil aggregation as affected by land use and soil depth in a tropical climate region of Brazil. **Archives of Microbiology**, v. 202, p. 2809-2824. 2020.
- SHAO, X.; YANG, W.; WU, M. Seasonal dynamics of soil labile organic carbon and enzyme activities in relation to vegetation types in Hangzhou Bay tidal flat wetland. **PLoS One**, v. 10, n. 11, p. e0142677, 2015.
- SHERROD, L. A. *et al.* Do fulvic, humic, and humin carbon fractions represent meaningful biological, physical, and chemical carbon pools? **Journal of Environmental Quality**, v. 48, n. 6, p. 1587-1593, 2019.
- SILVA NETO, A. J. *et al.* Herbaceous forage legumes with diverse structural traits can display similar productive responses under different harvest frequencies. **Ciência Rural**, v. 54, p. e20220440, 2023.
- SILVA, J. K. B. *et al.* Dwarf versus tall elephant grass in sheep feed: which one is the most recommended for cut-and-carry? **Tropical Animal Health and Production**, v. 53, p. 1-14, 2021.
- SILVA, L. S. *et al.* Does grass-legume intercropping change soil quality and grain yield in integrated crop-livestock systems? **Applied Soil Ecology**, v. 170, p. 104257, 2022a.
- SILVA, L. S. *et al.* Soil carbon and nitrogen stocks in nitrogen-fertilized grass and legume-grass forage systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 122, n. 1, p. 105-117, 2022b.
- SILVA, M. C. *et al.* Characters of *Pennisetum* spp. used for the initial selection in the genetic improvement program for elephant grass. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 37, n. 4, p. 2035-2042, 2016.
- SILVA, P. H. F. *et al.* Agronomic responses and herbage nutritive value of elephant grass (*Cenchrus purpureus*) genotypes grown as monocrops and mixed with butterfly pea (*Clitoria ternatea*). **Crop and Pasture Science**, v. 74, p. A-M, 2023.

- SILVA, P. H. F. *et al.* Tall and short-sized elephant grass genotypes: morphophysiological aspects cut-and-carry, and grazing management. **Ciência Rural**, v. 51, p. e20200848. 2021.
- SIMPSON, R. T. *et al.* Preferential accumulation of microbial carbon in aggregate structures of no-tillage soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, p. 1249–1255. 2004.
- SINGH, A.K.; RAI, A.; SINGH, N. Effect of long-term land use systems on fractions of glomalin and soil organic carbon in the Indo-Gangetic plain. **Geoderma**, v. 277, p. 41–50. 2016.
- SINGH, B. P. **Biofuel crops: production, physiology and genetics.** (Ed), Oxford, UK: CABI, 631p., 2013.
- SOLLENBERGER, L. E. *et al.* Grassland management affects delivery of regulating and supporting ecosystem services. **Crop Science**, v. 59, n. 2, p. 441-459. 2019.
- SOLLENBERGER, L. E. *et al.* Registration of ‘Mott’ dwarf elephantgrass. **Crop Science**, v.29, n.3, p.827-828, 1989.
- SOLLENBERGER, L. E.; DUBEUX JUNIOR, J. C. B. Warm-climate, legume-grass forage mixtures versus grass-only swards: An ecosystem services comparison. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 51. 2022.
- SOUMARE, A. *et al.* Exploiting biological nitrogen fixation: A route towards a sustainable agriculture. **Plants**, v. 9, n. 8, p. 1-22, 2020.
- SOUZA, P. H. *et al.* Nutritional value of elephant grass genotypes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 10, p. 951-955, 2017.
- SOUZA, R. T. A. **Anatomia e valor nutritivo de genótipos de Capim-elefante de diferentes portes sob irrigação.** 2019. 107p. Tese (Doutorado). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Recife-PE.
- SOUZA, R. T. A. *et al.* Dwarf and tall elephant grass genotypes under irrigation as forage sources for ruminants: herbage accumulation and nutritive value. **Animals**, v. 11, n. 8, p. 2392, 2021.
- STEINBEISS, S. *et al.* Plant diversity positively affects short-term soil carbon storage in experimental grasslands. **Global Change Biology**, v. 14, p. 2937–2949. 2008.
- STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition and reactions.** 2. ed. New York: Willey & Sons, 1994. 496 p.
- STRECKER, T. *et al.* Functional composition of plant communities determines the spatial and temporal stability of soil microbial properties in a long-term plant diversity experiment. **Oikos**, v. 125, n. 12, p. 1743-1754, 2016.
- TAIZ, L. *et al.* **Plant physiology and development**, 6th. Oxford University Press, Oxford. 864 p. 2014.
- TARRÉ, R. *et al.* The effect of the presence of a forage legume on nitrogen and carbon levels in soils under *Brachiaria* pastures in the Atlantic forest region of the South of Bahia, Brazil. **Plant and Soil**, v. 234, p. 15-26, 2001.
- TAUR, D. J. *et al.* Pharmacognostical and preliminary phytochemical evaluation of *Clitoria ternatea* leaves. **Pharmacogn**, v. 2, p. 260–265, 2010.

- THILAKARATHNA, M. S. *et al.* Belowground nitrogen transfer from legumes to non-legumes under managed herbaceous cropping systems. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 36, p. 1-16, 2016.
- THOMAS, R. J. Role of legumes in providing N for sustainable tropical pasture systems. **Plant and Soil**, v. 174, p. 103–118. 1995.
- THOMAS, R. J. The role of the legume in the nitrogen cycle of productive and sustainable pastures. **Grass and Forage Science**, v. 47, p. 133–142. 1992.
- TONTINI, J. F. *et al.* Dispersal and concentration of sheep gastrointestinal nematode larvae on tropical pastures. **Small Ruminant Research**, v. 174, p. 62-68, 2019.
- TRAILL, S. *et al.* Tropical forage legumes provide large nitrogen benefits to maize except when fodder is removed, **Crop and Pasture Science**, v. 69, p. 183–193, 2018.
- TZANAKAKIS, V.; STURITE, I.; DÖRSCH, P. Biological nitrogen fixation and transfer in a high latitude grass-clover grassland under different management practices. **Plant and Soil**, v. 421, p. 107-122, 2017.
- VEIGA, J. B. *et al.* Capim-elefante não sob pastejo I. Produção de forragem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.20, n.8, p.929-936, 1985.
- VERTÈS, F., MARY, B. **Part of grassland in ley-arable rotations is a proxy for predicting long term soil organic matter dynamics.** In: Proceedings of the 18th Nitrogen Workshop, 30,347-348. 2014.
- VIANA, B. L. *et al.* Adaptability and stability analysis for selection of elephant grass clones under grazing. **Crop Science**, v. 55, n. 2, p. 950-957, 2015.
- VIANA, B. L. *et al.* Morphological characteristics and proportion of leaf blade tissues of elephant grass clones under sheep grazing. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 11, p. 1268-1275, 2018.
- VIEIRA, A. C. *et al.* Plant and animal responses of elephant grass pasture-based systems mixed with pinto peanut. **The Journal of Agricultural Science**, v. 157, n. 1, p. 63-71, 2019.
- VILLEGAS, D. M. *et al.* Urochloa grasses swap nitrogen source when grown in association with legumes in tropical pastures. **Diversity**, v. 12, p. 419-434. 2020.
- WANG, Q. *et al.* Spatial distribution of glomalin-related soil protein and its relationship with sediment carbon sequestration across a mangrove forest. **Science of the Total Environment**, v. 613, p. 548-556, 2018.
- WATTHIER, M. *et al.* Decomposition of green manure with different grass: legume ratios. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 66, n. 7, p. 913-924. 2020.
- WHITEHEAD, D. C.; BRISTOW, A. W.; LOCKYER, D. R. Organic matter and nitrogen in the unharvested fractions of grass swards in relation to the potential for nitrate leaching after ploughing. **Plant and Soil**, v. 123, p. 39-49. 1990.
- WIESMEIER, M. *et al.* Soil organic carbon storage as a key function of soils—A review of drivers and indicators at various scales. **Geoderma**, v. 333, p. 149–162. 2019.
- XIA, M. *et al.* Fine roots are the dominant source of recalcitrant plant litter in sugar maple-dominated northern hardwood forests. **New Phytologist**, v. 208, n. 3, p. 715-726, 2015.

- XU, P. *et al.* Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on aggregate stability of a clay soil inoculating with two different host plants. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil and Plant Science*, v. 65, n. 1, p. 23-29, 2015.
- XU, X.; THORNTON, P. E.; POST, W. M. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, v. 22, p. 737-749, 2013.
- YAN, Q. *et al.* The elephant grass (*Cenchrus purpureus*) genome provides insights into anthocyanidin accumulation and fast growth. *Molecular Ecology Resources*, v. 21, n. 2, p. 526-542, 2021.
- YANG, F.; TANG, C.; ANTONIETTI, M. Natural and artificial humic substances to manage minerals, ions, water, and soil microorganisms. *Chemical Society Reviews*, v. 50, n. 10, p. 6221-6239, 2021.
- YU, M. *et al.* Nonlinear response of lucerne (*Medicago sativa*) biomass and biological nitrogen fixation to different irrigations and sowing modes. *Applied Soil Ecology*, v. 125, p. 257-263, 2018.
- ZAKARIA, N. N. A. *et al.* In vitro protective effects of an aqueous extract of *Clitoria ternatea* L. flower against hydrogen peroxide-induced cytotoxicity and UV-induced mtDNA damage in human keratinocytes. *Phytotherapy Research*, v. 32, n. 6, p. 1064-1072, 2018.
- ZHANG, J. *et al.* Harnessing the plant microbiome to promote the growth of agricultural crops. *Microbiological Research*, v. 245, p. 126690, 2021.
- ZHAO, F. *et al.* Biological N fixation but not mineral N fertilization enhances the accumulation of N in peanut soil in maize/peanut intercropping system. *Journal of Agriculture and Food Research*, v. 10, p. 100365, 2022a.
- ZHAO, J. *et al.* Effects of monoculture and mixed culture of grass and legume forage species on soil microbial community structure under different levels of nitrogen fertilization, *European Journal of Soil Biology*, v. 68, p. 61–68, 2015.
- ZHAO, Y. Y. *et al.* Soil acidification negatively affects *Arachis hypogaeae* L. Growth by Inhibiting Nodule Initiation and Nitrogen Fixation. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 22, n. 1, p. 571-584, 2022b.
- ZHAO, Y.; LIU, Z.; WU, J. Grassland ecosystem services: a systematic review of research advances and future directions. *Landscape Ecology*, v. 35, p. 793-814, 2020.
- ZHOU, X.; TALLEY, M.; LUO, Y. Biomass, litter and soil respiration along a precipitation gradient in southern great plains, USA. *Ecosystems*, v.12, p. 1369-1380, 2009.
- ZILLI, J. E. *et al.* Dynamic of rhizobia in the soil during the dry season in cerrado of Roraima. *Acta Amazonica*, v. 43, p. 153-160, 2013.

## **CAPÍTULO 2**

---

**A INCLUSÃO DE CUNHÃ EM CAPINEIRA DE CAPIM-ELEFANTE REDUZ A  
NECESSIDADE DE FERTILIZAÇÃO NITROGENADA EM CLIMA TROPICAL  
SECO**

## RESUMO

Sistemas consorciados de produção de forragem podem promover diversos serviços ecossistêmicos. Foi investigado o efeito de sistemas de cultivo de capim-elefante (*Cenchrus purpureus*) com diferentes portes (Elefante B e Mott), consorciados ou não com cunhã (*Clitoria ternatea*) sobre características agronômicas, fixação biológica de nitrogênio e estoques de C e N do capim-elefante e cunhã. Também foram determinados os teores e estoques de C e N do solo em clima tropical seco. O monocultivo de capim-elefante foi adubado com 300 kg N ha<sup>-1</sup>. O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso com quatro repetições. A cunhã em monocultivo apresentou maior acúmulo de forragem (4.924 kg ha<sup>-1</sup>) e fixação biológica de nitrogênio (100 kg de N ha<sup>-1</sup>), do que consorciada com genótipos de capim-elefante (696 kg ha<sup>-1</sup> e 18 kg de N ha<sup>-1</sup>). Genótipos de porte alto e baixo não diferem no acúmulo de forragem (18.135 e 15.138 kg ha<sup>-1</sup>). A relação folha/caule da cunhã (1,6) e do capim-elefante (1,4) foi semelhante para os diferentes sistemas de cultivo. O acúmulo de forragem e teor e estoque de N no solo não diferiram entre os monocultivos de capim-elefante (16.637 kg ha<sup>-1</sup>, 0,95 g kg<sup>-1</sup> e 1,49 Mg ha<sup>-1</sup>) e os consórcios com cunhã (13.694 kg ha<sup>-1</sup>, 0,90 g kg<sup>-1</sup> e 1,44 Mg ha<sup>-1</sup>). O monocultivo de cunhã estocou mais N na planta, em comparação aos demais sistemas de cultivos. Na época seca, ocorreu maior teor e estoque de C, além da maior participação do capim-elefante na composição botânica, em relação a cunhã. O estoque de C e N é maior na camada 0,20-0,40 m do solo. Comparado o monocultivo com fertilizante nitrogenado, a inclusão da cunhã em capineiras de capim-elefante, independente do porte da gramínea, mantém ou incrementa serviços ecossistêmicos de provisão, regulação e suporte como o acúmulo de forragem, fixação biológica de nitrogênio e o armazenamento de C e N do solo e na planta.

**Palavra-chave:** *Cenchrus purpureus*; *Clitoria ternatea* L.; Estoque de C; Fixação biológica de nitrogênio; Produção de forragem.

## ABSTRACT

Intercropped forage production systems can promote several ecosystem services. The effect of Elephant Grass (*Cenchrus purpureus*) cultivation systems of different sizes (Elephant B and Mott), intercropped or not with Butterfly pea (*Clitoria ternatea*) on agronomic characteristics, biological nitrogen fixation and C and N stocks of the Elephant grass and Butterfly pea. The soil C and N contents and stocks in a dry tropical climate were also determined. The Elephant grass monoculture was fertilized with 300 kg N ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>. The experimental design used was randomized blocks with four replications. Butterfly pea in monoculture presents greater accumulation of forage (4,924 kg ha<sup>-1</sup>) and biological nitrogen fixation (100 kg N ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) than when intercropped with Elephant grass genotypes (696 kg ha<sup>-1</sup> and 18 kg N ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>). High and low genotypes do not differ in forage accumulation (18,135 e 15,138 kg ha<sup>-1</sup>). The leaf/stem ratio of Butterfly pea (1.6) and Elephant grass (1.4) was similar for the different cultivation systems. Forage accumulation and N content and stock in the soil did not differ between Elephant grass monocultures (16,637 kg ha<sup>-1</sup>, 0.95 g kg<sup>-1</sup> e 1.49 Mg ha<sup>-1</sup>) and intercrops with Butterfly pea (13,694 kg ha<sup>-1</sup>, 0.90 g kg<sup>-1</sup> e 1.44 Mg ha<sup>-1</sup>). The Butterfly pea monoculture stores more N in the plant compared to other cropping systems. In the dry season there is a higher C content and stock, in addition to the greater participation of Elephant grass in the botanical composition in relation to Butterfly pea. The stock of C and N is greatest in the 0.20-0.40 m layer of soil. Compared to monoculture with nitrogen fertilizer, the inclusion of Butterfly pea in Elephant Grass weeds, regardless of the size of the grass, maintains or increases ecosystem services of provision, regulation and support such as forage accumulation, biological nitrogen fixation and storage of C and N in the soil and in the plant.

**Keywords:** *Cenchrus purpureus*; *Clitoria ternatea*; C stock; Biological nitrogen fixation; Forage production.

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas consorciados de gramíneas e leguminosas fornecem uma série de serviços ecossistêmicos, alguns dos quais incluem produção de forragem, armazenamento de carbono e nitrogênio, ciclagem de nutrientes e aumento da matéria orgânica do solo (REISS; DRINKWATER, 2022; SILVA *et al.*, 2022; SALES-SILVA *et al.*, 2023a).

O capim-elefante [*Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone sin. *Pennisetum purpureum* Schumach] é uma gramínea de origem africana que possui grande importância para a pecuária brasileira. Devido à sua alta produtividade (em torno de 66 t MS ha<sup>-1</sup>) e adaptação a diferentes condições edafoclimáticas (PEREIRA *et al.*, 2017; MONÇÃO *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2023), o capim-elefante apresenta um número considerável de genótipos que se diferenciam pelo porte da planta (CUNHA *et al.*, 2011; 2013; SINGH, 2013; SOUZA *et al.*, 2021).

Os genótipos de porte alto são amplamente cultivados para corte devido à sua alta produtividade de forragem, que está relacionada às características como maior alongamento e alta proporção de colmo na forragem colhida (VIANA *et al.*, 2015). Esses genótipos também possuem maiores percentuais de material senescente (SILVA *et al.*, 2021). Os genótipos de porte baixo apresentam maior relação folha/colmo, caules menos lignificados e maior valor nutritivo, sendo cultivados para pastejo ou corte (VIANA *et al.*, 2018, SILVA *et al.*, 2023).

A produtividade e a perenidade do capim-elefante podem ser comprometidas pela ausência da reposição dos nutrientes do solo (DOURADO *et al.*, 2019), notadamente de N. Vale destacar que 80% dos fertilizantes são importados, o que torna o setor agrícola nacional vulnerável às flutuações do mercado internacional. Pensando nisso, foi desenvolvido no Brasil o Plano Nacional de Fertilizantes 2022–2050 (PNL), que visa à redução da exportação de fertilizantes e o desenvolvimento de novas tecnologias (CASTRO; MINGOTI, 2023). A utilização de sistemas consorciados de gramíneas e leguminosas é uma opção, uma vez que a inclusão de leguminosas pode aumentar a entrada de nitrogênio via fixação biológica (ZHAO *et al.*, 2022).

A cunhã (*Clitoria ternatea* L.) pode ser uma alternativa para consórcio com capim-elefante em capineiras (SALES-SILVA *et al.*, 2023a). A produtividade da cunhã pode chegar a 3 t MS ha<sup>-1</sup> em 90 dias (SALES-SILVA *et al.*, 2023b), e sua introdução em capineiras de capim-elefante pode melhorar o valor nutritivo da forragem produzida (LE MOS *et al.*, 2021).

Essa leguminosa herbácea pode fixar cerca de 100 kg de N ha<sup>-1</sup> via simbiose com *Rhizobium* spp. (TRAILL *et al.*, 2018). A quantidade de nitrogênio fixado varia com a espécie, proporção na composição botânica, manejo, sistema de cultivo, N no solo e outras

condições ambientais (SOLLENBERGER; DUBEUX JUNIOR, 2022). Estudos confirmam que gramíneas consorciadas com leguminosas eram beneficiadas com N oriundo da fixação biológica de nitrogênio (FBN) (VILLEGAS *et al.*, 2020). Também existem indícios de que as gramíneas favorecem a FBN, devido a absorverem o N do solo; essa diminuição no teor de N no solo estimula a FBN (LEDGARD; STEELE, 1992).

Em sistemas manejados sob corte, o estoque de C e N de sistemas consorciados ocorre principalmente via sistema radicular, já que a parte aérea é praticamente toda cortada e colhida. Fornara e Tilman (2008) encontraram maior biomassa de raízes em sistemas consorciados de gramínea e leguminosa do que em monocultivo de gramíneas, que pode ser explicado pela maior entrada de N via FBN e a eficiência das gramíneas em utilizar o N.

A hipótese desse estudo é que os serviços ecossistêmicos de provisão, regulação e suporte, como produção de forragem, fixação biológica de nitrogênio e estoques de C e N do solo, são alterados por sistemas de cultivo (monocultivo com fertilização nitrogenada ou consórcio) de capim-elefante e cunhã, em diferentes épocas do ano. Espera-se que a inclusão da cunhã em capineiras de capim-elefante aumente ou mantenha a produção de forragem, fixação biológica de nitrogênio e os estoques de C e N do solo e da planta, em comparação ao monocultivo de capim-elefante.

Com base nisso, objetivou-se estudar serviços ecossistêmicos de provisão, regulação e suporte, e assim foram avaliadas características agrônômicas e químicas da planta, fixação biológica de nitrogênio e estoques de C e N do solo em sistemas de cultivo de capim-elefante e cunhã em diferentes épocas do ano.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Descrição do local e estratégia de amostragem

O experimento foi realizado na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina, da Universidade Federal Rural de Pernambuco (EECAC/UFRPE), em Pernambuco, Brasil (7° 51' 03'' S, 35° 15' 17'' W). O clima do local é do tipo As', de acordo com a classificação de Köppen, caracterizado como tropical seco (ALVAREZ *et al.*, 2013). A pluviosidade e temperatura média anual são 1.100 mm e 24,6 °C, respectivamente. O solo da área experimental é classificado como Argissolo Amarelo Distrocoeso (SANTOS *et al.*, 2018; IUSS Working Group WRB, 2015). Conforme a análise de solo, a classe textural é franca arenosa, e suas principais características físicas e químicas na camada de 0-0,40 m foram: densidade do solo = 1,75 g cm<sup>-3</sup>; pH (H<sub>2</sub>O) = 5,59; Ca<sup>2+</sup> = 1,37 cmolc dm<sup>-3</sup>; Mg<sup>2+</sup> = 0,51

cmolc dm<sup>-3</sup>; K<sup>+</sup> = 0,14 cmolc dm<sup>-3</sup>; Na<sup>+</sup> = 0,04 cmolc dm<sup>-3</sup>; P (Mehlich<sup>-1</sup>) = 17,70 mg dm<sup>-3</sup>; Al<sup>3+</sup> = 0,17 cmolc dm<sup>-3</sup> e H<sup>+</sup> = 3,39 cmolc dm<sup>-3</sup>. Os dados de precipitação no período experimental (fevereiro de 2021 a fevereiro de 2023) são apresentados na Figura 1.

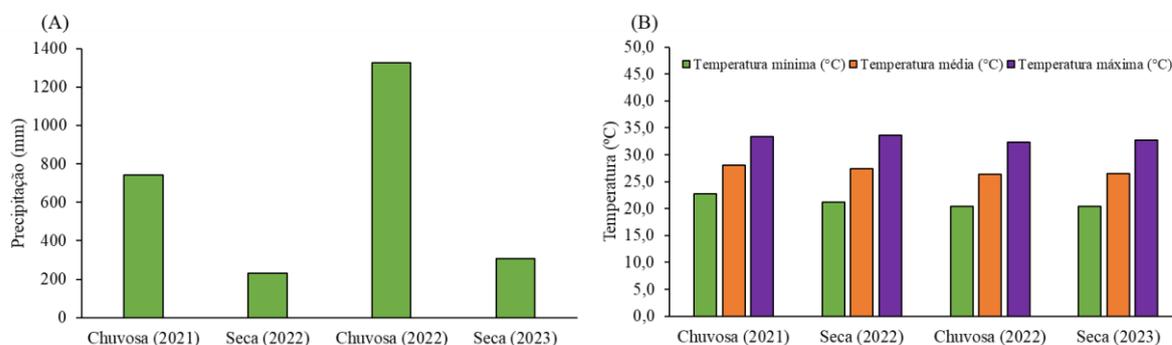


Figura 1. Precipitação (A), temperatura máxima, média e mínima (B) das épocas chuvosas e secas durante o período experimental (2021-2023).

