

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**

**FLAVIANO FERNANDES DE OLIVEIRA**

**FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO E EMISSÕES DE GASES DE  
EFEITO ESTUFA EM CULTIVOS IRRIGADOS DE GRAMÍNEAS E  
LEGUMINOSA NO SEMIÁRIDO**

**RECIFE**

**2024**

Flaviano Fernandes de Oliveira  
Engenheiro Agrônomo

**Fixação biológica de nitrogênio e emissões de gases de efeito estufa em  
cultivos irrigados de gramíneas e leguminosa no semiárido**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Orientadora:  
Dra. Ana Dolores Santiago de Freitas

Coorientadores:  
Dr. Paulo Ivan Fernandes Júnior  
Dra. Diana Signor Deon

**Recife  
2024**

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)

---

O48ff

Fernandes de Oliveira, Flaviano  
FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO E EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM  
CULTIVOS IRRIGADOS DE GRAMÍNEAS E LEGUMINOSA NO SEMIÁRIDO / Flaviano Fernandes de  
Oliveira. - 2024.  
98 f.

Orientadora: Ana Dolores Santiago de Freitas.  
Coorientadora: Diana Signor Deon.  
Inclui referências e anexo(s).

Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em  
Ciência do Solo, Recife, 2024.

1. Fixação biológica de nitrogênio. 2. Semiárido. 3. Espécies forrageiras. 4. Gramíneas C4. 5. N2O. I.  
Freitas, Ana Dolores Santiago de, orient. II. Deon, Diana Signor, coorient. III. Título

---

CDD 631.4

FLAVIANO FERNANDES DE OLIVEIRA

**Fixação biológica de nitrogênio e emissões de gases de efeito estufa em cultivos irrigados de gramíneas e leguminosa no semiárido**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Aprovada em 27 de fevereiro de 2024

---

Dra. Ana Dolores Santiago de Freitas  
Orientadora

Universidade Federal Rural de Pernambuco

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Plínio Barbosa Camargo  
Universidade de São Paulo

---

Dra. Diana Signor Deon  
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Semiárido

---

Prof. Dr. Everardo Valadares de Sá Barreto Sampaio  
Universidade Federal de Pernambuco

*Você sabia que o hoje é seu dia mais importante?  
Que o ontem já passou e que o amanhã está distante?  
Então saiba que a nossa vida é como uma corrida,  
Que o segredo não é ganhar, mas sim chegar sendo constante.  
Então, por favor, não desista, o avião antes de decolar primeiro ele percorre  
a pista,  
O padrão de beleza é o seu coração e não a exposição do seu corpo no insta,  
Então, por favor, não desista.  
Mas sabe qual o problema?  
É que a religião colocou em grande telão que pra você ser aceito, você tem  
que ser perfeito e está dentro do padrão.  
É prostituta,  
É tatuado,  
Tem boa conduta,  
É viciado, é roqueiro,  
Tem doutorado,  
É mendigo,  
Já foi abusado,  
É kardecista,  
É judeu,  
É umbandista,  
É ateu,  
Me desculpa se já te machucaram usando o nome de Deus.  
A religião mata se não usar terno e gravata, enquanto Jesus pelado morreu.  
E com caneta na mão, fez do papel o seu coração.  
“Filho, não desista!” Foi isso que ele escreveu, assinado, seu pai,  
Deus.*

*Victin*

*Aos meus pais, **Juencio Fernandes Neto e Helenilda Fernandes de Oliveira**, pelo amor, dedicação, carinho, esforço e por tudo de bom que me proporcionaram desde o meu nascimento. Amo vocês.*

**Dedico!**

## **AGRADECIMENTO**

A **Deus**, pelo dom da vida, por suprir todas as minhas necessidades e permitir mais esta conquista.

Aos meus **Pais** e ao **meu Irmão**, pelo incentivo e pelas palavras de encorajamento em todos os momentos.

A **Nardiele de Souza Souto Freitas**, por todo carinho, compreensão, dedicação e palavras de incentivo.

A minha orientadora professora **Ana Dolores Santiago de Freitas**, pelos ensinamentos e confiança no trabalho desenvolvido.

Ao professor **Mário Adriano Ávila Queiroz**, pela parceria e cuidados na realização experimental.

À professora **Diana Signor Deon**, pelo acolhimento, paciência e ensinamentos.

A **Lucas Oliveira Reis** por todo apoio, amizade e dedicação no desenvolvimento da pesquisa.

Aos amigos Timóteo Nunes, Nataline