Fonte: Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC).

O experimento foi implantado em 2014, com o plantio dos genótipos de capim-elefante [*Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone.] em sulcos espaçados em 1,0 m, em parcelas de 16 m<sup>2</sup> (4 x 4 m) de área total, com 8 m<sup>2</sup> de área útil (Figura 2). O material de plantio (colmos) foi oriundo do programa de melhoramento genético da UFRPE em parceria com o Instituto Agrônômico de Pernambuco (IPA). Em 2018, foi realizado o plantio da cunhã (*Clitoria ternatea* L.) em covas com espaçamento de 0,5 m, nas entrelinhas do capim-elefante. As sementes de cunhã foram provenientes da Coleção de Plantas Forrageiras do Departamento de Zootecnia, da UFRPE. A quebra da dormência das sementes foi por meio de escarificação física leniente com auxílio de lixa. As sementes foram cultivadas em casa de vegetação na UFRPE, na qual as mudas permaneceram por 60 dias antes do plantio no campo.



Figura 2. Área experimental de Capim-elefante e Cunhã em diferentes sistemas de cultivo.

Foram avaliados diferentes sistemas de cultivo (monocultivo e consórcio) de dois genótipos de capim-elefante com distintos portes (porte alto, Elefante B e baixo, Mott) e cunhã, em diferentes épocas do ano (chuvosa e seca) e profundidades do solo (0–0,10 m, 0,10–0,20 m e 0,20–0,40 m). O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso em arranjo fatorial 5 x 2 (cinco sistemas de cultivo e duas épocas do ano), com quatro repetições. O período chuvoso foi considerado de março a agosto de 2021 e 2022. As amostragens do solo foram realizadas no final deste período (mês de agosto). O período seco foi de setembro a fevereiro de 2022 e 2023. As amostragens do solo foram realizadas no final deste período (mês de fevereiro). As épocas foram definidas com base na precipitação pluviométrica.

## 2.2 Manejo da capineira

A frequência de corte dos genótipos de capim-elefante e da cunhã foi de 60 dias na época chuvosa e de 90 dias na época seca. A intensidade de corte foi ao nível do solo para o capim-elefante e a 20 cm de altura para a cunhã. A adubação foi realizada no plantio e nas épocas chuvosas (três adubações por ano), conforme recomendações de Cavalcanti *et al.* (2008). Após cada colheita, as parcelas de capim-elefante em monocultivo receberam adubação de manutenção com doses de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N (ureia), 70 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (superfosfato simples) e 60 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O (cloreto de potássio), enquanto as parcelas consorciadas com cunhã e o monocultivo da cunhã não receberam as doses de N.

## 2.3 Avaliação das características agronômicas e químicas

As avaliações agronômicas ocorreram entre setembro de 2021 a fevereiro de 2023. Foi mensurada a altura das plantas com auxílio de uma trena métrica, em três plantas por parcela. A Cunhã foi medida do nível do solo até o topo da planta. O Capim-elefante foi medido a partir da base dos perfilhos basais até a inflexão da lâmina foliar mais alta.

A produção de forragem foi obtida pela utilização do método direto. A forragem de cada parcela contida na área útil de 8 m<sup>2</sup> foi pesada fresca e depois separadas as espécies (capim-elefante e cunhã).

O acúmulo de forragem e taxa de acúmulo de forragem foram estimadas por época chuvosa (240 dias) e seca (300 dias), considerando os oito cortes realizados com intervalos de 60 ou 90 dias em 2021 a 2023. Foram estimadas as porcentagens das frações lâmina foliar, colmo (bainha foliar + colmo) e material senescente dos genótipos de capim-elefante, e folha,

caule e vagem de cunhã. Também foram estimadas as relações folha/colmo dos genótipos de capim-elefante, relação folha/caule e relação folha/vagem da cunhã.

As amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Forragicultura Professor Iderval Farias, onde foram realizadas as análises laboratoriais. As amostras de forragem foram imediatamente identificadas e secas em estufa de ventilação forçada de ar, a 55 °C até peso constante. Posteriormente, as amostras foram moídas em moinhos de faca (tipo Willey), com malha de 1 mm. O teor de matéria seca foi determinado conforme Detmann *et al.* (2012).

Para a determinação do teor de C e N do capim-elefante e da cunhã, as amostras foram moídas em moinho de bola MM400 (Retsch, Newton, PA, EUA) até as partículas atingirem tamanho menor que 100 µm. Foram determinados os valores de C e N totais utilizando o analisador CHNS pelo método de combustão a seco Dumas (Vario Micro Cube; Elementar, Hanau, Alemanha). A partir desses valores foram calculadas as relações C/N do material vegetal. Também foram estimados os estoques de C e N dos genótipos de capim-elefante e cunhã a partir dos valores de C e N na planta e a produção de forragem de ambas as espécies.

#### 2.4 Determinação da fixação biológica de nitrogênio da cunhã

Para a quantificação da fixação biológica de nitrogênio da cunhã, amostras das frações folha e caule de aproximadamente 10g foram trituradas em moinho de bola até obtenção de um pó fino e depois encaminhadas a Universidade da Flórida, para determinação da abundância natural de  $^{15}\text{N}$  e %N, utilizando-se espectrômetro de massa acoplado a um autoanalisador. A fixação biológica de nitrogênio da cunhã foi estimada utilizando-se a técnica da abundância natural de  $^{15}\text{N}$ , com o percentual de nitrogênio da planta derivado da atmosfera (%N<sub>dda</sub>), calculado através da seguinte fórmula (SHEARER; KOHL, 1986):

$$\% \text{ Ndda} = \frac{\delta^{15}\text{N planta referência} - \delta^{15}\text{N planta fixadora}}{\delta^{15}\text{N planta referência} - B} \times 100$$

Em que:

% N<sub>dda</sub> = porcentagem de N proveniente da FBN na planta fixadora;

$\delta^{15}\text{N}$  referência = Abundância natural de  $^{15}\text{N}$  na planta referência;

$\delta^{15}\text{N}$  fixadora = Abundância natural de  $^{15}\text{N}$  na planta fixadora.

B: valor da discriminação isotópica de  $^{15}\text{N}$  feita pelas plantas durante o processo de FBN.

Neste estudo, o valor de B foi considerado igual a -1,07‰ (LADHA *et al.*, 1996).

As plantas referência utilizadas foram: tapeiçava (*Scoparia dulcis* L.), vassourinha de botão (*Richardia scabra* L.) e a xanana (*Turnera subulata* Sm.), plantas de ocorrência natural na área experimental e que não fixam N.

A quantidade de N fixado biologicamente pela cunhã por kg ha<sup>-1</sup>, foi determinada por:

$$\text{FBN (kg ha}^{-1}\text{)} = ((\text{N} \times \text{PMS}/100) \times \text{Ndda})/100$$

Em que:

N (%) = teor de N

PMS (kg MS ha<sup>-1</sup>) = produção de forragem

Ndda (%) = N proveniente da FBN na planta fixadora

## 2.5 Análises de solo

As amostras de solo foram secas ao ar, homogeneizadas e peneiradas a 2 mm para remoção de resíduos vegetais e separadas para análise de composição química e granulométrica. Em seguida, as subamostras foram peneiradas em 250 µm (60 mesh). As análises laboratoriais foram realizadas no Laboratório de Forragicultura Professor Iderval Farias. O teor de carbono orgânico total do solo (COT) foi obtido pelo método de oxidação via úmida, segundo metodologia descrita por Yeomans e Bremner (1988). O nitrogênio total (NT) do solo foi determinado pelo método Kjeldahl, descrito por Tedesco *et al.* (1995).

A densidade do solo (Ds) foi determinada para todas as amostras de solo de cada profundidade (0-10, 10-20 e 20-40 cm), usando um cilindro de aço, de acordo com a Embrapa (1997). Os estoques de C e N do solo foram determinados pela equação abaixo, de acordo com Bernoux *et al.* (2002). Em seguida, os estoques finais tiveram seus valores corrigidos pelo método de massa fixa, conforme Sisti *et al.* (2004):

$$\text{Est} = \text{Ds} \times \text{A} \times \text{T}$$

Em que “Est” é o estoque de C ou N do solo, convertido em Mg ha<sup>-1</sup>; “Ds” é a densidade do solo (g cm<sup>-3</sup>); “A” é a camada do solo (cm); e “T” é o teor de C ou N do solo (g kg<sup>-1</sup>).

## 2.6 Análise estatística

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade dos resíduos e homoscedasticidade, à ANOVA, e analisados com auxílio do PROC MIXED do SAS® OnDemand for Academics (SAS, 2014). Os efeitos fixos foram os sistemas de cultivos e épocas do ano, analisados separadamente para cada profundidade do solo, sendo esta última analisada separadamente.

Os blocos foram considerados como efeitos aleatórios. Quando o teste F foi significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Análise de componentes principais, com base na matriz de correlação de Pearson ( $\alpha = 0,05$ ), foi realizada para estudar as relações entre as variáveis dependentes e os tratamentos (sistemas de cultivo e época do ano). Os dados foram exibidos em vetores ortogonais, e a matriz de correlação foi apresentada em biplots. Os resultados individuais de cada tratamento e sua distribuição foram sobrepostos no mapa biplot. A análise foi realizada no software RStudio (RStudio 2023.12.1 Build 402).

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Características agronômicas

A altura dos genótipos de capim-elefante foi modificada pela interação do sistema de cultivo x época do ano (Figura 3). Durante a época chuvosa e seca, o elefante B em monocultivo e elefante B + cunhã apresentaram a maior altura de planta (115 e 107 cm), em comparação ao Mott e Mott + cunhã (72 e 64 cm). A altura dos genótipos não diferiu nas épocas do ano, independente do sistema de cultivo.

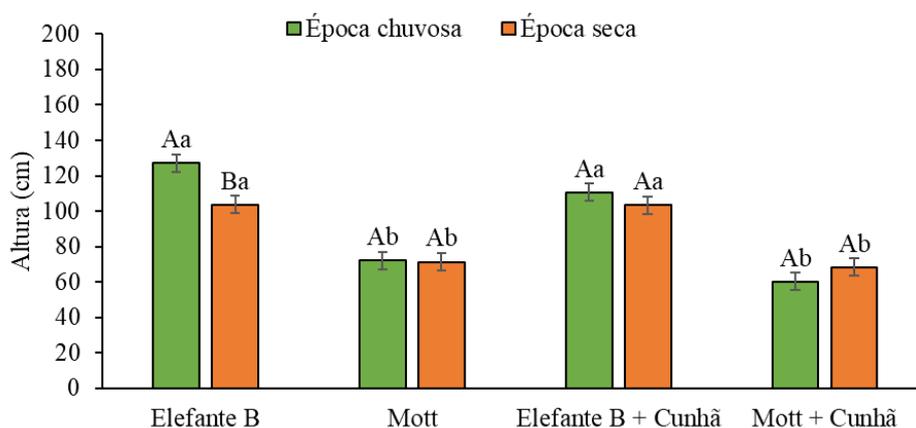


Figura 3. Altura dos genótipos de Capim-elefante, consorciados ou não com a Cunhã, em diferentes épocas do ano.

Letras maiúsculas diferentes indicam diferença significativa dentro de cada sistema de cultivo; letras minúsculas diferentes indicam diferença significativa dentro de cada época do ano pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras indicam o erro padrão da média.

Também foi observado que a cunhã em monocultivo (41 cm) apresentou maior altura, em comparação à consorciada com elefante B e Mott (33 e 33 cm). Porém, a altura da cunhã entre os consórcios não diferiu (Figura 4 A). Em relação às épocas do ano, observou-se que a cunhã apresentou maior altura na época chuvosa (Figura 4 B).

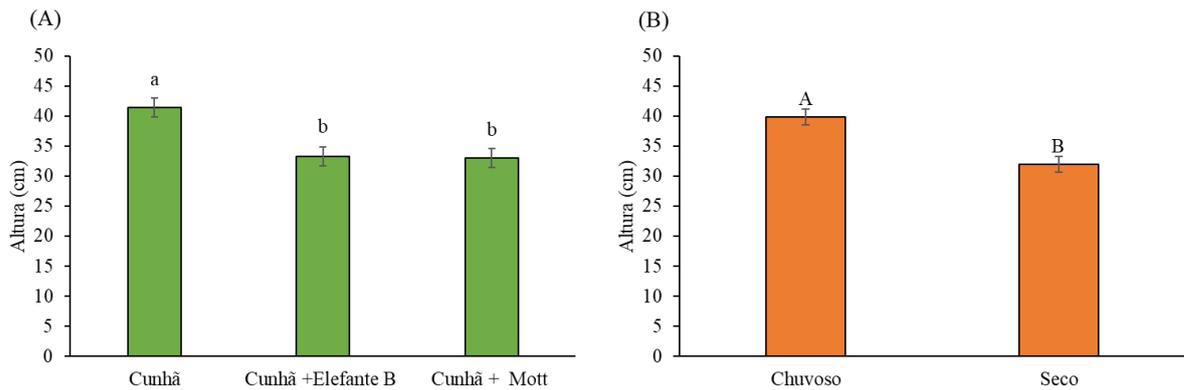


Figura 4. Altura da cunhã consorciada ou não com genótipos de capim-elefante (A) em diferentes épocas do ano (B).

Letras maiúsculas e minúsculas diferentes indicam diferença entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras indicam o erro padrão da média.

A cunhã apresentou menores acúmulo de forragem e taxa de acúmulo de forragem em comparação com os genótipos de capim-elefante (Figuras 5A e C). No entanto, foi observado que o Mott em monocultivo e em consórcio não diferiram entre si para essas variáveis. Já o elefante B em monocultivo apresentou maior acúmulo de forragem e taxa de acúmulo de forragem do que quando consorciado com a cunhã. Não foi encontrada diferença entre os genótipos de capim-elefante para acúmulo de forragem e taxa de acúmulo de forragem.

Em relação às épocas do ano, não houve diferença significativa para acúmulo de forragem. A taxa de acúmulo de forragem foi maior na época chuvosa (Figuras 5B e D).

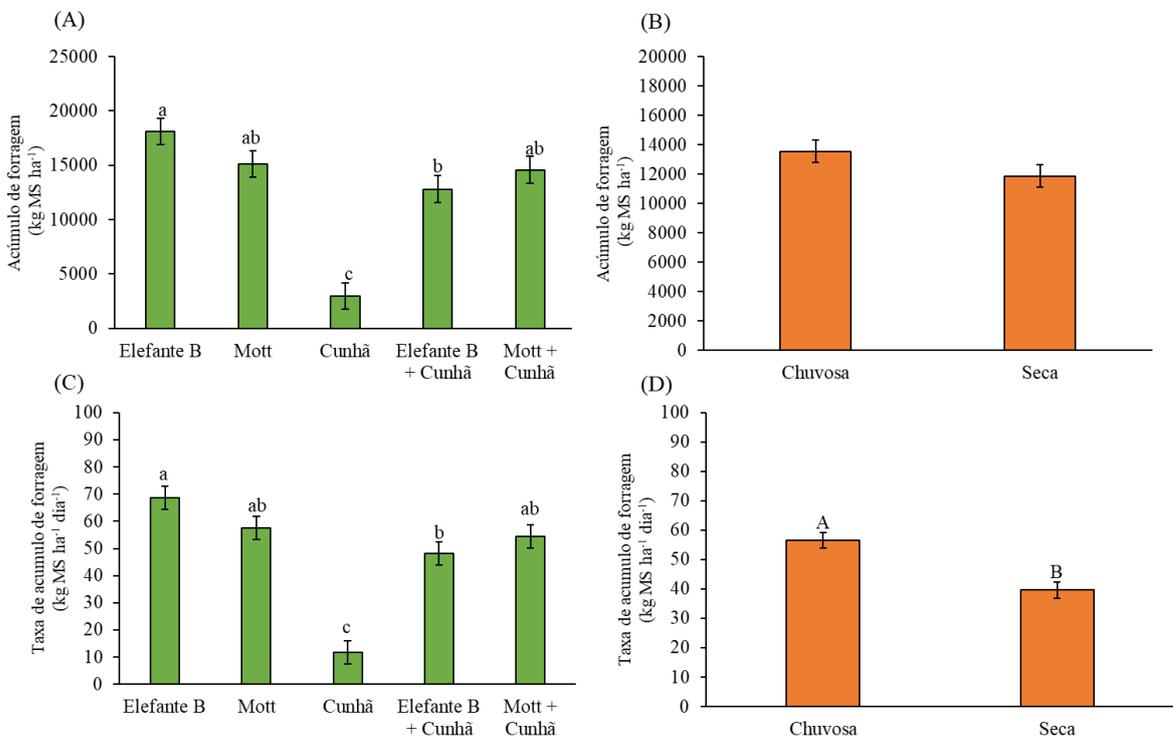


Figura 5. Acúmulo de forragem (A e B) e taxa de acúmulo de forragem (C e D) de Capim-elefante e Cunhã em diferentes sistemas de cultivo e épocas do ano.

Letras maiúsculas e minúsculas diferentes indicam diferença entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras indicam o erro padrão da média.

A cunhã em monocultivo apresentou maior acúmulo de forragem e taxa de acúmulo de forragem durante a época chuvosa (4.925 kg MS ha<sup>-1</sup> e 21 kg MS ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>), do que a época seca (1.037 kg MS ha<sup>-1</sup> e 3 kg MS ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>). Já os sistemas consorciados não diferiram entre as épocas (Figuras 6A e B).

Na época chuvosa, a cunhã em monocultivo (4.925 kg MS ha<sup>-1</sup> e 21 kg MS ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>) apresentou maior acúmulo de forragem e taxa de acúmulo de forragem, em comparação aos consórcios (697 kg MS ha<sup>-1</sup> e 3 kg MS ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>). Porém, na época seca, os diferentes sistemas de cultivo com cunhã não diferiram entre si (Figuras 6A e B).

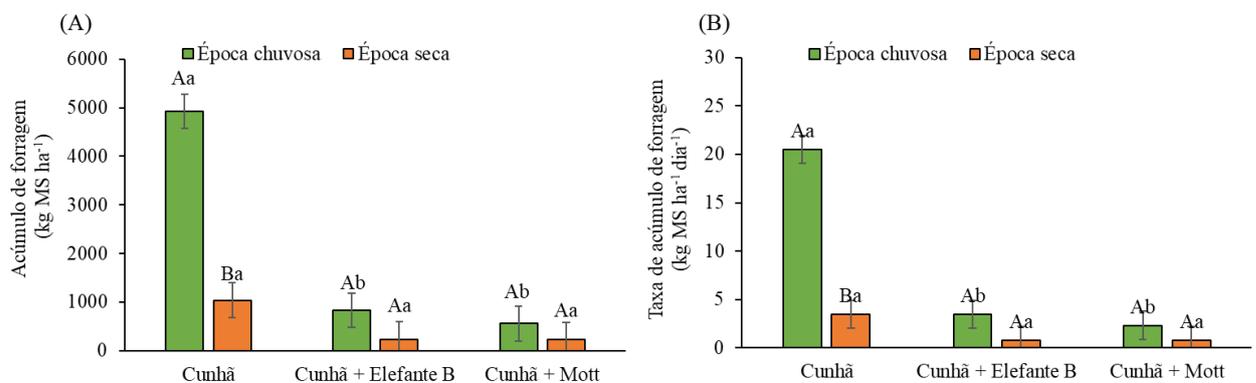


Figura 6. Acúmulo de forragem (A) e taxa de acúmulo de forragem (B) de cunhã em diferentes sistemas de cultivo e épocas do ano.

Letras maiúsculas diferentes indicam diferença significativa dentro de cada sistema de cultivo; letras minúsculas diferentes indicam diferença significativa dentro de cada época do ano pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras indicam o erro padrão da média.

Para a composição botânica, houve diferença significativa entre os sistemas de cultivo, onde houve maior proporção de Mott do que elefante B nos sistemas consorciados. Em relação à cunhã, houve maior proporção da leguminosa no consórcio com elefante B (Figura 7A). No entanto, foi observada maior proporção de capim-elefante na época seca, em comparação com a época chuvosa (Figura 7B). O contrário foi observado para a proporção de cunhã, com maior proporção na época chuvosa.

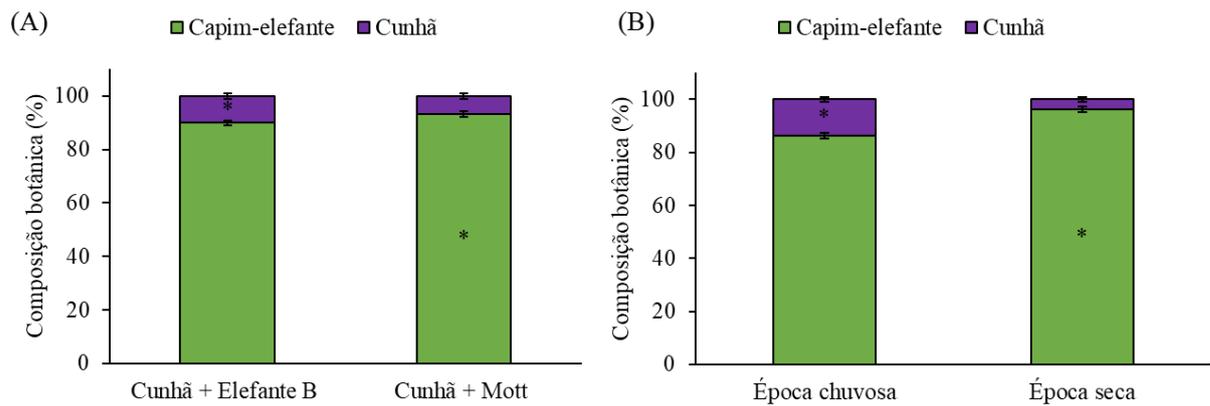


Figura 7. Composição botânica de capim-elefante e cunhã em diferentes sistemas de cultivo (A) e épocas do ano (B).

Letras maiúsculas diferentes indicam diferença entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras indicam o erro padrão da média.

Em relação à composição morfológica, os genótipos de capim-elefante apresentaram maior proporção de folhas na época seca (50%) do que na época chuvosa (43%; Figura 8A). Também foi observado que o Mott em monocultivo apresentou maior proporção de folhas (52%), em comparação aos demais sistemas de cultivo (44%).

Os genótipos de capim-elefante apresentaram maior proporção de colmo na época chuvosa (39%) do que a época seca (31%; Figura 8A). O elefante B e o Mott, em monocultivo ou consorciado, não apresentaram diferenças na proporção de colmo.

Durante a época chuvosa e seca, o elefante B e o Mott em monocultivo não diferiram, em relação à proporção de material senescente dos seus respectivos consórcios com a cunhã, em média 19% (Figura 8A). No entanto, o elefante B em monocultivo apresentou maior proporção de material senescente na época seca (20%) do que na época chuvosa (11%). Nos demais sistemas de cultivo não foi observada diferença entre épocas do ano.

Os genótipos de capim-elefante apresentaram maior relação folha/colmo na época seca (2,0) em comparação à época chuvosa (1,2; Figura 8B). O Mott em monocultivo obteve maior relação folha/colmo (2,2) do que os demais sistemas de cultivo (1,4).

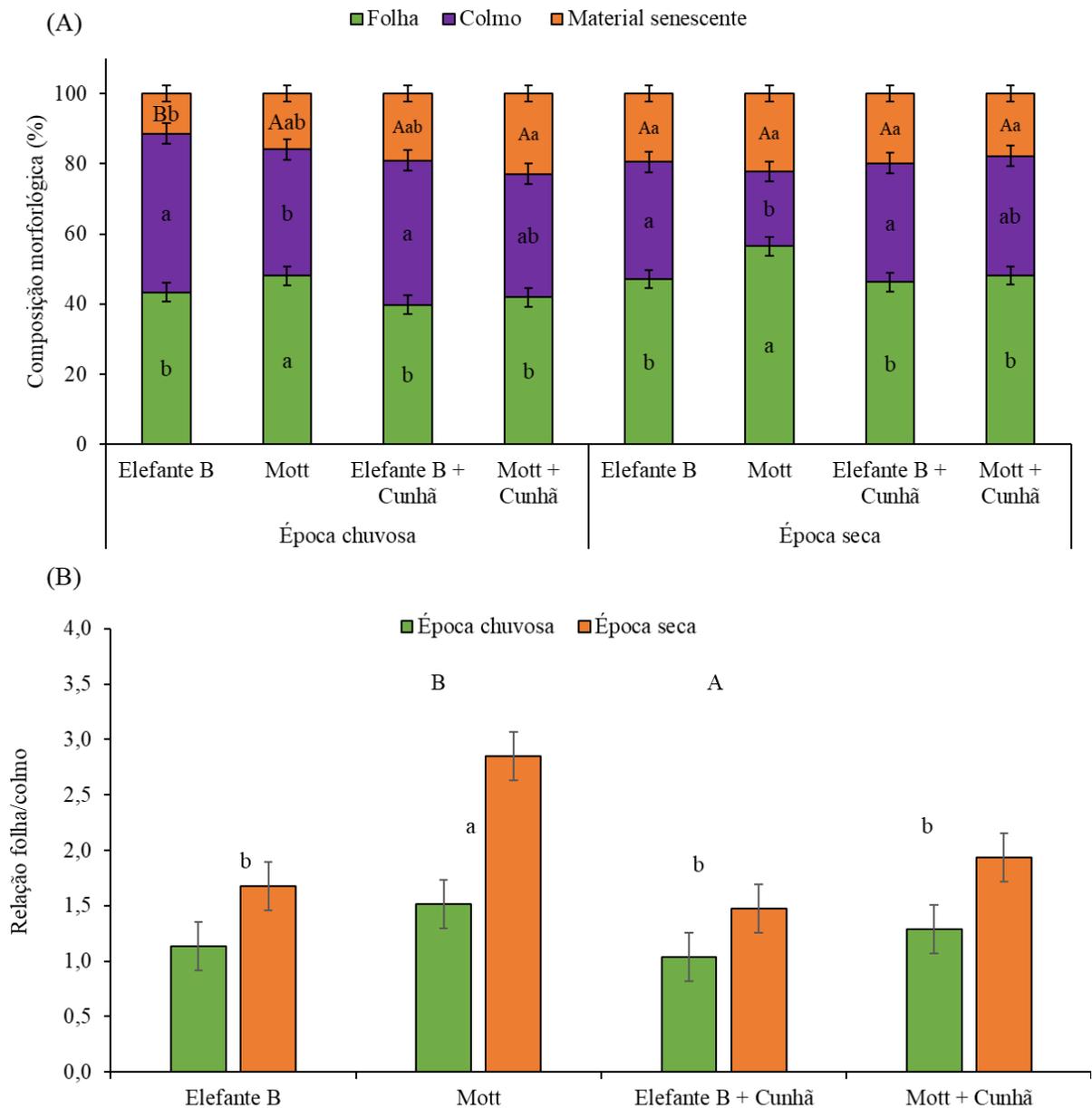


Figura 8. Composição morfológica (A) e relação folha/colmo (B) de capim-elefante em diferentes sistemas de cultivo e épocas do ano.

Letras maiúsculas diferentes indicam diferença significativa dentro de cada sistema de cultivo; letras minúsculas diferentes indicam diferença significativa dentro de cada época do ano pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras indicam o erro padrão da média.

Na época chuvosa, a proporção de folha da cunhã não diferiu entre os diferentes sistemas de cultivo (50%). Na época seca, a cunhã + Mott (64%) apresentou maior proporção de folha, do que a cunhã em monocultivo (50%) e a cunhã + elefante B (44%). No entanto, a proporção de folha da cunhã em monocultivo e consorciada com o elefante B foram semelhantes na época chuvosa e seca (Figura 9).

Não houve diferença significativa para a proporção de caule de cunhã para os diferentes sistemas de cultivo e épocas do ano, em média 32% (Figura 9).

A proporção de vagem de cunhã foi maior no consórcio com elefante B (27%) do que com Mott (14%). Porém, o monocultivo não diferiu do consórcio com elefante B (Figura 9).

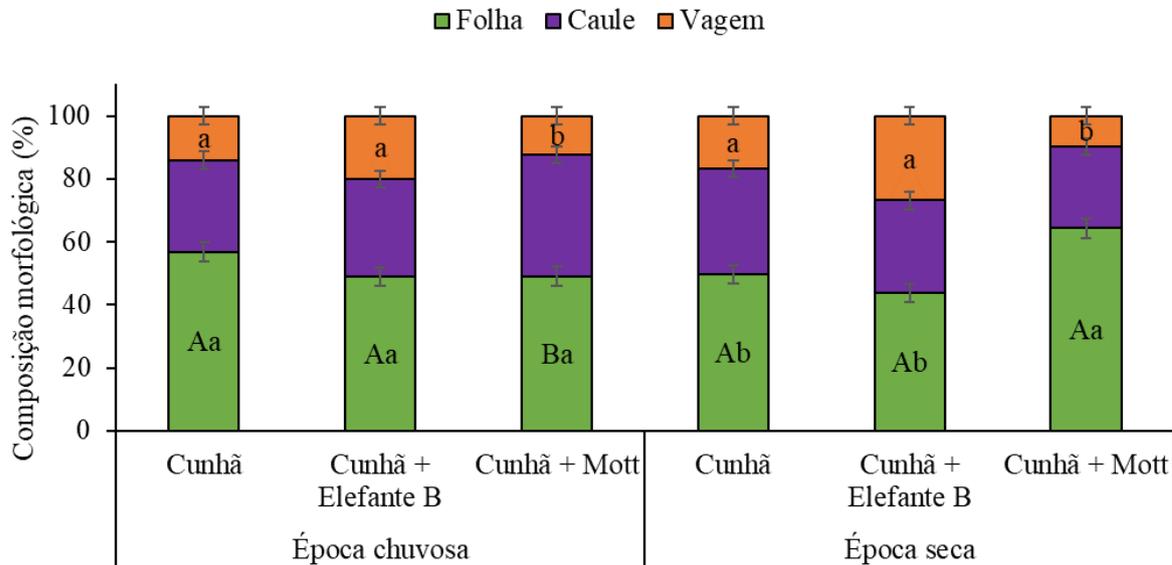


Figura 9. Composição morfológica de cunhã em diferentes sistemas de cultivo e épocas do ano. Letras maiúsculas diferentes indicam diferença significativa dentro de cada sistema de cultivo; letras minúsculas diferentes indicam diferença significativa dentro de cada época do ano pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras indicam o erro padrão da média.

Para a relação folha/caule da cunhã, notou-se que os diferentes sistemas de cultivo não diferiram na época chuvosa (1,6; Figura 10A). Já na época seca, a cunhã + Mott se destacou com maior relação folha/caule (3,0) quando comparada ao monocultivo (1,5). Também foi observado que cunhã + Mott apresentou maior relação folha/caule na época seca (3,0) do que na época chuvosa (1,3). No entanto, a relação folha/caule da cunhã em monocultivo e a cunhã + elefante B não diferiu entre as épocas do ano.

Não houve diferença significativa para a relação folha/vagem da cunhã para os diferentes sistemas de cultivo e época do ano, com média de 2,3 (Figura 10B).

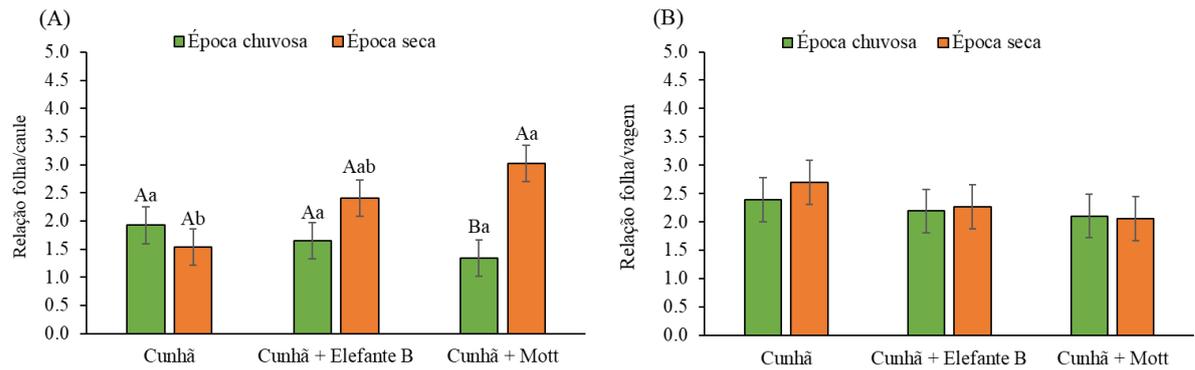


Figura 10. Relação folha/colmo (A) e folha/vagem (B) de cunhã em diferentes sistemas de cultivo e épocas do ano.

Letras maiúsculas diferentes indicam diferença significativa dentro de cada sistema de cultivo; letras minúsculas diferentes indicam diferença significativa dentro de cada época do ano pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras indicam o erro padrão da média.

### 3.2 Estoque e teor de C e N na planta

O elefante B e o Mott, em monocultivo ou consorciado, não diferiram no teor de C e N e relação C/N (Tabela 1). Não houve diferença significativa para a estoque de C e N do capim-elefante para os diferentes sistemas de cultivo. Na época chuvosa, houve menor teor de C e maior estoque de N na planta, em comparação ao observado na época seca.

Tabela 1. Teor e estoque de carbono, nitrogênio e relação C/N de capim-elefante em diferentes sistemas de cultivo e épocas do ano

Sistema de cultivo	C		N	C/N	Estoque de C	Estoque de N
	%					
Elefante B	39,35 a	1,46 ab	28,00 ab	10,52	26,77	
Mott	38,24 bc	1,61 a	24,18 b	11,48	30,16	
Elefante B + cunhã	39,04 ab	1,31 b	31,49 a	11,55	29,66	
Mott + cunhã	37,94 c	1,40 ab	27,24 ab	15,20	40,38	
EPM	0,215	0,06	1,41	1,66	4,36	
<b>Época do ano</b>						
Chuvosa	37,92 b	1,48	27,44	13,80	36,52 a	
Seca	39,37 a	1,41	28,01	10,57	26,98 b	
EPM	0,15	0,04	1,00	1,20	3,13	

Médias seguidas por letras minúsculas diferentes indicam diferença entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). EPM: Erro padrão da média.

Não houve diferença significativa para a teor de C e N e relação C/N da cunhã nos diferentes sistemas de cultivo de capim-elefante. Em relação a época do ano, a maior relação C/N foi encontrada na época seca (Tabela 2).

Tabela 2. Teor de carbono, nitrogênio e relação C/N de cunhã em diferentes sistemas de cultivo e épocas do ano

Sistema de cultivo	C		N	C/N
	%			
Cunhã	41,15	4,36	9,72	
Cunhã +elefante B	41,65	4,36	9,88	
Cunhã + Mott	41,71	4,73	9,10	
EPM	0,29	0,23	0,46	
Época do ano				
Chuvoso	41,48	4,77	8,91 b	
Seco	41,53	4,25	10,23 a	
EPM	0,24	0,19	0,37	

Médias seguidas por letras minúsculas diferentes indicam diferença entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). EPM: Erro padrão da média.

Para o estoque de C e N, observou-se que na época chuvosa ocorreu maior estoque de C na cunhã em monocultivo do que consorciada. No entanto, na época seca, o estoque de C não difere os sistemas de cultivo de cunhã (Figuras 11A e B). Também, nota-se que nos sistemas consorciados não diferem entre épocas do ano, porém, o monocultivo apresentou maior estoque de C e N na época chuvosa.

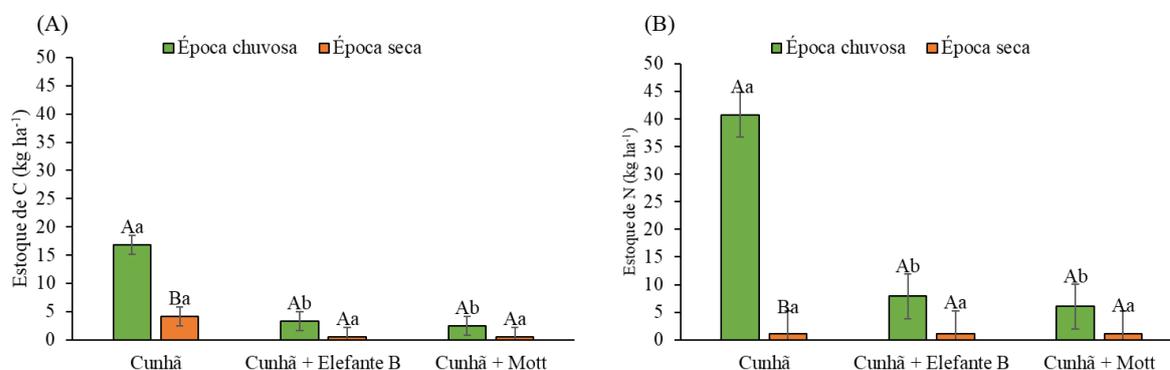


Figura 11. Estoques de carbono (A) e nitrogênio (B) de Cunhã em diferentes sistemas de cultivo e épocas do ano. Letras maiúsculas diferentes indicam diferença significativa dentro de cada sistema de cultivo; letras minúsculas diferentes indicam diferença significativa dentro de cada época do ano pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras indicam o erro padrão da média.

### 3.3 Fixação biológica de N

A cunhã, em monocultivo ou consorciado, não diferiu na proporção de N derivado da atmosfera (Figura 12A). Para fixação biológica de N, observou-se que na época chuvosa ocorreu maior fixação de N na cunhã em monocultivo do que em consórcio. No entanto, na época seca, o N fixado não difere entre os sistemas de cultivo de cunhã. Também observou-se que os sistemas consorciados não diferiram entre épocas do ano, porém, o monocultivo

apresentou maior FBN na época chuvosa (Figura 12B). Em relação ao N fixado no ano, notou-se maior fixação anual na cunhã em monocultivo do que nos consórcios com capim-elefante (Figura 12C).

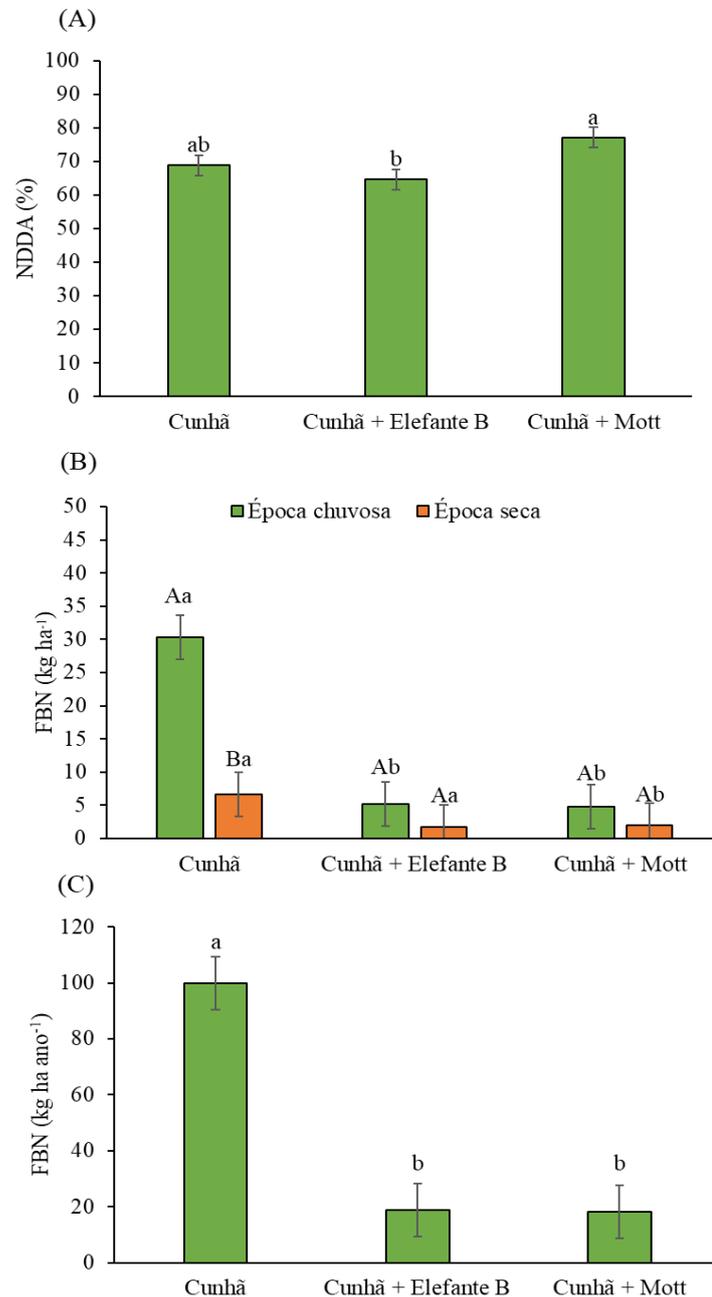


Figura 12. Quantidade de nitrogênio derivado da atmosfera (A) e nitrogênio fixado (B e C) na biomassa aérea da cunhã consorciada ou não com genótipos de capim-elefante em diferentes épocas do ano. Letras maiúsculas diferentes indicam diferença significativa dentro de cada sistema de cultivo; letras minúsculas diferentes indicam diferença significativa dentro de cada época do ano pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras indicam o erro padrão da média.

### 3.4 Estoque e teor de C e N no solo

O teor de nitrogênio total (NT) do solo foi influenciado pela interação do sistema de cultivo x época do ano na profundidade de 0-0,10 m (Figura 13). O elefante B e o Mott em

consórcio com a cunhã apresentaram maior NT na época chuvosa ( $0,98 \text{ g kg}^{-1}$ ) do que na época seca ( $0,82 \text{ g kg}^{-1}$ ). Na época chuvosa, os diferentes sistemas de cultivo não diferiram para NT ( $0,98 \text{ g kg}^{-1}$ ). No entanto, na época seca, o elefante B e o Mott em monocultivo ou consorciado não apresentaram diferenças no teor de NT do solo ( $0,88 \text{ g kg}^{-1}$ ).

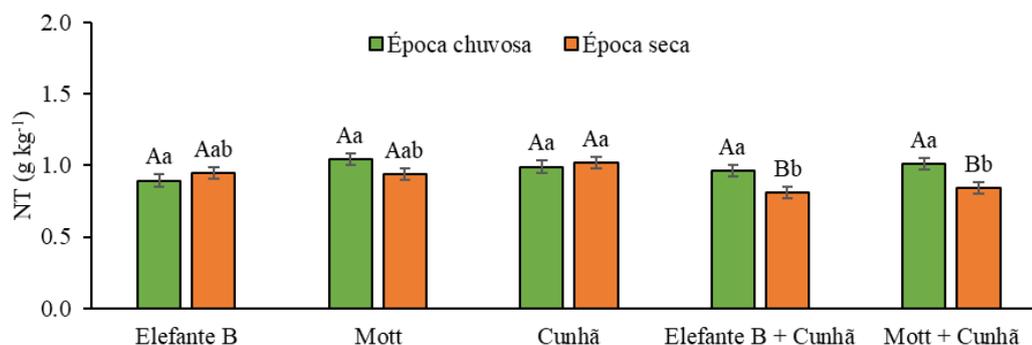


Figura 13. Teor de N do solo em diferentes sistemas de cultivos e época do ano na profundidade de 0-0,10 m. Letras maiúsculas diferentes indicam diferença significativa dentro de cada sistema de cultivo; letras minúsculas diferentes indicam diferença significativa dentro de cada época do ano pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras indicam o erro padrão da média.

O teor e o estoque de C não apresentaram diferença significativa entre os sistemas de cultivo na profundidade de 0-0,40 m (Tabela 3). No entanto, foram influenciados pela época do ano. Observou-se maior teor e armazenamento de C do solo na época seca na profundidade de 0-0,40 m.

Em relação ao estoque de N, os solos com elefante B e Mott em monocultivo não apresentaram diferenças no estoque quando consorciado com cunhã na profundidade de 0,20-0,40 m. A época chuvosa proporcionou maior estoque de N no solo, em comparação à época seca (Tabela 3).

A relação C/N não diferiu significativamente entre os sistemas de cultivo na profundidade de 0-0,40 m (Tabela 3). No entanto, observou-se maior relação C/N do solo na época seca do que a época chuvosa na profundidade de 0-0,40 m.

O teor de C não diferiu estatisticamente nas profundidades de solo. O teor de N, estoque de C e N e a relação C/N foram modificados pelas diferentes profundidades. Na profundidade 0-0,10 m houve 14% mais N, do que 0,10-0,40 m. Já para o estoque de C e N, foi observado que a profundidade de 0,20-0,40 m estocou 52% e 48% mais C e N do que na camada de 0-0,20 m. A menor relação C/N foi encontrada na profundidade de 0-0,10 m.

Tabela 3. Teor e estoque de C e N do solo em diferentes sistemas de cultivos, época do ano e profundidades.

Sistema de cultivo	0-0,10 m				
	COT	NT	C/N	Estoque de C	Estoque de N
	g kg <sup>-1</sup>			Mg ha <sup>-1</sup>	
Elefante B	14,27	0,92	15,55	23,01	1,48
Mott	13,74	0,99	14,17	20,94	1,51
Cunhã	13,44	1,00	13,34	21,06	1,58
Elefante B + Cunhã	13,13	0,88	15,12	20,63	1,39
Mott + cunhã	13,62	0,92	15,04	22,10	1,50
EPM	0,75	0,03	0,80	1,26	0,05
Época do ano					
Chuvosa	12,70 b	0,98	13,19 b	20,12 b	1,54 a
Seca	14,58 a	0,91	16,10 a	22,98 a	1,44 b
EPM	0,47	0,02	0,50	0,80	0,03
0,10-0,20 m					
Sistema de cultivo					
Elefante B	13,22	0,85	16,20	24,31	1,57
Mott	13,02	0,91	14,61	23,92	1,67
Cunhã	13,15	0,79	16,92	23,82	1,44
Elefante B + Cunhã	13,11	0,78	17,74	24,30	1,45
Mott + cunhã	13,91	0,83	17,09	24,77	1,48
EPM	0,84	0,03	1,33	1,65	0,07
Época do ano					
Chuvosa	12,09 b	0,88 a	14,43 b	22,01 b	1,60 a
Seca	14,48 a	0,79 b	18,60 a	26,44 a	1,45 b
EPM	0,53	0,02	0,84	1,04	0,04
0,20 -0,40 m					
Sistema de cultivo					
Elefante B	11,81	0,83	14,63	47,87	3,21 a
Mott	12,52	0,79	16,65	49,82	3,16 a
Cunhã	12,51	0,72	17,63	44,28	2,54 b
Elefante B + Cunhã	13,21	0,79	17,87	47,87	2,85 ab
Mott + cunhã	14,07	0,80	18,19	47,87	2,81 ab
EPM	0,82	0,03	1,46	3,45	0,18
Época do ano					
Chuvosa	11,35 b	0,81	14,67 b	42,00 b	2,98
Seca	14,30 a	0,77	19,31 a	52,62 a	2,85
EPM	0,52	0,02	0,92	2,30	0,14

Médias seguidas por letras minúsculas diferentes indicam diferença entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). COT: Carbono orgânico total. NT: Nitrogênio total. EPM: Erro padrão da média.

### 3.5 Análise de componentes principais

O primeiro componente principal (CP1) explicou 39% da variação e agrupou principalmente COT, ESTC, NT, CN, ESTN, fol e rfc (quadrantes direito) versus col

(quadrantes esquerdos). O segundo componente principal (CP2) explicou 19% da variação e agrupou alt, cnp, np, cp (quadrantes abaixo) versus estcp, ams, tams, np, estcp (quadrantes acima).

A Análise de Componentes Principais (ACP) permitiu identificar padrões de associação com as variáveis dependentes diferentes entre os sistemas de cultivo de capim-elefante (Figura 14). O Mott em monocultivo com np, fol e rfc, característica da planta, e NT, COT, ESTN e ESTC, do solo (CP1), para os outros sistemas de cultivo, foi mais associado ao CP2. O elefante B em monocultivo ou consorciado com a cunhã foram mais associados a alt, msen, cp e CN. O Mott consorciado com a cunhã foi mais associado a ams, tams, estcp e estnp.

A época seca foi mais associada ao CP1; explicou 39% da variação e agrupou principalmente as variáveis relacionadas ao solo COT, ESTC, NT, CN, ESTN, fol e rfc e col, enquanto a época chuvosa foi mais associada ao CP2 (19%) e nesse foram agrupados principalmente variáveis relacionadas à planta e à sua produtividade como tams, mas, alt, np, estcp e estnp.

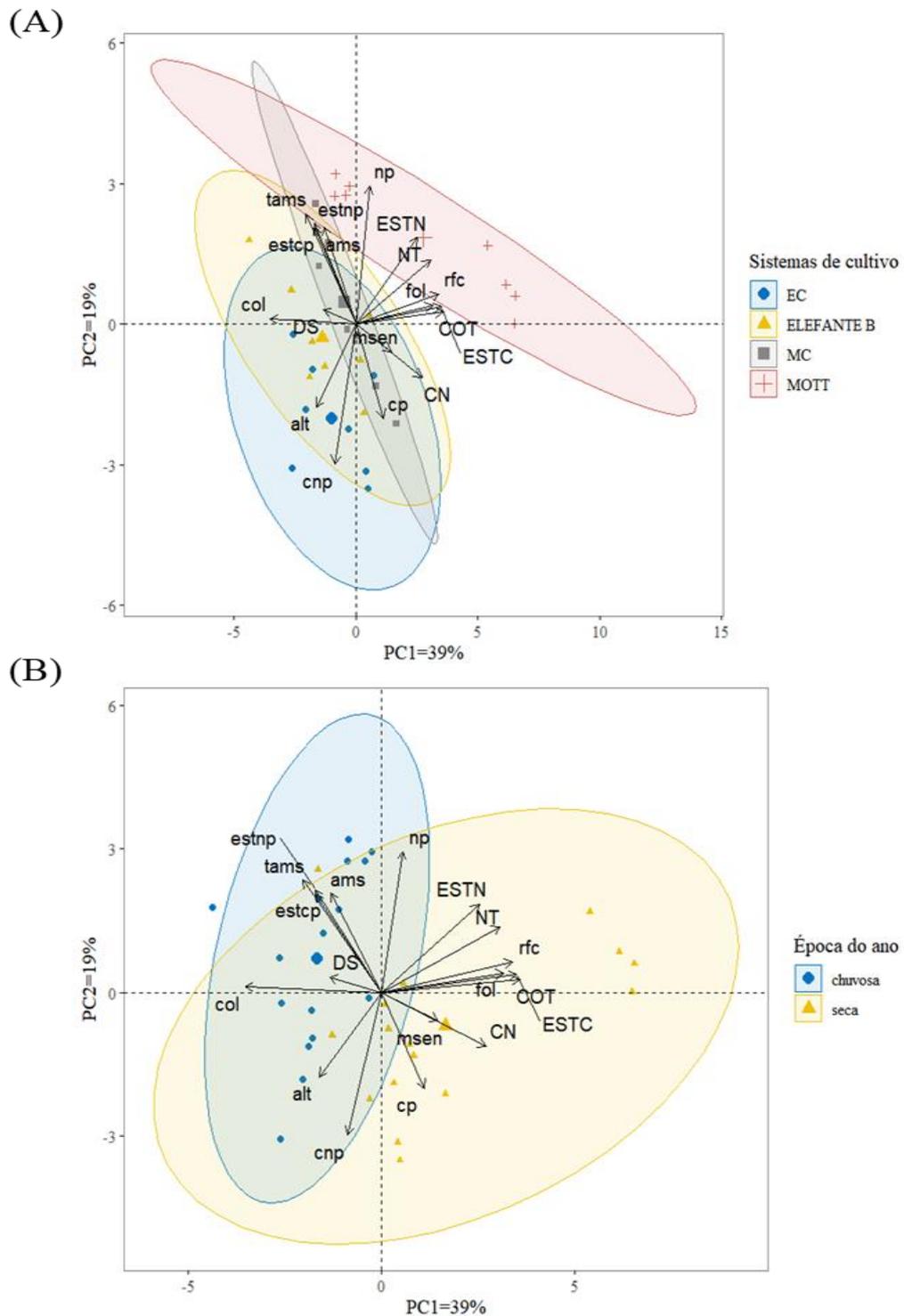


Figura 14. Análise de componentes principais para as variáveis relacionadas à produtividade das forrageiras, teor e estoque de C e N no planto e no solo de diferentes sistemas de cultivo de capim-elefante (monocultivo ou consorciado com cunhã, A), e épocas do ano (B). As elipses indicam intervalos de confiança de 95%. DS: densidade do solo, COT: carbono orgânico do solo, NT: nitrogênio total, CN: relação C/N, ESTC: estoque de carbono, ESTN: estoque de nitrogênio, ams: acúmulo de forragem, tams: taxa de acúmulo de forragem, alt: altura, fol: folha, col: colmo, msen: material senescente, rfc: relação folha/colmo, cnp: relação C/N da planta, np: nitrogênio da planta, cp: carbono da planta, estcp: estoque de carbono da planta e estnp: estoque de nitrogênio da planta.

O primeiro componente principal (CP1) explicou 35% da variação e agrupou principalmente estcp, estnp, tams, fbn, ams, alt e COT. Já o segundo (CP2) explicou 15% da variação e agrupou cn, n, fol, vag, ndda, NT, DS e ESTC.

A ACP permitiu identificar padrões de associação com as variáveis dependentes diferentes entre os sistemas de cultivo de cunhã (Figura 15). A cunhã em monocultivo foi mais associada ao CP1. E os sistemas de cultivos consorciados de cunhã com os diferentes portes de capim-elefante apresentaram maior associação com o CP2. A época do ano foi claramente distinguida pela ACP. A época chuvosa foi mais associada ao CP1, em que as variáveis mais associadas foram estcp, estnp, tams, ams e fbn, e a época seca CP2, foi mais relacionada ao ESTC, ESTN, COT, DS, cn, vag.

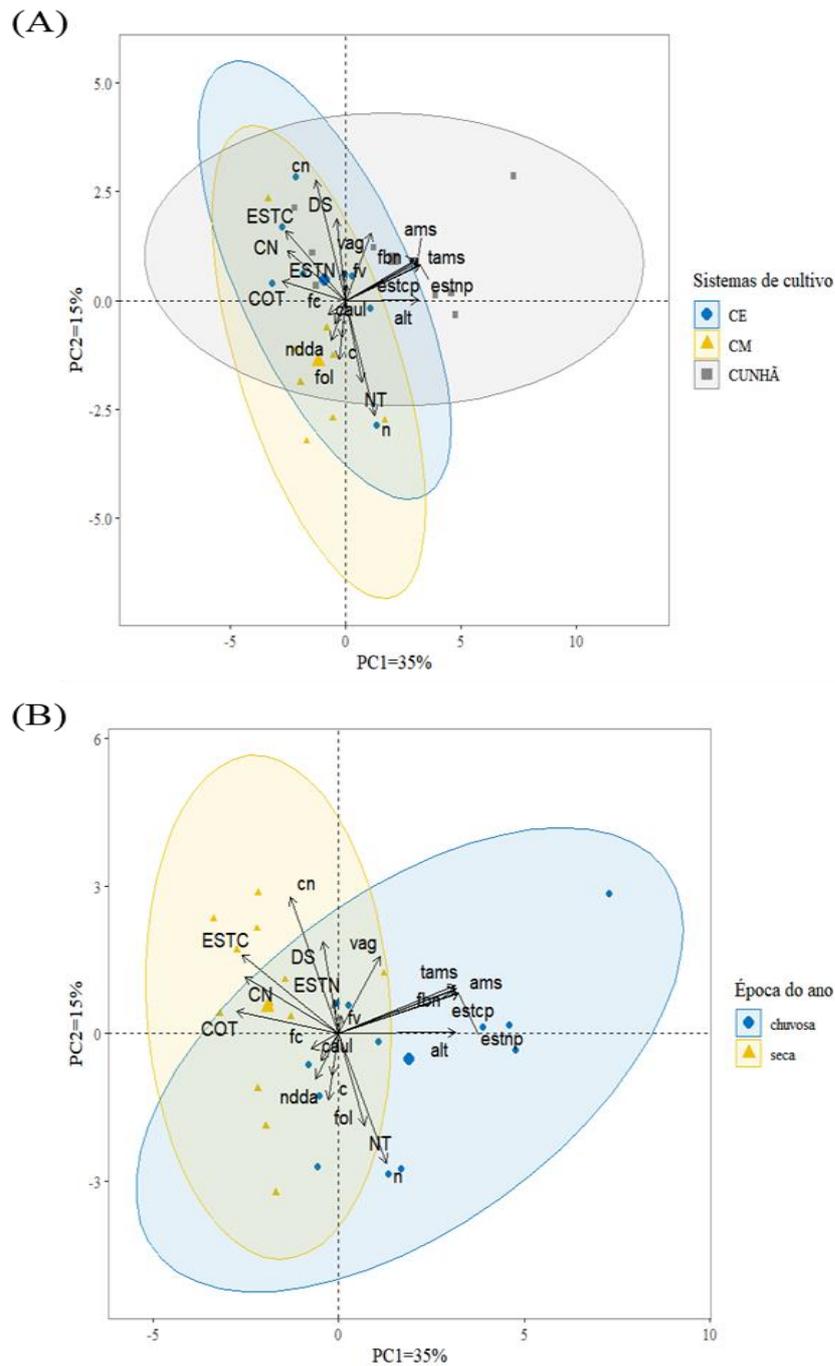


Figura 15. Análise de componentes principais para as variáveis relacionadas à produtividade das forrageiras, fixação biológica de nitrogênio, teor e estoque de C e N na planta e no solo de diferentes sistemas de cultivo de cunhã (monocultivo ou consorciado com capim-elefante (A) e épocas do ano (B)). As elipses indicam intervalos de confiança de 95%. DS: densidade do solo, COT: carbono orgânico do solo, NT: nitrogênio total, CN: relação C/N, ESTC: estoque de carbono, ESTN: estoque de nitrogênio, ams: acúmulo de forragem, tams: taxa de acúmulo de forragem, alt: altura, fol: folha, caul: caule, vag: vagem, fc: relação folha/caule, fv: relação folha/vagem, cn: relação C/N da planta, n: nitrogênio da planta, c: carbono da planta, estcp: estoque de carbono da planta, estnp: estoque de nitrogênio da planta, fbn: fixação biológica de nitrogênio e ndda: nitrogênio derivado da atmosfera.

## 4 DISCUSSÃO

A maior altura de planta encontrada no genótipo elefante B, em monocultivo ou consorciado, em comparação ao genótipo Mott, é explicada pelo porte desse genótipo (Figura 3). O elefante B, também conhecido como Merker, pertence ao grupo dos genótipos de porte alto (CUNHA *et al.*, 2011). Já o Mott pertence ao grupo de genótipos de porte baixo, com entrenós curtos, o que lhe confere menor altura (SILVA *et al.*, 2021). Apesar da diferença entre altura do elefante B e Mott no monocultivo, ambos não apresentaram acúmulo de forragem e taxa de acúmulo de forragem diferentes (Figura 5), evidenciando o potencial produtivo do capim-elefante de porte baixo (SILVA *et al.*, 2023).

A altura da cunhã não foi modificada pelos consórcios com genótipos de capim-elefante de distintos portes (Figura 4). A maior altura (Figura 4), o maior acúmulo de forragem e a taxa de acúmulo de forragem (época chuvosa; Figura 6) da cunhã em monocultivo, em relação a cunhã consorciada é explicada pela ausência de competição por água, nutrientes e radiação solar com outra espécie (YAMORI; HIKOSAKA; WAY, 2013). Essa competição por recursos também foi observada na fixação biológica de nitrogênio (FBN), em que a maior FBN ocorreu na cunhã em monocultivo do que consorciada, o que também pode ser atribuído a maior proporção de leguminosa no monocultivo. A maior FBN (Figuras 12B e C) é apoiada pelo maior acúmulo de forragem e, conseqüentemente, pela maior fotossíntese (Figura 15 B). A FBN é um processo de alto custo energético, utiliza 16 ATP para produzir duas moléculas de  $\text{NH}_3$  (SUN *et al.*, 2021). A energia é oriunda de fotoassimilados da leguminosa, sendo usada para produção e manutenção do nódulo, e para a conservação da anaerobiose, uma vez que a nitrogenase é sensível ao oxigênio (LODWIG; POOLE, 2003; RUTTEN; POOLE, 2019; VALENTINE *et al.*, 2010).

O Mott, em monocultivo ( $15 \text{ t ha}^{-1}$ ) ou consorciado ( $14 \text{ t ha}^{-1}$ ) com a cunhã, não diferiu quanto ao acúmulo de forragem e à taxa de acúmulo de forragem (Figura 5). Importante destacar que os monocultivos de capim-elefante receberam adubação nitrogenada ( $300 \text{ kg N ha ano}^{-1}$ ); já os sistemas consorciados não foram adubados com nitrogênio. Acredita-se também que existe efeito residual dos anos anteriores, uma vez que esse experimento possui quatro anos de implantação. O capim-elefante é reconhecido por responder bem a altas doses de adubação nitrogenada. Alves *et al.* (2018) encontraram respostas positivas para produção de forragem para a cv. Carajás ( $44$  e  $47 \text{ t MS ha ano}^{-1}$ ) com doses de  $400$  e  $800 \text{ kg N ha}^{-1}$  e irrigado, com frequência de corte de 40 dias. Oliveira *et al.* (2022) encontraram maior produtividade de capim-elefante cv. Cameroon em torno de  $41 \text{ t MS ha}^{-1}$  em 260 dias, recebendo dose de  $800 \text{ kg N ha}^{-1}$ .

Neste sentido, a inclusão da leguminosa pode ter compensado a ausência de adubação nitrogenada, uma vez que foi adicionado ao solo 18 kg ha ano<sup>-1</sup> de N via fixação biológica (Figura 12C), apesar da baixa participação da cunhã nos consórcios, em torno de 14 e 4%, na época chuvosa e seca (Figura 7). Esse efeito positivo da leguminosa em baixa proporção opõe-se ao que é relatado na literatura. A maioria dos estudos recomenda que a leguminosa participe em torno de 25% da composição botânica para sistemas sob pastejo (LIRA *et al.*, 2006). No entanto, existem diferentes formas metodológicas de avaliar a proporção de leguminosas nos sistemas consorciados (visualmente, por análises isotópica de  $\delta^{13}\text{C}$  e por peso). Nesse estudo, a participação da cunhã foi determinada com base no peso, ou seja, na porcentagem em relação à produção de forragem do sistema (DUBEUX JUNIOR *et al.*, 2017; JARAMILLO *et al.*, 2021; LIRA *et al.*, 2006) e a leguminosa foi submetida a cortes com intervalos de 60 dias e 90 dias, conforme a época do ano.

A inclusão de leguminosas aumentam o aporte de N no sistema via fixação biológica de nitrogênio, decomposição de serrapilheira (ainda que em pouca quantidade) e raízes, e com isso contribuem para o aumento da produção de forragem a médio e longo prazo (DUBEUX JUNIOR *et al.*, 2019; SCHULTZE-KRAFT *et al.*, 2018). Silva *et al.* (2023) avaliaram os genótipos IRI-381, Mott e Taiwan A-146 2.37 em monocultivo e consorciado com cunhã na mesma área experimental durante 19 meses. Esses autores não encontraram diferenças na produção de forragem entre os sistemas de cultivo.

Ainda sobre a participação dos genótipos de capim-elefante e cunhã nos sistemas consorciados foi observado maior participação na produção do capim-elefante e menor de cunhã na época seca (Figura 7). Na época seca, as plantas sob estresse hídrico aumentam as taxas de fotorrespiração em planta C<sub>3</sub> (leguminosas), devido à redução do suprimento de CO<sub>2</sub> e ao aumento da concentração de O<sub>2</sub>, juntamente com possíveis danos celulares. Isso resulta em um impacto negativo na eficiência da fotossíntese e no crescimento das plantas (HAY; PORTER, 2006; SINCLAIR; MUCHOW, 1999). Em contrapartida, as C<sub>4</sub> (gramíneas tropicais) possuem maior taxa fotossintética líquida em altas temperaturas e maior produção de matéria seca (Tabela 3), além de maior eficiência no uso de água.

Outros estudos relatam que a maior resistência em gramíneas poderia estar relacionada a um aumento da proporção raiz/parte aérea, melhorando o uso de água e nutrientes (HEBEISEN *et al.*, 1997; LAZZAROTTO; CALANCA; FUHRER, 2009). Dessa forma, as espécies de gramíneas são geralmente mais competitivas e, portanto, mais produtivas e persistentes que as leguminosas (DAVIES, 2001; MISCHKOLZ *et al.*, 2013).

A proporção de folhas de Cunhã (50%) e a relação folha/caule (1,6) não diferiu para os diferentes sistemas de cultivo na época chuvosa (Figura 9). Foi observado que a proporção de folhas (44%), colmo (38%), material senescente (17%) e relação folha/caule (1,3) do Elefante B não diferiu nos sistemas de cultivo, independente da época do ano (Figura 8).

A maior proporção de folhas é importante, pois essa fração é responsável pela captação da energia luminosa, influenciando diretamente no processo fotossintético, promovendo maior crescimento e desenvolvimento vegetal (BIELCZYNSKI *et al.*, 2017).

A relação folha/caule acima de 1 (encontrada em todas as épocas do ano e em todos os sistemas de cultivo de capim-elefante e cunhã), indica maior proporção de folhas do que caules na biomassa. Isso pode representar uma melhor qualidade da forragem, em virtude de as folhas possuírem menor concentração de fibra e maior concentração de outros nutrientes (EMERENCIANO *et al.*, 2019; MUIR *et al.*, 2019; DINIZ *et al.*, 2021). Isto também pode influenciar no consumo de forragem pelos animais, pois eles preferem se alimentar de tecidos mais jovens e de maior valor nutritivo, como as folhas (PAULER *et al.*, 2020).

Em relação à proporção de vagens, a cunhã + Mott obteve menor participação da fração vagem (56%), em comparação com cunhã e cunhã + elefante B (Figura 9). Isso pode representar menor idade fisiológica da planta e, conseqüentemente, maior valor nutritivo para cunhã + Mott. A maior produção de vagens representa também a produção de um banco de sementes no solo que pode ser uma estratégia de sobrevivência das plantas (KLUPCZYŃSKA *et al.*, 2021).

Na época chuvosa (Figura 8), foi observado que os genótipos de capim-elefante apresentaram menor proporção de folhas (43%) e relação folha/colmo (1,2) e maior proporção de colmos (39%) do que na época seca (49%, 1,9 e 31%, respectivamente). Maior alongamento do colmo na época chuvosa pode ser explicado pela alta temperatura, maior precipitação (Figura 1) e pelas adubações com nitrogênio, fósforo e potássio nesta época do ano.

Os solos com elefante B e Mott, em monocultivo e consorciado com cunhã, não apresentaram diferenças para o teor e estoque de N do solo (Tabela 3). O mesmo ocorreu para o teor de N na planta desses sistemas de cultivo, porém para estoque de N na planta não houve diferença significativa (Tabela 1). Isso demonstra que a fixação biológica de N foi eficiente, comparado à fertilização nitrogenada dos monocultivos de capim-elefante.

Com base nesses resultados, o uso de adubação nitrogenada com ureia (300 kg N ha ano<sup>-1</sup>) na época chuvosa pode ser substituído pela inclusão de cunhã em capineiras de capim-elefante. Isso atende aos objetivos do Plano Nacional de Fertilizantes do governo do Brasil,

que foi criado com o objetivo de reduzir a dependência externa brasileira de fertilizantes, que representa em torno de 80%. Em 2021, o Brasil importou US\$ 4,42 bilhões de fertilizantes nitrogenados, tornando-se o 1º maior importador do mundo (OEC, 2024). O Plano Nacional de Fertilizantes visa aumentar a participação de mercado de fertilizantes produzidos internamente, que é em torno de 15% para 55% até 2050; para isso, uma meta é produzir novos produtos e fontes alternativas.

Dessa forma, a substituição do fertilizante nitrogenado pela leguminosa cunhã tem um grande impacto econômico, pois reduz os custos da produção e aumenta a estabilidade econômica dos produtores (CASTRO; MINGOTI, 2023). A redução do uso dos fertilizantes também traz benefícios ambientais, por reduzir a emissão de gases de efeito estufa e a poluição do lençol freático (KUMAR; KUMAR; PRAKASH, 2019). Além disso, a presença da leguminosa aumenta a presença de polinizadores e melhora o valor nutritivo da forragem (SCHULTZE-KRAFT *et al.*, 2018; SALES-SILVA *et al.*, 2023a). Dessa forma, a inclusão da leguminosa promove produção mais sustentável e muitos serviços ecossistêmicos.

Também foi observado que na época seca, o solo do monocultivo de cunhã apresentou maior teor de N (12%) do que o seu consórcio com elefante B e Mott (Figura 13). No entanto, para o teor de N na planta de cunhã não houve diferença significativa. Isso pode estar relacionado à ausência de competição por recursos (água, luz e nutrientes) no monocultivo, resultando em maior crescimento (Figura 4) e ao NDDA (Figura 12). Isso também pode estar relacionado à decomposição dos resíduos acumulados na época chuvosa.

O capim-elefante em consórcio com a cunhã pode ser beneficiado pelo nitrogênio do solo, adicionado via FBN. Sales-Silva *et al.* (2023a) avaliaram o capim-elefante na mesma área experimental e observaram que o elefante B consorciado com a cunhã apresentou maior teor de proteína bruta, em comparação ao monocultivo adubado com 300 kg de N ha ano<sup>-1</sup>.

O teor e o estoque de C do solo não diferiram entre os diferentes sistemas de cultivos (Tabela 3). Isso pode estar relacionado ao tempo de estabelecimento do experimento e ao histórico da área, em que o capim-elefante possui oito anos, e a cunhã quatro, e, antes disso, a área era cultivada com cana-de-açúcar.

Foi observado que o solo, na época seca, tem maior teor e estoque de C (Tabela 3, Figura 14B). Isso pode estar relacionado às condições climáticas, pois na época seca há menor umidade do solo, resultando em menor atividade microbiana e, conseqüentemente, na preservação da matéria orgânica e maiores estoques de carbono (COSTA *et al.*, 2017). Sayer *et al.* (2011) indicam que a decomposição microbiana e a respiração heterotrófica são inibidas em condições de seca, reduzindo a liberação de C no solo. No entanto, para estoque de C e N

na planta, foram observados que nos sistemas com cunhã em monocultivo na época chuvosa, por ocorrer um favorecimento do crescimento vegetal.

Na época seca ocorreu também maior relação C:N do solo (18:1), em comparação à época chuvosa (14:1). Já a relação C:N da cunhã e do capim-elefante na época chuvosa e seca foram 9:1 e 27:1, 10:1 e 28:1, respectivamente. Esses valores de relação C:N indicam que está ocorrendo o favorecimento da mineralização em vez da imobilização (<20:1), e assim maior disponibilidade de nutrientes, especialmente para os sistemas com cunhã (CARDOSO; ANDREOTE, 2016).

No presente estudo, os diferentes sistemas de cultivos de capim-elefante e cunhã acumularam em média 93 Mg ha<sup>-1</sup> de C e 6 Mg ha<sup>-1</sup> de N, levando em consideração os estoques do solo (0-0,40 m) e das plantas. Esse resultado foi superior ao encontrado por Lira Junior *et al.* (2020), que avaliaram um sistema silvipastoril de *Urochloa decumbens* consorciado com leguminosas arbóreas em quatro anos de avaliação em ambiente tropical subúmido, e encontraram 45 Mg ha<sup>-1</sup> de estoque de C. Também foi superior ao relatado por Tonucci *et al.* (2023) em um sistema consorciado de sorgo/milheto + feijão bóer + Massai e uma área preservada, que encontraram estoques de C acumulado na camada de 0-1,0 m de 96 e 76 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Isso demonstra a eficiência dos sistemas de cultivo sob corte em armazenar C.

O maior estoque de C e N presente na camada 0,20-0,40 m está relacionado a maior densidade do solo (1,80 g cm<sup>-3</sup>) em comparação a profundidade de 0-0,10 (1,58 g cm<sup>-3</sup>) e 0,10-0,20 m (1,78 g cm<sup>-3</sup>). Estes nutrientes também possuem a tendência de se acumular nas camadas mais profundas o solo. Vários estudos têm destacado a importância de camadas mais profundas no armazenamento total do C (LIRA JUNIOR *et al.*, 2020).

## 5 CONCLUSÃO

Comparado ao monocultivo de capim-elefante fertilizado com nitrogênio, a inclusão da cunhã em capineiras desta planta forrageira, independente do porte da gramínea, mantém ou incrementa serviços ecossistêmicos, como acúmulo de forragem, composição morfológica (folha, colmo, material senescente e relação folha/colmo), fixação biológica de nitrogênio, armazenamento de C e N na planta e no solo, sem necessidade de adubação nitrogenada, tornando esses sistemas mais sustentáveis.

Na época chuvosa há promoção do crescimento vegetal e da fixação biológica de nitrogênio. Na época seca, o armazenamento de C e N na planta e no solo é favorecido em sistemas de cultivo de capim-elefante e cunhã.

## REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVES, F. G. S. *et al.* Agronomic and nutritional responses of Carajas elephant grass fertilized with protected and non-protected urea. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 39, n. 5, p. 2181-2194, 2018.
- BERNOUX, M. *et al.* Brazil's soil carbon stocks. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, n. 3, p. 888-896, 2002.
- BIELCZYNSKI, L. W. *et al.* Leaf and plant age affects photosynthetic performance and photoprotective capacity. **Plant physiology**, v. 175, n. 4, p. 1634-1648, 2017.
- CALADO, T. B. *et al.* Morphology and productivity of “Jureminha” genotypes (*Desmanthus* spp.) under different cutting intensities. **Revista Caatinga**, v. 29, n. 3, p.742–752, 2016.
- CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do solo**. 2ª Edição. Piracicaba/SP: ESALQ, p. 221. 2016.
- CASTRO, G. S. A., MINGOTI, R. Produção nacional de fertilizantes: potencial expansão do setor de fertilizantes produzidos no Brasil. Propostas para o Brasil 2023-2026. **Agronegócio**. 71p. 2023.
- CAVALCANTI, F. J. A.; LIMA JÚNIOR, M. A.; LIMA, J. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco**: 2º edição, Recife: Instituto Agrônômico de Pernambuco. 212 p. 2008.
- COSTA, P. M. O. *et al.* Dynamics of leaf litter and soil respiration in a complex multistrata agroforestry system, Pernambuco, Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, v. 19, p. 1189-1203, 2017.
- CUNHA, M. V. *et al.* Adaptability and stability of the forage yield by different methods in the selection of *Pennisetum* spp. clones. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** , v. 8, n. 4, p. 681-686, 2013.
- CUNHA, M. V. *et al.* Association between the morphological and productive characteristics in the selection of elephant grass clones. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, n. 3, p. 482-488, 2011.
- DAVIES, A. Competition between grasses and legumes in established pastures. In: TOW, P. G.; LAZENBY, A. (Eds.). **Competition and succession in pastures**. Oxford Shire: CABI, 2001. p.63-84.
- DETMANN, E. *et al.* **Métodos para análise de alimentos**. Visconde do Rio Branco: Suprema, 214p. 2012.
- DINIZ, W. P. S. *et al.* Morphological, productive, and nutritional characterization of *Desmanthus* spp. accessions under different cutting intensities. **Agroforestry Systems**, v. 95, p. 1-11, 2021.
- DOURADO, D. L. *et al.* Canopy structure and forage nutritive value of Elephant grass subjected to different stocking rate and N fertilization in the “Mata Seca” ecoregion of Pernambuco. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 48, p. e20180134, 2019.

- DUBEUX JR, J.C.B. *et al.* Biological N<sub>2</sub> fixation, belowground responses, and forage potential of rhizoma peanut cultivars. **Crop Science**, v. 57, n. 2, p. 1027-1038, 2017.
- DUBEUX JR, J.C.B. *et al.* Multiple ecosystem services of arboreal legumes. **The Journal of the International Legume Society**, v. 17, p. 10-12. 2019.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Métodos de Análise de Solo**, 2, ed, Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 212p. 1997.
- EMERENCIANO, J. V. N. *et al.* Características estruturais e produtivas em híbridos intraespecíficos e interespecíficos de Capim-elefante. **Ciência Animal Brasileira**, v.20, p.1-11, 2019.
- FORNARA, D. A.; TILMAN, D. Plant functional composition influences rates of soil carbon and nitrogen accumulation. **Journal of Ecology**, v. 96, p. 314-322, 2008.
- HAY, R. K. M.; PORTER, J. R. **The Physiology of Crop Yield**. 2nd eds., Blackwell Publishing, Oxford, U.K. 2006.
- HEBEISEN, T. *et al.* Growth response of *Trifolium repens* L. and *Lolium perenne* L. as monocultures and bi-species mixture to free air CO<sub>2</sub> enrichment and management. **Global Change Biology**, v. 3, n. 2, p. 149-160, 1997.
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015, International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports no. 106. FAO, Rome. 2015.
- JARAMILLO, D. M. *et al.* Litter mass, deposition rate, and decomposition in nitrogen-fertilized or grass–legume grazing systems. **Crop Science**, v. 61, n. 3, p. 2176-2189, 2021.
- KLUPCZYŃSKA, E, A. *et al.* Regulation of seed dormancy and germination mechanisms in a changing environment. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 3, p. 1357, 2021.
- KUMAR, R.; KUMAR, R.; PRAKASH, O. **The impact of chemical fertilizers on our environment and ecosystem**. Chief Ed, p. 69. 2019.
- LAZZAROTTO, P.; CALANCA, P.; FUHRER, J. Dynamics of grass–clover mixtures—an analysis of the response to management with the Productive GRASSland Simulator (PROGRASS). **Ecological Modelling**, v. 220, n. 5, p. 703-724, 2009.
- LEDGARD, S. F.; STEELE, K. W. Biological nitrogen fixation in mixed legume/grass pastures. **Plant and Soil**, v. 141, p. 137-153, 1992.
- LEMOS, M. F. *et al.* Grass size and butterfly pea inclusion modify the nutritional value of elephant grass silage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 56, 2021.
- LIRA JUNIOR, M. A. *et al.* Legume-based silvopastoral systems drive C and N soil stocks in a subhumid tropical environment. **Catena**, v. 189, p. 104508, 2020.
- LIRA, M. A. *et al.* **Sistemas de produção de forragem: alternativas para sustentabilidade da pecuária**. Anais de Simpósios da 43ª Reunião Anual da SBZ - João Pessoa - PB: 405-423 p. 2006.
- LODWIG, E.; POOLE, P. Metabolism of *Rhizobium* bacteroids. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v.22, n.1, p.37-78, 2003.

MISCHKOLZ, J. M. *et al.* Early productivity and crude protein content of establishing forage swards composed of combinations of native grass and legume species in mixed-grassland ecoregions. **Canadian Journal of Plant Science**, v.93, n.3, p.445-454, 2013.

MUIR, J. P. *et al.* Value of endemic legumes for livestock production on Caatinga rangelands. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 2, e5648, 2019.

OECD - Observatory of Economic Complexity. **Fertilizantes nitrogenados no Brasil**. Disponível em: <https://oec.world/en/profile/bilateral-product/nitrogenous-fertilizers/reporter/bra?redirect=true>. Acesso em: 01 fev. 2024.

OLIVEIRA, L. E. C. *et al.* Nitrogen and phosphorus fertilizer application to Elephant grass (*Cenchrus purpureus* syn. *Pennisetum purpureum*) cultivar 'Cameroon' in an arenosol in Rio Grande do Norte, Brazil. **Tropical Grasslands-Forrajões Tropicais**, v. 10, n. 3, p. 280-287, 2022.

PAULER, C. M. *et al.* Choosy grazers: Influence of plant traits on forage selection by three cattle breeds. **Functional Ecology**, v. 34, n. 5, p. 980-992, 2020.

PEREIRA, A. V.; LÉDO, F. J. S.; MACHADO, J. C. BRS Kurumi and BRS Capiaçú-New elephant grass cultivars for grazing and cut-and-carry system. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 17, p. 59-62, 2017.

REISS, E. R.; DRINKWATER, L. E. Promoting enhanced ecosystem services from cover crops using intra-and interspecific diversity. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 323, p. 107586, 2022.

RUTTEN, P. J.; POOLE, P. S. Oxygen regulatory mechanisms of nitrogen fixation in rhizobia. **Advances in Microbial Physiology**, 75, 325-389. 2019.

SALES-SILVA, T. B. *et al.* Does the presence of tall or dwarf elephant grass genotypes change the nutritive value of butterfly pea in grass-legume intercrops? **African Journal of Range Forage Science**, p. 1-10, 2023a.

SALES-SILVA, T. B. *et al.* The growth habits of tropical legumes affect the nutritive herbage value more than harvesting frequency. **Crop and Pasture Science**, v. 75, n. 1, 2023b.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Embrapa. 5ª ed. Brasília, 2018. 356 p.

SAS Institute Inc. **SAS® OnDemand for academics: user's guide**, Cary: SAS Institute Inc, 2014.

SAYER, E. J. *et al.* Soil carbon release enhanced by increased tropical forest litterfall. **Nature Climate Change**, v. 1, n. 6, p. 304-307, 2011.

SCHULTZE-KRAFT, R. *et al.* Tropical forage legumes for environmental benefits: An overview. **Tropical Grasslands-Forrajões Tropicais**, v. 6, n. 1, p. 1-14, 2018.

SHEARER, G.; KOHL, D. H. N<sub>2</sub> fixation in field setting: estimations based on natural <sup>15</sup>N abundance. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.13, p.699-756. 1986.

SILVA, L. S. *et al.* Does grass-legume intercropping change soil quality and grain yield in integrated crop-livestock systems? **Applied Soil Ecology**, v. 170, p. 104257, 2022.

- SILVA, P. H. F. *et al.* Agronomic responses and herbage nutritive value of elephant grass (*Cenchrus purpureus*) genotypes grown as monocrops and mixed with butterfly pea (*Clitoria ternatea*). **Crop Pasture Science**, v. 74, p. A-M, 2023.
- SILVA, P. H. F. *et al.* Tall and short-sized elephant grass genotypes: morphophysiological aspects cut-and-carry, and grazing management. **Ciência Rural**, v. 51, p. e20200848. 2021.
- SINCLAIR, T. R.; MUCHOW, R. C. Radiation use efficiency. **Advances in Agronomy**, v. 65, p. 215–265. 1999.
- SINGH, B. P. **Biofuel crops: production, physiology and genetics**, (Ed), Oxford, UK: CABI, 631p. 2013.
- SISTI, C. P. *et al.* Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil, **Soil and Tillage Research**, v. 76, p. 39–58, 2004.
- SOLLENBERGER, L. E. *et al.* Grassland management affects delivery of regulating and supporting ecosystem services. **Crop Science**, v. 59, n. 2, p. 441-459. 2019.
- SOLLENBERGER, L. E.; DUBEUX JUNIOR, J. C. B. Warm-climate, legume-grass forage mixtures versus grass-only swards: An ecosystem services comparison. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 51. 2022.
- SOUZA, R. T. A. *et al.* Dwarf and tall elephant grass genotypes under irrigation as forage sources for ruminants: Herbage accumulation and nutritive value. **Animals**, v. 11, p. 2392. 2021.
- SUN, W. *et al.* Nitrogen fixation and diazotrophs—a review. **Romanian Biotechnological Letters**, v. 26, n. 4, p. 2834-2845, 2021.
- TEDESCO, M. J. *et al.* **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre: UFRGS. 174p. 1995.
- TEIXEIRA, V. I. *et al.* Aspectos agronômicos e bromatológicos de leguminosas forrageiras no nordeste brasileiro. **Archivos de Zootecnia**, v. 226, n. 59, p. 245-254, 2010b.
- TONUCCI, R. G. *et al.* Agroforestry system improves soil carbon and nitrogen stocks in depth after land-use changes in the Brazilian semi-arid region. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, p. e0220124, 2023.
- TRAILL, S. *et al.* Tropical forage legumes provide large nitrogen benefits to maize except when fodder is removed, **Crop and Pasture Science**, v. 69, p. 183–193, 2018.
- VALENTINE, A. J. *et al.* Legume nitrogen fixation and soil abiotic stress: from physiology to genomics and beyond. **Annual Plant Reviews**, v. 42, p.207–248. 2010.
- VIANA, B. L. *et al.* Adaptability and stability analysis for selection of elephant grass clones under grazing, **Crop Science**, v. 55, n. 2, p. 950-957. 2015.
- VIANA, B. L. *et al.* Morphological characteristics and proportion of leaf blade tissues of elephant grass clones under sheep grazing, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n.11, p. 1268-1275, 2018.
- VILLEGAS, D. M. *et al.* Urochloa grasses swap nitrogen source when grown in association with legumes in tropical pastures. **Diversity**, v. 12, n. 11, p. 419, 2020.

WANG, W. J. *et al.* Decomposition dynamics of plant materials in relation to nitrogen availability and biochemistry determined by NMR and wet-chemical analysis. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 36, n. 12, p. 2045-2058, 2004.

YAMORI, W.; HIKOSAKA, K.; WAY, D. A. Temperature response of photosynthesis in C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, and CAM plants: temperature acclimation and temperature adaptation. **Photosynthesis Research**, v. 119, p. 101-117, 2014.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, p. 1467-1476. 1988.

ZHAO, F. *et al.* Biological N fixation but not mineral N fertilization enhances the accumulation of N in peanut soil in maize/peanut intercropping system. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 10, p. 100365. 2022.

### **CAPÍTULO 3**

---

## **A INCLUSÃO DA CUNHÃ EM CAPINEIRA DE CAPIM-ELEFANTE MODIFICA A QUALIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA E AS CARACTERÍSTICAS MICROBIOLÓGICAS DO SOLO**

## RESUMO

Os micro-organismos do solo promovem diversos serviços ecossistêmicos. Foi investigado o efeito de sistemas de cultivo de capim-elefante (*Cenchrus purpureus*) com diferentes portes (elefante B e Mott), consorciados ou não com cunhã (*Clitoria ternatea*) sobre a atividade e biomassa microbiana, matéria orgânica e glomalina do solo em clima tropical seco em diferentes épocas do ano. O monocultivo de capim-elefante foi adubado com N (300 kg N ha ano<sup>-1</sup>). O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso com quatro repetições. As frações da matéria orgânica (ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e huminas), C e N da biomassa microbiana, quociente metabólico e microbiano do solo não diferiram entre os monocultivos de capim-elefante e os consórcios com cunhã, com médias 2,34 g kg<sup>-1</sup>; 2,11 g kg<sup>-1</sup>; 3,19 g kg<sup>-1</sup>; 285,50 mg kg<sup>-1</sup>; 37,77 mg kg<sup>-1</sup>; 0,15 mg C-CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> C-mic d<sup>-1</sup> e 2,30%, respectivamente. Na época chuvosa ocorreu maior qualidade da matéria orgânica, teor de glomalina, atividade e biomassa microbiana, e maior quociente microbiano e de mineralização, em comparação com a época seca. Na camada superficial do solo (0-0,10 m) foi observada maior atividade microbiana, maior N-mic, menor relação C/N na microbiota. Comparado ao monocultivo com fertilizante nitrogenado, a inclusão da cunhã em capineiras de capim-elefante, independente do porte da gramínea, mantém serviços ecossistêmicos de suporte como a qualidade da matéria orgânica, glomalina e atividade microbiana.

**Palavras-chave:** Biomassa microbiana; *Cenchrus purpureus*; *Clitoria ternatea* L.; Glomalina; Serviços ecossistêmicos; Sistemas consorciados.

### ABSTRACT

Soil microorganisms promote several ecosystem services. The effect of elephant grass (*Cenchrus purpureus*) cultivation systems of different sizes (Elefante B and Mott), intercropped or not with butterfly pea (*Clitoria ternatea*) on microbial activity and biomass, organic matter and soil glomalin in a dry tropical climate was investigated. The elephant grass monoculture was fertilized with N (300 kg N ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>). The experimental design used was randomized blocks with four replications. The fractions of organic matter (fulvic acids, humic acids and humins), C and N of microbial biomass, metabolic and microbial quotient of the soil did not differ between Elephant Grass monocultures and intercrops with butterfly pea, with averages of 2.34 g kg<sup>-1</sup>; 2.11 g kg<sup>-1</sup>; 3.19 g kg<sup>-1</sup>; 285.50 mg kg<sup>-1</sup>; 37.77 mg kg<sup>-1</sup>; 0.15 mg C-CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> C-mic d<sup>-1</sup> and 2.30%, respectively. During the rainy season, there is a higher quality of organic matter, glomalin content, microbial activity and biomass, and a higher microbial and mineralization quotient compared to the dry season. In the surface layer of the soil (0-0.10 m) higher microbial activity, higher N-mic and lower C/N ratio in the microbiota were observed. Compared to monoculture with nitrogen fertilizer, the inclusion of butterfly pea in elephant grass weeds, regardless of the size of the grass, maintains supporting ecosystem services such as the quality of organic matter, glomalin and microbial activity.

**Keywords:** Microbial biomass; *Cenchrus purpureus*; *Clitoria ternatea*; Glomalin; Ecosystem services; Integrated systems.

## 1 INTRODUÇÃO

O solo desempenha um papel vital na sustentação da vida, pois promove a dinâmica e a retenção de água e nutrientes, apoiando as cadeias alimentares e regulando os processos ambientais (MISHRA *et al.*, 2023). A intensificação do uso da terra associada a práticas de manejo inadequadas pode afetar a qualidade do solo, reduzindo sua fertilidade e atividade biológica, resultando na sua degradação (DIAZ-GONZALEZ *et al.*, 2022) e, atualmente, é possível que 6 bilhões de hectares de solos estejam em algum estágio de degradação no mundo (AYUB *et al.*, 2020).

Como o solo é a base para a produção sustentável, a sua saúde está diretamente relacionada às funções de um agroecossistema (TEAGUE; KREUTER, 2020). Assim, a inclusão de leguminosas tem sido utilizada como alternativa sustentável e econômica para proporcionar benefícios ao solo, por meio de melhorias nos seus parâmetros físicos, químicos e biológicos (CAMELO *et al.*, 2021; LIRA JUNIOR *et al.*, 2020 a).

A cunhã (*Clitoria ternatea* L.) é uma leguminosa adaptada às condições edafoclimáticas de regiões tropicais, e tem sido utilizada em consórcio com gramíneas (SALES-SILVA *et al.*, 2023a); além disso, a sua produtividade pode chegar a 3 t MS ha<sup>-1</sup> em 90 dias (SALES-SILVA *et al.*, 2023b). Alguns estudos relatam que essa leguminosa herbácea pode fixar quase 100 kg ha ano<sup>-1</sup> de N via simbiose com *Rhizobium* spp. e *Bradyrhizobium* spp. (TRAILL *et al.*, 2018).

Um consórcio que se tem obtido bons resultados é o da cunhã com capim-elefante [*Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone sin. *Pennisetum purpureum* Schumach]. A introdução de cunhã em capineiras de capim-elefante pode melhorar o valor nutritivo da forragem *in natura* como também na forma de silagem (LEMOS *et al.*, 2021; SALES-SILVA *et al.*, 2023a; SILVA *et al.*, 2023). Esse consórcio com genótipos de capim-elefante de diferentes portes tem sido também importante para preservação e manutenção de visitantes florais, garantindo a biodiversidade (MOTA, 2022).

Poucos estudos abordam o impacto desse consórcio entre cunhã e capim-elefante sobre a dinâmica dos micro-organismos do solo. A maioria dos processos observados acima do solo são regulados diretamente ou indiretamente pelos micro-organismos abaixo do solo. Sabe-se que os micro-organismos são responsáveis diretamente pela ciclagem dos nutrientes, ao realizarem a decomposição e mineralização da matéria orgânica do solo, liberando nutrientes para as plantas absorverem (JACOBY *et al.*, 2017), além de auxiliarem no crescimento das plantas e atuarem na biorremediação do solo (SACCÁ *et al.*, 2017). A atividade e a biomassa microbiana do solo fornecem respostas mais rápidas às mudanças

edafoclimáticas, de forma e determinar o funcionamento e a sustentabilidade de um ecossistema (ZHAO *et al.*, 2015; FENG *et al.*, 2021). Alguns estudos indicam que a diversidade vegetal encontrada nos consórcios gramínea-leguminosa proporciona benefícios aos micro-organismos do solo, como a maior variabilidade de exsudatos liberados pelas raízes e, conseqüentemente, maior estímulo à biomassa microbiana (BAATH, 2018; JHARIYA *et al.*, 2018).

O consórcio também impulsiona a qualidade da matéria orgânica (SHERROD; VIGIL; STEWART, 2019), aproximadamente 25% do carbono presente na matéria orgânica no solo é oriundo da glomalina (SINGH; RAI; SINGH, 2016), uma glicoproteína produzida pelos fungos micorrízicos arbusculares. Existe uma correlação positiva entre glomalina e a atividade e biomassa microbiana e agregação do solo (GISPERT *et al.*, 2013; WANG *et al.*, 2018). Além disso, a glomalina auxilia no sequestro de carbono do solo, devido a sua longa persistência no solo, até 42 anos ou mais (RILLIG *et al.*, 2011).

A hipótese desse estudo é que serviços ecossistêmicos de suporte relacionados à ciclagem de nutrientes, como a atividade e biomassa microbiana, assim como a qualidade da matéria orgânica e a glomalina do solo, são alterados pelos diferentes de sistemas de cultivo (monocultivo com fertilização nitrogenada ou consórcio) de capim-elefante e cunhã, em diferentes épocas do ano. Espera-se que a inclusão da cunhã em capineiras de capim-elefante aumente ou mantenha a biomassa microbiana, qualidade da matéria orgânica e a glomalina do solo, em comparação ao monocultivo de capim-elefante com adubação nitrogenada.

Com base nisso, objetivou-se avaliar características microbiológicas, fracionamento químico da matéria orgânica e a glomalina do solo em sistemas de cultivo de capim-elefante e cunhã em diferentes épocas do ano.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Descrição do local e estratégia de amostragem**

O experimento foi realizado na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina, da Universidade Federal Rural de Pernambuco (EECAC/UFRPE), em Pernambuco, Brasil (7 ° 51' 03'' S, 35° 15' 17'' W). O clima do local é do tipo As', de acordo com a classificação de Köppen, caracterizado como tropical seco (ALVAREZ *et al.*, 2013). A pluviosidade e temperatura média anual são 1.100 mm e 24,6 °C, respectivamente. O solo da área experimental é classificado como Argissolo Amarelo Distrocoeso (SANTOS *et al.*, 2018; IUSS Working Group WRB, 2015), classe textural é franca arenosa. As principais características físicas e químicas na camada de 0-0,40 m estão descritas na Tabela 1. Os dados

de precipitação no período experimental (fevereiro de 2021 a fevereiro de 2023) são apresentados na Figura 1, com um total de 1.879 mm.

Tabela 1. Características físicas e químicas de diferentes sistemas de cultivo na profundidade 0-40 cm.

Sistemas de cultivo	Ds g cm <sup>-3</sup>	pH	P	Ca	Mg	Na	K	Al	H
		H <sub>2</sub> O	mg/dm <sup>3</sup>	cmolc/dm <sup>3</sup>					
Época chuvosa 2021									
Elefante B	1,79	6,10	11	1,60	0,50	0,05	0,25	0,00	2,55
Mott	1,78	5,90	6	1,50	0,55	0,04	0,10	0,00	3,71
Cunhã	1,71	5,90	39	1,75	0,75	0,08	0,33	0,00	2,88
Elefante B + cunhã	1,74	5,60	3	1,30	0,60	0,07	0,05	0,20	3,92
Mott + cunhã	1,71	5,80	6	1,30	0,60	0,04	0,18	0,05	4,15
Época seca 2023									
Elefante B	1,79	5,20	24	1,10	0,50	0,003	0,04	0,50	3,79
Mott	1,78	5,00	11	1,00	0,06	0,03	0,06	0,30	3,41
Cunhã	1,71	5,70	43	1,90	0,50	0,02	0,24	0,05	3,33
Elefante B + cunhã	1,74	5,30	7	1,00	0,50	0,02	0,05	0,30	2,75
Mott + cunhã	1,71	5,40	26	1,25	0,50	0,03	0,05	0,25	3,37

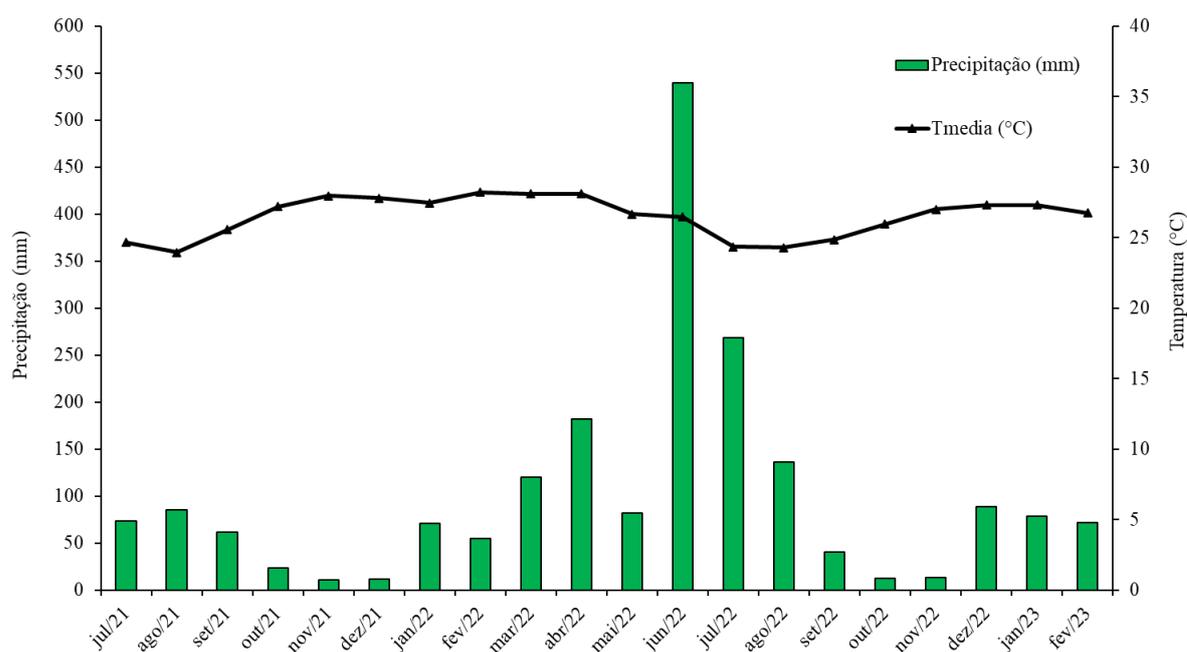


Figura 1. Precipitação e temperatura média durante o período experimental (2021-2023).  
Fonte: Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC)

O experimento foi implantado em 2014, com o plantio dos genótipos de capim-elefante (*Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone.) em sulcos espaçados em 1,0 m, em parcelas de 16 m<sup>2</sup> (4 x 4 m) de área total, com 8 m<sup>2</sup> de área útil. O material de plantio (colmos) foi oriundo do programa de melhoramento genético da UFRPE em parceria com o Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA). Em 2018, foi realizado o plantio da cunhã

(*Clitoria ternatea* L.) em covas com espaçamento de 0,5 m, nas entrelinhas do capim-elefante. As sementes foram provenientes da Coleção de Plantas Forrageiras do Departamento de Zootecnia da UFRPE. A quebra da dormência das sementes foi feita com auxílio de lixa (escarificação física). As sementes foram cultivadas em sacos plásticos e mantidas em casa de vegetação, após 60 dias foi feito o plantio no campo experimental. Durante o período entre 2014 e 2021, essas áreas foram colhidas a cada 60 dias.

Foram avaliados diferentes sistemas de cultivo (monocultivo ou consórcio) de dois genótipos de capim-elefante com distintos portes (porte alto, elefante B e baixo, Mott) e cunhã em diferentes épocas do ano e camadas do solo (0–0,10 m, 0,10–0,20 m e 0,20–0,40 m). O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso em arranjo fatorial 5 x 2 (cinco sistemas de cultivo, duas épocas do ano), com quatro repetições. O período chuvoso foi considerado de março a agosto de 2021 e 2022. As coletas do solo foram realizadas no final deste período (mês de agosto). O período seco foi de setembro a fevereiro de 2022 e 2023. As coletas do solo foram realizadas no final deste período (mês de fevereiro).

## 2.2 Manejo da capineira

A frequência da corte dos genótipos de capim-elefante e da cunhã foi de 60 dias na época chuvosa e de 90 dias na época seca. A intensidade de corte foi ao nível do solo para o capim-elefante e a 20 cm de altura para a cunhã. A adubação foi realizada nas épocas chuvosas (3 adubações por ano), conforme recomendações de Cavalcanti *et al.* (2008). Após cada colheita, as parcelas de capim-elefante em monocultivo receberam adubação de manutenção com doses de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N (ureia), 70 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (superfosfato simples) e 60 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O (cloreto de potássio), enquanto as parcelas consorciadas com cunhã e o monocultivo da cunhã não receberam as doses de N.

## 2.3 Análises de solo

As coletas de solo foram realizadas manualmente com auxílio do trado holandês nas profundidades (0–0,10 m, 0,10–0,20 m e 0,20–0,40 m) ao final de cada época do ano. As amostras de solo foram secas ao ar, homogeneizadas e peneiradas a 2 mm para remoção de resíduos vegetais e separadas para análise de composição química e granulométrica. Em seguida, as subamostras foram peneiradas em peneiras de 250 µm (60 mesh) e encaminhadas ao Laboratório de Química e Biologia do Solo, pertencentes ao Departamento de Agronomia

(UFRPE) e ao Laboratório de Forragicultura Professor Iderval Farias, pertencente ao Departamento de Zootecnia (UFRPE).

As frações húmicas foram separadas em ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH) e humina (HUM), utilizando a técnica de solubilidade diferencial estabelecida pela International Humic Substance Society (SWIFT, 1996), adaptado por Benites, Madari e Machado (2003). O carbono dessas frações foi determinado com dicromato de potássio e tituladas com sulfato ferroso de amônio, utilizando ferroín como indicador (YEOMANS; BREMNER, 1988). A partir das frações de ácido fúlvico (AF) e ácido húmico (AH), calculou-se a relação AH/AF, que indica o grau de evolução do processo de humificação do carbono do solo (BENITES; MADARI; MACHADO, 2003).

A extração e quantificação da glomalina presente na terra fina seca ao ar (TFSA) foi obtida de acordo com método descrito por Wright e Upadhyaya (1996) e Wright e Upadhyaya (1998), utilizando o método de Bradford. A glomalina facilmente extraível (GFE) foi obtida a partir de 1 g de TFSA em 8 mL de tampão citrato de sódio [20 mM (pH 7,0)], com digestão única em autoclave à 121 °C por 30 min. A solução foi centrifugada a 4000 rpm por 15 minutos e o sobrenadante armazenado para quantificação da proteína. A determinação foi realizada por colorimetria, usando como padrão o soro albumina bovina (BSA). Os teores de glomalina foram expressos em  $\mu\text{g}$  glomalina  $\text{g}^{-1}$  de solo.

Já a fração glomalina total (GT) foi obtida por meio de seis digestões consecutivas, utilizando o tampão citrato de sódio [50 mM (pH 8,0)], com a primeira digestão em autoclave a 121 °C por 90 minutos, e as demais por 60 minutos, seguidas de centrifugação como descrito acima, após cada autoclavagem. A determinação também foi realizada por ensaio colorimétrico de Bradford (BRADFORD, 1976) com BSA. As concentrações de ambas as glomalinas foram corrigidas considerando o volume total do sobrenadante. O carbono da glomalina (C-glomalina) foi calculado baseado na premissa que a glomalina possui 32% de carbono orgânico (LOVELOCK *et al.*, 2004).

O carbono e nitrogênio da biomassa microbiana (C-mic e N-mic) foram obtidos pelo método de extração-irradiação, de acordo com Islam e Weil (1998). A respiração basal do solo foi quantificada de acordo com Alef e Nannipieri (1995). O teor de carbono orgânico total do solo (COT) foi obtido pelo método de oxidação via úmida, segundo metodologia descrita por Yeomans e Bremner (1988). O quociente metabólico ( $q\text{CO}_2$ ) foi calculado, de acordo com Anderson e Domsch (1985), por meio da relação entre a respiração basal e o C da biomassa microbiana. O quociente microbiano ( $q\text{MIC}$ ) foi calculado pela relação entre o C

biomassa microbiana e o COT. O quociente de mineralização ( $qM$ ) foi a razão entre a respiração basal e o C total, expresso em % (MOSCATELLI *et al.*, 2005).

#### 2.4 Análise estatística

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade dos resíduos e homoscedasticidade. Os dados foram submetidos a ANOVA e analisados com auxílio do PROC MIXED do SAS® OnDemand for Academics (SAS, 2014). Os efeitos fixos foram os sistemas de cultivos e épocas do ano, analisados separadamente para cada profundidade do solo. A profundidade foi analisada separadamente. Os blocos foram considerados como efeitos aleatórios. Quando o teste F foi significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Análise de componentes principais, com base na matriz de correlação de Pearson ( $\alpha = 0,05$ ), foi realizada para estudar as relações entre as variáveis dependentes e os tratamentos (sistemas de cultivo e época do ano). Os dados foram exibidos em vetores ortogonais e a matriz de correlação foi apresentada em biplots. Os resultados individuais de cada tratamento e sua distribuição foram sobrepostos no mapa biplot. A análise foi realizada no software RStudio (RStudio 2023.12.1 Build 402).

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Frações da matéria orgânica do solo

Na profundidade de 0-0,10 m, o ácido fúlvico (AF), o ácido húmico (AH), a humina (HUM) e a relação ácido húmico/ácido fúlvico (AH/AF) foram influenciados pelas épocas do ano (Tabela 2). A AH/AF também foi modificada pelo sistema de cultivo. Para os diferentes sistemas de cultivo, o elefante B e o Mott em monocultivo não diferiram dos seus respectivos consórcios para o teor de ácido fúlvico e a relação ácido húmico/ácido fúlvico (Tabela 2). Na época chuvosa, o solo apresentou maior teor de AF e menores teores de AH, HUM e relação AH/AF, em comparação com a época seca.

Tabela 2. Teores de carbono das frações ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH) e humina (HUM) e a relação ácido húmico/ácido fúlvico (AH/AF) em diferentes sistemas de cultivos e época do ano na profundidade 0-0,10 m.

Sistema de cultivo	AF	AH	HUM	AH/AF
	g kg <sup>-1</sup>			
Elefante B	3,03 A	2,19	3,52	0,91 BC
Mott	2,27 AB	2,38	3,93	1,25 AB
Cunhã	1,40 C	2,17	2,90	1,54 A
Elefante B + Cunhã	2,96 A	1,75	2,82	0,82 C
Mott + Cunhã	2,06 BC	2,07	2,77	1,06 BC
EPM	0,21	0,18	0,38	0,09
Época do ano				
Chuvosa	2,93 A	1,51 B	2,66 B	0,66 B
Seca	1,76 B	2,72 A	3,71 A	1,57 A
EPM	0,15	0,12	0,24	0,06

Médias seguidas por mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). EPM: Erro padrão da média.

### 3.2 Glomalina no solo

Na profundidade de 0-0,10 m, a glomalina facilmente extraível (GFE) e total (GT) e teor de C na -glomalina (C-glomalina) não diferiram estatisticamente para os diferentes sistemas de cultivos (Tabela 3). Para as épocas do ano, durante a época chuvosa o solo apresentou maior teor de GFE do que na época seca (Tabela 3). Não houve efeito significativo da época para GT e C-glomalina do solo.

Tabela 3. Quantificação de glomalina facilmente extraível do solo (GFE), glomalina total (GT) e carbono da glomalina (C-glomalina) em diferentes sistemas de cultivos e época do ano na profundidade 0-0,10 m.

Sistema de cultivo	GFE	GT	C-glomalina
	μg g <sup>-1</sup>		
Elefante B	0,150	1,055	0,338
Mott	0,147	1,053	0,337
Cunhã	0,148	1,046	0,335
Elefante B + Cunhã	0,147	1,049	0,336
Mott + Cunhã	0,144	1,039	0,332
EPM	0,002	0,005	0,002
Época do ano			
Chuvosa	0,151 A	1,050	0,336
Seca	0,144 B	1,047	0,335
EPM	0,001	0,003	0,001

Médias seguidas por mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). EPM: Erro padrão da média.

### 3.3 Atividade e biomassa microbiana

As médias da respiração basal do solo (RBS) ou atividade microbiana não apresentaram diferença significativa entre os sistemas de cultivo, com valores de 40, 36 e 30 mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> para as profundidades de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente.

O carbono da biomassa microbiana (C-mic) foi modificado pelos diferentes sistemas de cultivos nas profundidades de 0-0,40 m. Na profundidade de 0-0,10 m, o solo do consórcio elefante B + cunhã apresentou menor C-mic, em comparação aos demais (Tabela 4). O C-mic dos solos do Mott em monocultivo e em consórcio não diferiram entre si. Nas profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, o solo cultivado com Mott em monocultivo apresentou mais C-mic do que os demais cultivos. E os monocultivos de elefante B e cunhã não diferiram do consórcio elefante B + cunhã.

O nitrogênio da biomassa microbiana (N-mic) foi influenciado pelos diferentes sistemas de cultivos nas profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. Nestas profundidades, foi observado menor teor de N-mic no solo cultivado com elefante B do que no solo com a cunhã em monocultivo (Tabela 4). Porém, o elefante B e o Mott em monocultivo não diferiram dos seus respectivos consórcios.

Para a relação C/N-mic, observou-se que a Cunhã em monocultivo ou consorciada apresentou menor C/N-mic em comparação ao monocultivo de Mott nas profundidades de 0-0,40 m (Tabela 4). Nos monocultivos e consórcios de elefante B e Mott, os solos não diferiram entre si nas profundidades 0-0,10 e 0,20-0,40 m.

Em relação às épocas do ano, o solo da época chuvosa apresentou maior atividade microbiana, C-mic e N-mic, do que da época seca, na profundidade de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m.

A atividade microbiana diferiu estatisticamente para profundidade. A maior atividade microbiana ocorreu na camada superficial (0-0,10 m), em comparação com as 0,10-0,40 m. O C-mic do solo não diferiu estatisticamente. O N-mic foi maior nas profundidades de 0-0,20 m do que 0,20-0,40 m. A menor relação C/N-mic ocorreu nas profundidades 0-0,20 m.

Tabela 4. Respiração basal do solo (RBS), carbono e nitrogênio da biomassa do solo (C-mic e N-mic) em diferentes sistemas de cultivos e profundidades.

0-0,10 m				
Sistema de cultivo	RBS	C-mic	N-mic	C/N-mic
	mg C-CO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>		
Elefante B	35,93	294,56 A	41,12	8,54 A
Mott	39,16	343,05 A	38,18	9,98 A
Cunhã	42,18	318,73 A	39,59	7,74 AB
Elefante B + cunhã	38,17	295,55 B	40,15	7,67 AB
Mott + cunhã	42,92	213,63 A	46,87	4,85 B
EPM	5,31	19,19	2,87	0,82
Época do ano				
Chuvosa	53,28 A	353,14 A	47,14 A	8,41
Seca	26,06 B	233,07 B	35,23 B	7,11
EPM	3,35	12,14	1,81	0,52
0,10-0,20 m				
Sistema de cultivo				
Elefante B	37,19	245,77 BC	31,80 B	8,11 AB
Mott	29,69	387,24 A	38,24 AB	10,98 A
Cunhã	35,23	270,78 B	44,71 A	6,19 B
Elefante B + cunhã	42,31	264,48 B	40,78 AB	7,60 AB
Mott + cunhã	36,64	192,3 C	41,92 AB	4,81 B
EPM	4,37	16,48	2,82	0,86
Época do ano				
Chuvosa	47,14 A	340,75 A	45,18 A	8,81 A
Seca	25,28 B	203,51 B	33,81 B	6,27 B
EPM	2,76	10,42	1,78	0,54
0,20 -0,40 m				
Sistema de cultivo				
Elefante B	35,92	304,61 B	26,22 C	12,36 A
Mott	28,00	380,28 A	33,34 ABC	12,85 A
Cunhã	28,60	272,20 BC	35,91 AB	7,66 BC
Elefante B + cunhã	27,00	241,38 C	28,95 BC	8,24 B
Mott + cunhã	31,22	185,99 D	38,73 A	5,21 C
EPM	2,73	13,41	2,39	0,66
Época do ano				
Chuvosa	37,27 A	301,33 A	31,79	10,86 A
Seca	23,02 B	252,45 B	33,47	7,83 B
EPM	1,72	8,48	1,51	0,41

Médias seguidas por mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). EPM: Erro padrão da média.

### 3.4 Quociente metabólico, microbiano e de mineralização

O quociente metabólico ( $qCO_2$ ) foi afetado pelos diferentes sistemas de cultivo nas profundidades de 0-0,10 m. O solo cultivado com Mott em monocultivo apresentou menor  $qCO_2$  do que o Mott consorciado com cunhã, não diferindo dos demais (Figura 3A). Já o monocultivo de elefante B não diferiu do consórcio elefante B + cunhã.

Nas profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, o  $qCO_2$  foi afetado pela interação do sistema de cultivo x época do ano (Figuras 2B e C).

Na época chuvosa, na profundidade 0,10-0,20 m, o solo cultivado com o consórcio Mott + cunhã apresentou maior  $qCO_2$  do que os demais cultivos, e o elefante B em monocultivo não diferiu do consórcio (Figura 2 B). Porém, durante a época seca não foram observadas diferenças entre os sistemas de cultivos. Na época chuvosa e seca, na profundidade 0,20-0,40 m, o solo cultivado com o consórcio Mott + cunhã apresentou maior  $qCO_2$  em comparação ao Mott em monocultivo (Figura 2C).

Em relação à profundidade, o maior  $qCO_2$  foi observado na profundidade 0,10-0,20 m, em comparação às demais profundidades do solo.

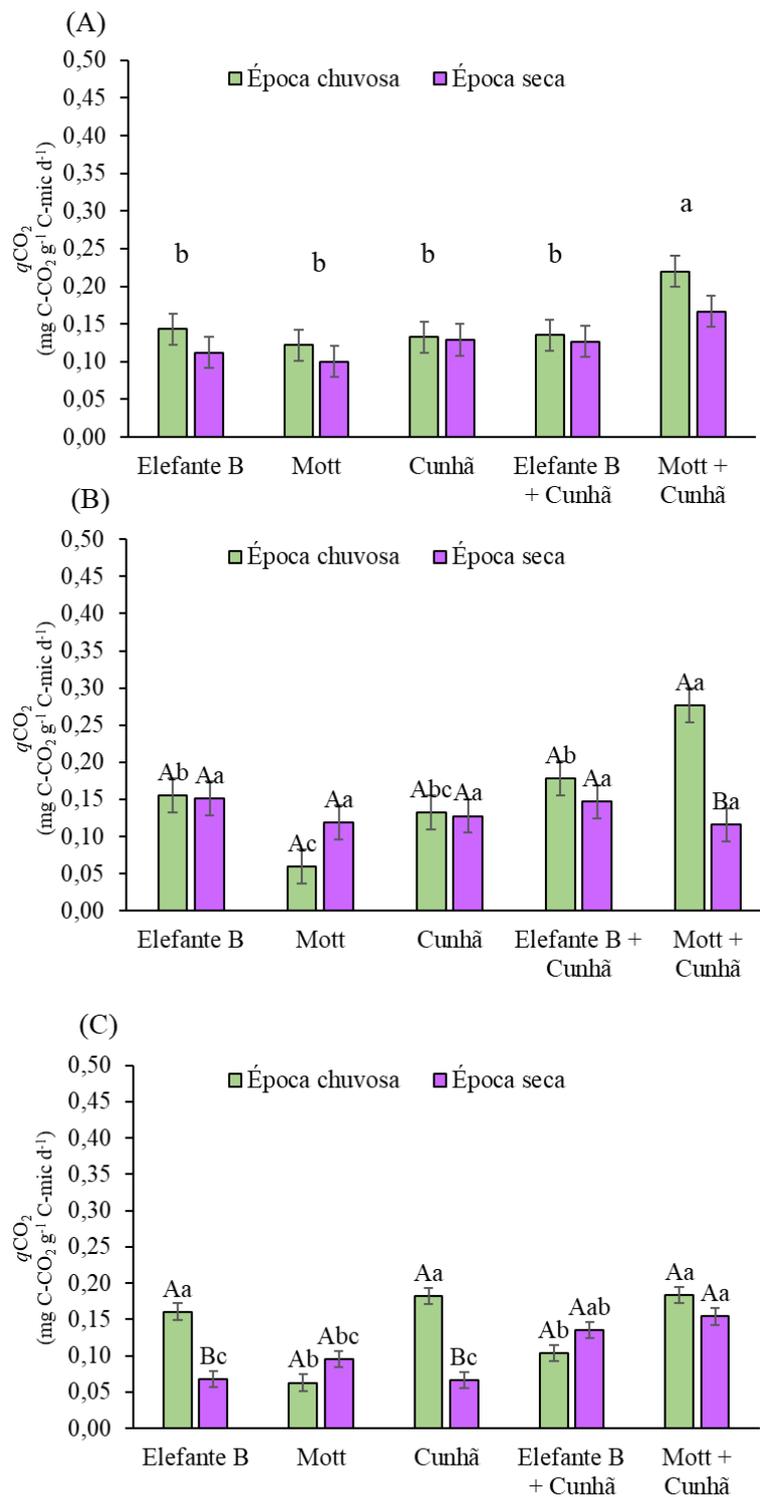


Figura 2. Quociente metabólico ( $q_{CO_2}$ ) do solo em diferentes sistemas de cultivos, época do ano nas profundidades de 0-0,10 (A), 0,10-0,20 (B) e 0,20-0,40 m (C).

Letras maiúsculas diferentes indicam diferença significativa dentro de cada sistema de cultivo; letras minúsculas diferentes indicam diferença significativa dentro de cada época do ano pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras indicam o erro padrão da média.

O quociente microbiano ( $qMIC$ ) foi modificado pela interação do sistema de cultivo x época do ano nas profundidades estudadas (Figura 3). No solo cultivado com o Mott em monocultivo foi observado maior  $qMIC$  na época chuvosa do que na época seca. Porém, para o consórcio Mott + cunhã não houve diferença entre as épocas (Figuras 3A, B e C). Também foi observado que o solo do elefante B em monocultivo não diferiu do solo do consórcio, na época chuvosa e seca, nas diferentes profundidades avaliadas.

Na época chuvosa, o maior  $qMIC$  foi encontrado no monocultivo de cunhã (0-0,10 m). Nessa mesma época, foi observado maior  $qMIC$  (0,10-0,40 m) no Mott em monocultivo com cunhã. Na época seca, os solos dos diferentes sistemas de cultivo não diferiram para  $qMIC$  (0-0,20 m). Na época seca, o maior  $qMIC$  foi encontrado no monocultivo de cunhã (0,20-0,040 m). O  $qMIC$  não diferiu estatisticamente entre as profundidades do solo avaliadas.

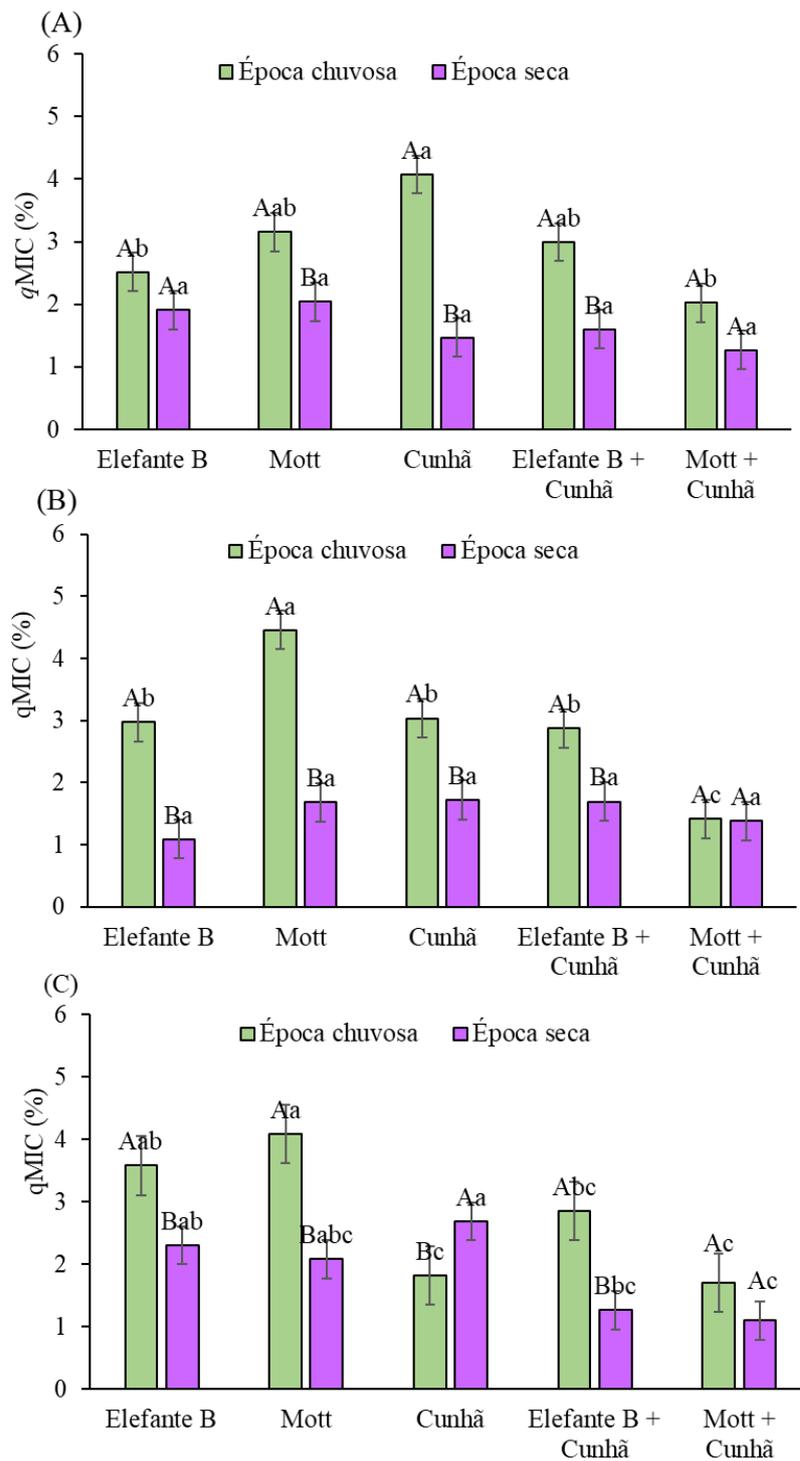


Figura 3. Quociente microbiano ( $qMIC$ ) em diferentes sistemas de cultivos na profundidade de 0-0,10 (A), 0,10-0,20 (B) e 0,20-0,40 m (C) e épocas do ano. Letras maiúsculas diferentes indicam diferença significativa dentro de cada sistema de cultivo; letras minúsculas diferentes indicam diferença significativa dentro de cada época do ano pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras indicam o erro padrão da média.

O quociente de mineralização ( $qM$ ) do solo não apresentou diferença significativa para as profundidades, bem como para os sistemas de cultivo, com médias de 3% para as

profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m (Figuras 4A e B). Foi observado maior  $q_M$  na época chuvosa, em comparação com a época seca, na profundidade de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m.

O  $q_M$  foi afetado pela interação do sistema de cultivo x época do ano na profundidade de 0,20-0,40 m (Figura 4C). No solo cultivado com o Elefante B em monocultivo, foi observado maior  $q_M$  na época chuvosa do que na época seca. Porém, para o consórcio elefante B + cunhã não houve diferença entre as épocas. Na época chuvosa, maior  $q_M$  foi encontrado no solo cultivado com o elefante B em monocultivo. Na época seca, os diferentes sistemas de cultivo não diferiram para  $q_M$ . Também foi observado que nas épocas chuvosa e seca, o  $q_M$  do solo com Mott em monocultivo não diferiu do consórcio.

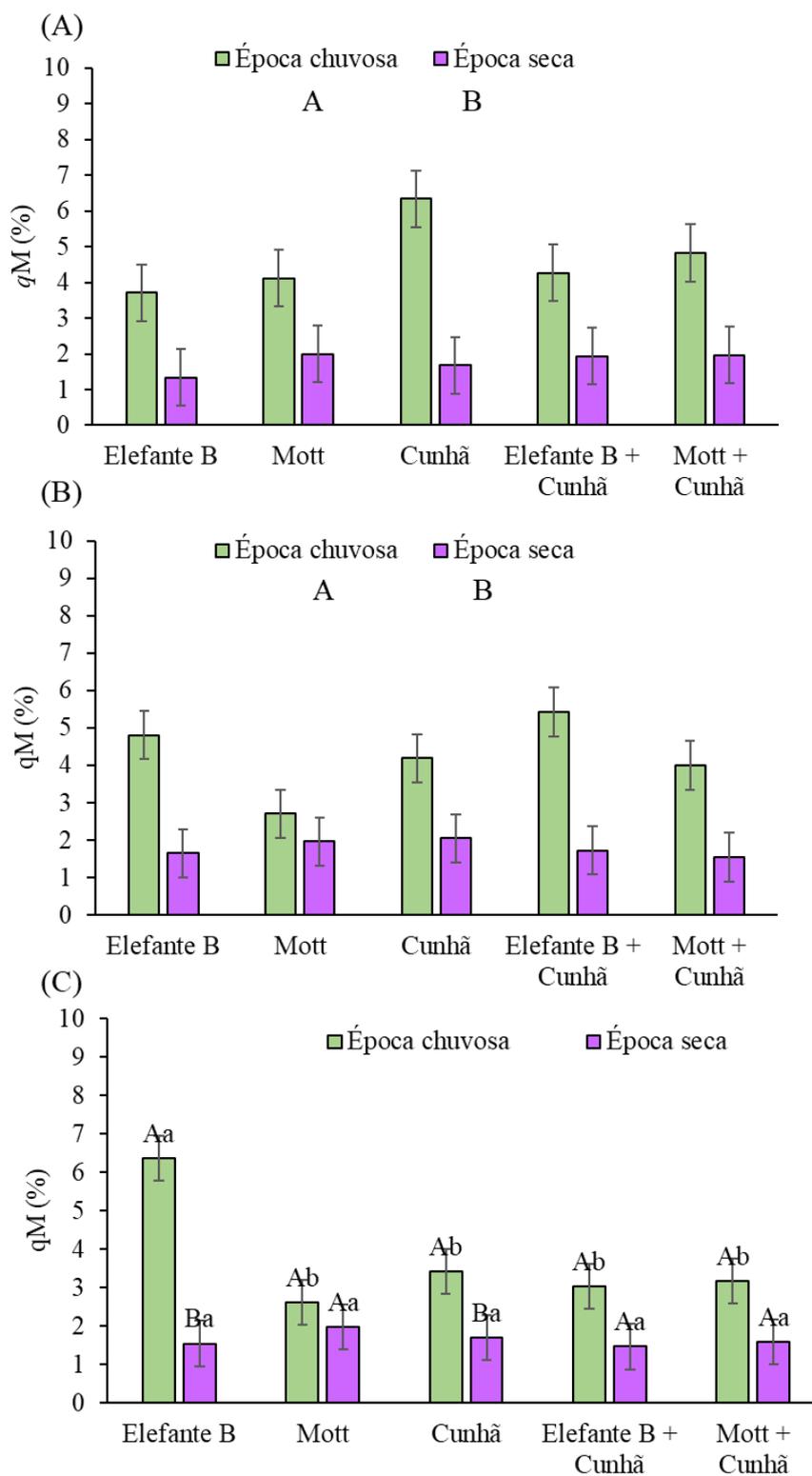


Figura 4. Quociente mineralização ( $qM$ ) em diferentes sistemas de cultivos na profundidade de 0-0,10 (A), 0,10-0,20 (B) e 0,20-0,40 m (C) e épocas do ano.

Letras maiúsculas diferentes indicam diferença significativa dentro de cada sistema de cultivo; letras minúsculas diferentes indicam diferença significativa dentro de cada época do ano pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras indicam o erro padrão da média.

### 3.5 Análise de componentes principais

O primeiro componente principal (CP1) explicou 42% da variação e agrupou principalmente RBS,  $qM$ ,  $qMIC$ , GFE e AF (quadrantes direito) versus AH/AF (quadrantes esquerdos). Já o segundo (CP2) explicou 28% da variação e agrupou  $qCO_2$  e  $Nmic$  (quadrantes abaixo) versus  $CNmic$ ,  $Cmic$ , GT, AH e HUM (quadrantes acima).

A ACP permitiu identificar padrões de associação com as variáveis dependentes diferentes entre os sistemas de cultivo (Figura 5). Os sistemas de cultivo com elefante B e a cunhã em monocultivo foram mais associados ao CP1. Os sistemas de cultivo com Mott apresentaram maior associação com o CP2, porém, o Mott em monocultivo esteve mais associado  $qCO_2$  e  $Nmic$ , enquanto o consórcio com cunhã esteve mais associado com  $CNmic$ ,  $Cmic$ , GT, AM e HUM. A época do ano foi claramente distinguida pela ACP. As variáveis AH, HUM e AH/AF estiveram mais associadas à época seca, enquanto as demais à época chuvosa.

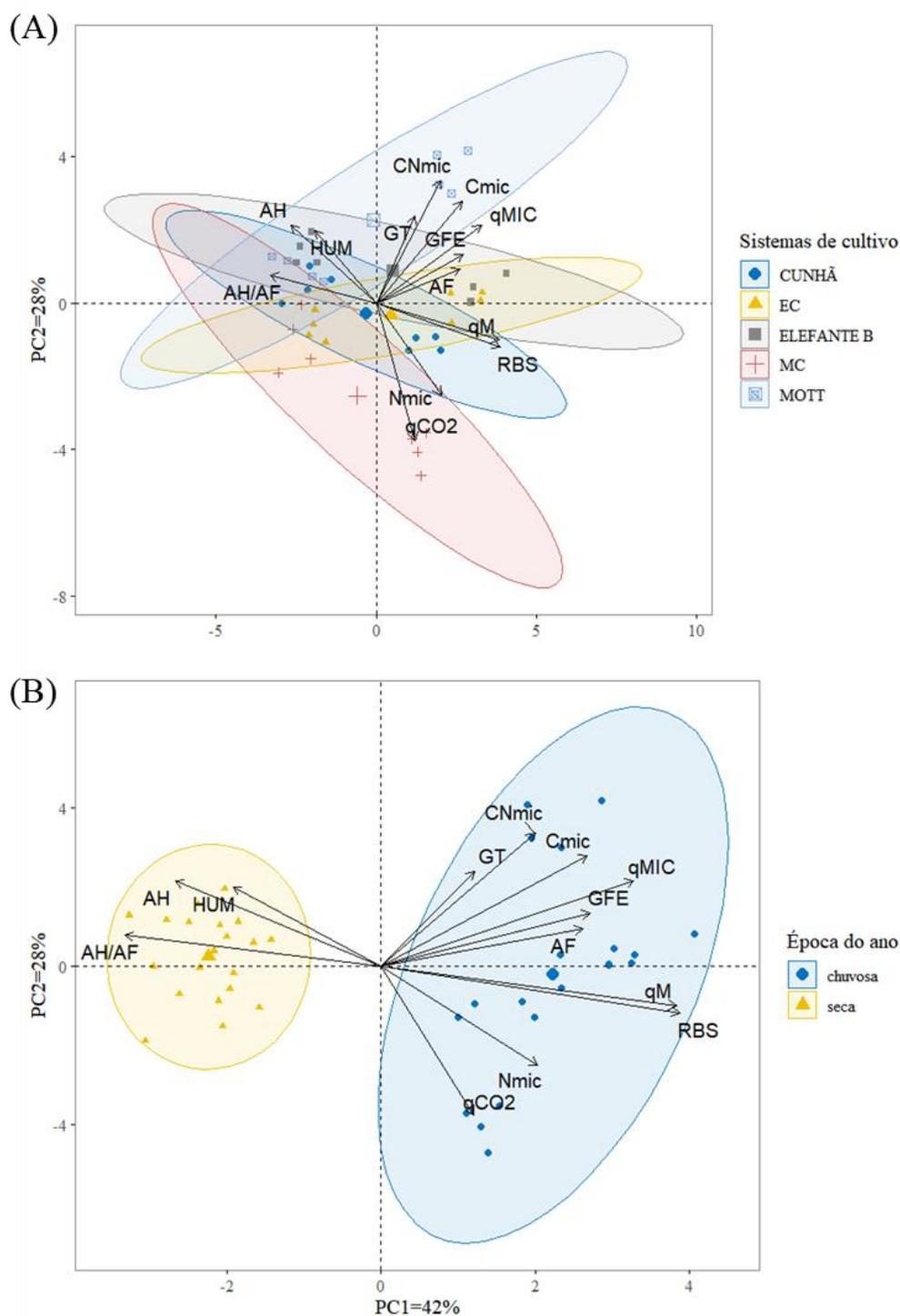


Figura 5. Análise de componentes principais para as variáveis relacionadas a atividade microbiana e matéria orgânica em diferentes sistemas de cultivo com Capim-elefante e Cunchã (A) e épocas do ano (B). As elipses indicam intervalos de confiança de 95%. O comprimento das setas é proporcional a sua importância e o ângulo entre duas setas reflete a magnitude da correlação entre as variáveis. As siglas representam: AH: ácidos húmicos, AF: ácidos fúlvicos, AH/AF: relação ácidos húmicos e fúlvicos, HUM: humina, GFE: glomalina facilmente extraível, GT: glomalina total, RBS: respiração basal do solo, Cmic: carbono da biomassa microbiana, Nmic: nitrogênio da biomassa microbiana, CNmic: relação do carbono e nitrogênio da biomassa microbiana,  $qCO_2$ : quociente metabólico,  $qMIC$ : quociente microbiano,  $qM$ : quociente de mineralização.

#### 4 DISCUSSÃO

Foram avaliados diferentes compartimentos do C e N do solo, como frações da matéria orgânica, glomalina, atividade e biomassa microbiana. Cabe destacar que o C e o N contidos na glomalina representam 3% e 5%, respectivamente, do C e N total do solo (LOVELOCK *et al.*, 2004). Já o C-mic compreende 1 a 3% do C total, enquanto o N-mic representa 5% do N total do solo (ASHRAF *et al.*, 2022). E as frações húmicas representam 85 a 90% do carbono orgânico do solo, em especial a HUM (PEGORARO *et al.*, 2018).

Os maiores teores de AH, HUM e a relação AH/AF e menor teor de AF foram encontrados na época seca (Figura 5B) em comparação com a época chuvosa. Isso pode estar relacionado às condições climáticas, pois na época seca há menor umidade do solo, resultando em menor atividade microbiana (Tabela 2) e conseqüentemente na preservação da matéria orgânica (COSTA *et al.*, 2017). Esses resultados reforçam que as frações AH e HUM são mais estáveis e que o AF é mais lábil (GMACH *et al.*, 2018; GUIMARÃES *et al.*, 2013; KUNLANIT *et al.*, 2019). Os resultados encontrados corroboram com Sayer *et al.* (2011) que relataram que a decomposição e a respiração heterotrófica são inibidas em condições de seca, reduzindo a liberação de C no solo.

Na época chuvosa, ocorre aumento na taxa de decomposição, que leva ao aumento do ácido fúlvico na matéria orgânica do solo. O ácido fúlvico possui maior mobilidade no solo que as outras frações da matéria orgânica e, portanto, maior contribuição para os estoques de C e N do solo em um curto intervalo de tempo (ASSUNÇÃO *et al.*, 2019).

Nesse estudo, a fração HUM armazenou maior parte do carbono contido nas frações húmicas (Tabela 2). A HUM representou 40% da fração total de carbono, seguido por AF, que contribuiu com 35%, e AH, com 25%. Esse dado é importante, tendo em vista que a HUM é a fração mais recalcitrante, o que contribui para o armazenamento desse elemento no solo (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2018).

Durante a época chuvosa, foi observada relação AH/AF com média de 0,66. Essa baixa relação (<1) indica boa qualidade da MOS (GMACH *et al.*, 2018). Dessa forma, na época chuvosa ocorre maior acúmulo da fração C-lábil, em relação à fração mais recalcitrante, o que sugere melhora na qualidade do húmus ao longo do tempo (GUIMARÃES *et al.*, 2013).

Em relação aos sistemas de cultivo, foram observados que os monocultivos das gramíneas fertilizadas com nitrogênio não diferiram quanto a AF e relação AH/AF, comparada com as gramíneas consorciadas com cunhã. Assim, ambos os sistemas de cultivo contribuem para uma qualidade de MOS semelhante.

As frações da matéria orgânica são importantes para o desenvolvimento das plantas, por promoverem formação de raízes, alongamento radicular e aumento de área e volume através de sinalizações hormonais (CASTRO *et al.*, 2021; CANELLAS *et al.*, 2011; DOBBSS *et al.*, 2010; GARCÍA *et al.*, 2016; TAVARES *et al.*, 2017).

Notou-se que a glomalina facilmente extraível e a total não diferiram dos diferentes sistemas de cultivos (Tabela 3). Isso pode estar relacionado com a semelhança entre o capim-elefante adubado com nitrogênio e consorciado com a leguminosa, que adiciona N via FBN. Ambas podem favorecer o crescimento de fungos micorrízicos arbusculares e consequentemente a adição de glomalina no solo.

Também foi observado que a glomalina facilmente extraível foi maior na época chuvosa, em comparação com a época seca (Tabela 3). Nesse período, ocorre maior biomassa vegetal acima (Capítulo 2, Figura 5 e 6) e abaixo do solo, assim como deposição de substratos que estimulam o crescimento de hifas de fungos micorrízicos arbusculares (BURROWS, 2014). Também, o maior teor de umidade presente no solo durante a época chuvosa estimula o crescimento de estruturas como hifas em vez de esporos (MATOS *et al.*, 2022).

A glomalina é dividida em duas frações: a facilmente extraível e a total. A facilmente extraível consiste em proteínas fúngicas produzidas recentemente e relativamente mais lábeis, enquanto a glomalina total é a soma da produção recente e antiga de proteínas fúngicas e é quimicamente mais recalcitrante. Os nutrientes contidos na glomalina podem persistir no solo até 42 anos ou mais, melhorando o sequestro de C do solo (RILLIG *et al.*, 2011). Dessa forma, cada compartimento contribui de forma diferente com o C total do solo.

A glomalina além de ajudar no armazenamento de C no solo, atua como um condicionador do solo, melhorando a fertilidade deste, incluindo aeração, capacidade de retenção de água, nutrientes e produtividade das plantas (FOKOM *et al.*, 2012). Alguns estudos relatam que os fungos desempenham um papel importante na agregação do solo por possuírem três mecanismos de agregação diferentes: emaranhamento físico, produção de substâncias hidrofóbicas e produção de polissacarídeos extracelulares (SALL *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2020).

O solo cultivado com Mott apresentou maior C-mic, em comparação ao elefante B nas camadas de 0,10-0,20 e de 0,20-0,40 m (Tabela 3). Isso pode ser atribuído às diferenças de qualidade e quantidade de exsudatos radiculares fornecido para o solo pelos diferentes genótipos (BARGALI *et al.*, 2018). O elefante B possui maior sistema radicular (ALENCAR *et al.*, 2009) e maior altura, acarretando maior extração de nutrientes do solo e, assim, menos nutrientes disponíveis para os micro-organismos.

O elefante B e o Mott em monocultivo e consorciado com a cunhã não diferiram para N-mic (Tabela 4). Isso demonstra que a utilização do N pelos micro-organismos foi semelhante, apesar das diferentes fontes de N, uma vez que, nos sistemas consorciados, o N foi via FBN, e nos monocultivos, o N foi oriundo da fertilização.

Os nutrientes contidos na biomassa microbiana são indicativos que estão imobilizados temporariamente, e que posteriormente podem ser disponibilizados para o solo e vegetais, o que resulta em menores perdas destes nutrientes no sistema solo-planta (MORUGÁN-CORONADO *et al.*, 2019).

O solo com Mott em monocultivo apresentou maior  $qCO_2$  do que o Mott consorciado com cunhã, porém, com valores equivalentes para  $qMIC$  e  $qM$ . O maior  $qCO_2$  reflete menor eficiência dos micro-organismos do solo, haja vista que menos C é incorporado na biomassa microbiana (C-mic) e mais C é perdido pela respiração (RBS). Estudos demonstram que a presença de fertilizantes aumenta o  $qCO_2$  e estimula o crescimento microbiano, o que favorece a formação de comunidades microbianas eficientes (WANG *et al.*, 2004).

O  $qMIC$  acima de 1% infere a melhores condições microbiológicas do solo, o que favorece a mineralização da matéria orgânica, resultando em maior incorporação de carbono nas células microbianas. Já o maior  $qM$  indica melhor eficiência dos micro-organismos em metabolizar a matéria orgânica (MOSCATELLI *et al.*, 2005). Os resultados encontrados nesta pesquisa indicam que a biomassa microbiana está mais ativa, decompondo e mineralizando os compostos orgânicos nos diferentes sistemas de cultivo de capim-elefante, consorciado ou não com a cunhã.

Na época chuvosa ocorreu maior atividade e biomassa microbiana (Tabela 4, Figura 5B), além de maior  $qMIC$  e  $qM$ , em comparação com a época seca, (42% e 58% a mais, respectivamente) (Figuras 3 e 4). Este resultado está relacionado com as condições favoráveis presente nessa época, como umidade do solo, temperatura do ar (25°C, Figura 1), nutrientes via adubação e deposição radicular. O retorno das condições favoráveis estimula os processos metabólicos dos micro-organismos do solo, levando ao aumento das taxas de respiração e da biomassa microbiana (SAYER *et al.* 2011; PARDO-PLAZA *et al.*, 2019).

De forma geral, as condições favoráveis (umidade, temperatura e nutrientes) encontradas na época chuvosa beneficiam a biomassa microbiana, levando a uma melhor ciclagem de nutrientes e processos de decomposição no solo (MOSCATELLI *et al.*, 2005). Uma comunidade microbiana mais ativa durante a estação chuvosa pode contribuir para a resiliência geral do ecossistema. O aumento da decomposição e da ciclagem de nutrientes

pode aumentar a fertilidade do solo e apoiar o crescimento das plantas, o que é importante para a saúde do ecossistema.

Na camada superficial (0-0,10 m) foi observada maior atividade microbiana, maior N-mic e menor relação C/N-mic, em relação às demais profundidades avaliadas. Isso se deve a maior concentração e disponibilidade de compostos orgânicos, como por exemplo, exsudatos radiculares e fertilizantes, que estimulam os micro-organismos do solo (DADALTO *et al.*, 2015).

Estas descobertas sugerem que os fertilizantes nitrogenados podem ser substituídos pela inclusão de cunã como proposto pelo Plano Nacional de Fertilizantes. Essa substituição não apenas reduz os custos de produção, mas também aumenta a estabilidade econômica dos produtores (CASTRO; MINGOTI, 2023). Além disso, a diminuição do uso de fertilizantes traz vantagens ambientais ao reduzir as emissões de gases de efeito estufa e mitigar a contaminação das águas subterrâneas (KUMAR; KUMAR; PRAKASH, 2019). A presença de leguminosas também estimula a atividade polinizadora e melhora a qualidade nutricional da forragem (SCHULTZE-KRAFT *et al.*, 2018; SALES-SILVA *et al.*, 2023a). Dessa forma, a inclusão da leguminosa promove uma produção mais sustentável.

## 5 CONCLUSÕES

Comparado ao monocultivo fertilizado com nitrogênio, a inclusão da cunã em capineiras de capim-elefante, independente do porte da gramínea, incrementa serviços ecossistêmicos de suporte, pois mantém a atividade microbiana, teor de glomalina e qualidade da matéria orgânica do solo (frações húmicas), a eficiência dos micro-organismos em metabolizar a matéria orgânica, e favorece o armazenamento de C no solo através de frações recalcitrantes. Dessa forma, em capineiras de capim-elefante, independente do porte da planta, a inclusão de cunã pode promover maior sustentabilidade, pela redução da necessidade de adubação nitrogenada.

As condições favoráveis encontradas na época chuvosa beneficiam a biomassa microbiana, levando a uma maior atividade microbiana e a melhor ciclagem de nutrientes por promover a decomposição da matéria orgânica do solo e teor de glomalina do solo.

## REFERÊNCIAS

- ALEF, K.; NANNIPIERI, P. **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. Cambridge, MA: Academic Press. 576 p. 1995.
- ALENCAR, C. A. B. *et al.* Irrigação de pastagem: atualidade e recomendações para uso e manejo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, p. 98-108, 2009.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. Determination of ecophysiological maintenance carbon requirements of soil microorganisms in a dormant state. **Biology and Fertility of Soils**, v. 1, p. 81-89, 1985.
- ARAÚJO FILHO, R. N. *et al.* Recovery of carbon stocks in deforested caatinga dry forest soils requires at least 60 years. **Forest Ecology and Management**, v. 407, p. 210-220, 2018.
- ASHRAF, M. N.; WAQAS, M. A.; RAHMAN, S. Microbial metabolic quotient is a dynamic indicator of soil health: Trends, implications and perspectives. **Eurasian Soil Science**, v. 55, n. 12, p. 1794-1803, 2022.
- ASSUNÇÃO, S. A. *et al.* Carbon input and the structural quality of soil organic matter as a function of agricultural management in a tropical climate region of Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 658, p. 901-911, 2019.
- AYUB, M. A. *et al.* Restoration of degraded soil for sustainable agriculture. **Soil Health Restoration and Management**, p. 31-81, 2020.
- BAATH, E. Temperature sensitivity of soil microbial activity modeled by the square root equation as a unifying model to differentiate between direct temperature effects and microbial community adaptation. **Global Change Biology**, v. 24, n. 7, p. 2850-2861, 2018.
- BARGALI, K. *et al.* Effect of vegetation type and season on microbial biomass carbon in Central Himalayan forest soils, India. **Catena**, v. 171, p. 125-135, 2018.
- BENITES, V. M.; MADARI, B.; MACHADO, P. L. O. A. **Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo**: Um procedimento simplificado de baixo custo. Rio de Janeiro, 2003. 7p. (Comunicado Técnico 16, Embrapa Solos)
- BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, v. 7, n. 72, p. 248-254, 1976.
- BURROWS, R. L. Glomalin production and infectivity of arbuscular-mycorrhizal fungi in response to grassland plant diversity. **American Journal of Plant Sciences**, v. 2014, 2014.
- CAMELO, D. *et al.* Soil microbial activity and biomass in semiarid agroforestry systems integrating forage cactus and tree legumes. **Agronomy**, v. 11, n. 8, p. 1558, 2021.
- CANELLAS, L.P. *et al.* Probing the hormonal activity of fractionated molecular humic components in tomato auxin mutants. **Annals of Applied Biology**, v. 159, n. 2, p. 202-211, 2011.
- CASTRO, G. S. A.; MINGOTI, R. **Produção nacional de fertilizantes**: potencial expansão do setor de fertilizantes produzidos no Brasil. Propostas para o Brasil 2023-2026. Agronegócio. 71p. 2023.

- CASTRO, T A. V. T. *et al.* Humic acids induce a eustress state via photosynthesis and nitrogen metabolism leading to a root growth improvement in rice plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 162, p. 171-184, 2021.
- CAVALCANTI, F. J. A.; LIMA JÚNIOR, M. A.; LIMA, J. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco: 2º edição**, Recife: Instituto Agrônômico de Pernambuco. 212 p. 2008.
- COSTA, P. M. O. *et al.* Dynamics of leaf litter and soil respiration in a complex multistrata agroforestry system, Pernambuco, Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, v. 19, p. 1189-1203, 2017.
- DADALTO, J. P. *et al.* Sistema de preparo do solo e sua influência na atividade microbiana. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 35, p. 506-513, 2015.
- DIAZ-GONZALEZ, F. A. *et al.* Machine learning and remote sensing techniques applied to estimate soil indicators—Review. **Ecological Indicators**, v. 135, p. 108517, 2022.
- DOBBS, L. B. *et al.* Bioactivity of chemically transformed humic matter from vermicompost on plant root growth. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 58, n. 6, p. 3681-3688, 2010.
- FENG, H. *et al.* On-farm assessment of cover cropping effects on soil C and N pools, enzyme activities, and microbial community structure. **The Journal of Agricultural Science**, v. 159, n. 3-4, p. 216-226, 2021.
- FOKOM, R. *et al.* Glomalin related soil protein, carbon, nitrogen and soil aggregate stability as affected by land use variation in the humid forest zone of south Cameroon. **Soil and Tillage Research**, v. 120, p. 69-75, 2012.
- GARCÍA, A. C. *et al.* Structure-property-function relationship in humic substances to explain the biological activity in plants. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 20798, 2016.
- GISPERT, M. *et al.* The impact of land management and abandonment on soil enzymatic activity, glomalin content and aggregate stability. **Geoderma**, v. 202, p. 51-61, 2013.
- GMACH, M. R. *et al.* Soil organic matter dynamics and land-use change on Oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 14, p. e00178, 2018.
- GUIMARÃES, D. V. *et al.* Soil organic matter pools and carbon fractions in soil under different land uses. **Soil and Tillage Research**, v. 126, p. 177-182, 2013.
- ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Microwave irradiation of soil for measurement of microbial biomass carbon. **Biology and Fertility of Soils**, v. 27, p. 408-416, 1998.
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015, International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. **World Soil Resources Reports** no. 106. FAO, Rome. 2015.
- JACOBY, R. *et al.* The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition—current knowledge and future directions. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1617, 2017.
- JHARIYA, M. K. *et al.* **Leguminous trees an innovative tool for soil sustainability.** Legumes for soil health and sustainable management, p. 315-345, 2018.
- KUMAR, R.; KUMAR, R.; PRAKASH, O. **The impact of chemical fertilizers on our environment and ecosystem.** Chief Ed, v.35, p.69, 2019.

- KUNLANIT, B. *et al.* Land–Use Changes Influencing C Sequestration and Quality in Topsoil and Subsoil. **Agronomy**, v. 9, n. 9, p. 520, 2019.
- LEMOS, M. F. *et al.* Grass size and butterfly pea inclusion modify the nutritional value of elephant grass silage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 56, 2021.
- LIRA JUNIOR, M. A. *et al.* Legume silvopastoral systems enhance soil organic matter quality in a subhumid tropical environment. **Soil Science Society of America Journal**, v. 84, n. 4, p. 1209-1218, 2020.
- LOVELOCK, C. E.; WRIGHT, S. F.; CLARK, D. A.; RUESS, R. W. Soil stocks of glomalin produced by arbuscular mycorrhizal fungi across a tropical rain forest landscape. **Journal of Ecology**, v. 92, n. 2, p. 278-287, 2004.
- LOVELOCK, C.E. *et al.* Soil stocks of glomalin produced by arbuscular mycorrhizal fungi across a tropical rain forest landscape. **Journal of Ecology**, p. 278-287, 2004.
- MATOS, P. S. *et al.* Short-term modifications of mycorrhizal fungi, glomalin and soil attributes in a tropical agroforestry. **Acta Oecologica**, v. 114, p. 103815, 2022.
- MISHRA, A. *et al.* Unboxing the black box—one step forward to understand the soil microbiome: A systematic review. **Microbial Ecology**, v. 85, n. 2, p. 669-683, 2023.
- MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e Bioquímica do solo**. UFLA: Lavras, Brazil, 729 p. 2006.
- MORUGÁN-CORONADO, A. *et al.* The effect of moisture on soil microbial properties and nitrogen cyclers in Mediterranean sweet orange orchards under organic and inorganic fertilization. **Science of The Total Environment**, v. 655, p. 158-167, 2019.
- MOSCATELLI, M. C. *et al.* Soil microbial indices as bioindicators of environmental changes in a poplar plantation. **Ecological Indicators**, v. 5, n. 3, p. 171-179, 2005.
- MOTA, M. A. A. **Aspectos morfológicos e produtivos da *Clitoria ternatea* L. em diferentes sistemas de cultivo**: impacto na diversidade e comportamento de visitantes florais. 2022. 73f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Programa de Pós-graduação em Zootecnia, Universidade Federal Rural de Pernambuco.
- PARDO-PLAZA, Y. J. *et al.* Microbial biomass and basal soil respiration under agroforestry systems with coffee crops. **Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica**, v. 22, n. 1, 2019.
- PEGORARO, R. F. *et al.* Carbon and nitrogen stocks in the soil and humic substances of agricultural crops in the semi-arid region. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 49, p. 574-583, 2018.
- RILLIG, M.C. *et al.* Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils. **Plant and Soil**, v. 233, p. 167-177, 2001.
- SACCÁ, M. L. *et al.* Ecosystem services provided by soil microorganisms. In: **Soil biological communities and ecosystem resilience**. Springer International Publishing, 2017. p. 9-24.
- SALES-SILVA, T. B. *et al.* Does the presence of tall or dwarf elephant grass genotypes change the nutritive value of butterfly pea in grass–legume intercrops? **African Journal of Range Forage Science**, p. 1-10, 2023a.

- SALES-SILVA, T. B. *et al.* The growth habits of tropical legumes affect the nutritive herbage value more than harvesting frequency. **Crop and Pasture Science**, v. 75, n. 1, p. NULL-NULL, 2023b.
- SALL, S. N. *et al.* Effects of residue quality and soil mineral N on microbial activities and soil aggregation in a tropical sandy soil in Senegal. **European Journal of Soil Biology**, v. 75, p. 62-69, 2016.
- SANTOS, A. *et al.* Glomalin in soil aggregates under different forest and pasture systems in the North of Rio de Janeiro state, Brazil. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 8, p. 100088, 2020.
- SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Embrapa. 5<sup>a</sup> ed. Brasília, 2018. 356 p.
- SAS Institute Inc. **SAS® On Demand for academics: user's guide**, Cary: SAS Institute Inc, 2014.
- SAYER, E. J. *et al.* Soil carbon release enhanced by increased tropical forest litterfall. **Nature Climate Change**, v. 1, n. 6, p. 304-307, 2011.
- SCHULTZE-KRAFT, R. *et al.* Tropical forage legumes for environmental benefits: An overview. **Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales**, v. 6, n. 1, p. 1-14, 2018.
- SHERROD, L. A. *et al.* Do fulvic, humic, and humin carbon fractions represent meaningful biological, physical, and chemical carbon pools? **Journal of Environmental Quality**, v. 48, n. 6, p. 1587-1593, 2019.
- SILVA, P. H. F. *et al.* Agronomic responses and herbage nutritive value of elephant grass (*Cenchrus purpureus*) genotypes grown as monocrops and mixed with butterfly pea (*Clitoria ternatea*). **Crop and Pasture Science**, v. 74, p. A-M, 2023.
- SINGH, A. K.; RAI, A.; SINGH, N. Effect of long-term land use systems on fractions of glomalin and soil organic carbon in the Indo-Gangetic plain. **Geoderma**, v. 277, p. 41-50, 2016.
- SWIFT, R. S. **Organic matter characterization**. Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods, v. 5, p. 1011-1069, 1996.
- TAVARES, O. *et al.* Humic acid differentially improves nitrate kinetics under low- and high-affinity systems and alters the expression of plasma membrane H<sup>+</sup>-ATPases and nitrate transporters in rice. **Annals of Applied Biology**, v. 170, n. 1, p. 89-103, 2017.
- TEAGUE, R.; KREUTER, U. Managing grazing to restore soil health, ecosystem function, and ecosystem services. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, p. 157, 2020.
- TRAILL, S. *et al.* Tropical forage legumes provide large nitrogen benefits to maize except when fodder is removed. **Crop and Pasture Science**, v. 69, n. 2, p. 183-193, 2018.
- WANG, Q. *et al.* Spatial distribution of glomalin-related soil protein and its relationship with sediment carbon sequestration across a mangrove forest. **Science of the Total Environment**, v. 613, p. 548-556, 2018.
- WANG, W. J. *et al.* Decomposition dynamics of plant materials in relation to nitrogen availability and biochemistry determined by NMR and wet-chemical analysis. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 36, n. 12, p. 2045-2058, 2004.

WRIGHT, S. F.; UPADHYAYA, A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. **Plant and Soil**, v. 198, p. 97-107, 1998.

WRIGHT, S. F.; UPADHYAYA, A. A extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. **Soil Science**, v. 161, n. 9, p. 575-586, 1996.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.19, p. 1467-1476. 1988.

ZHAO, J. *et al.* Effects of monoculture and mixed culture of grass and legume forage species on soil microbial community structure under different levels of nitrogen fertilization. **European Journal of Soil Biology**, v. 68, p. 61–68, 2015.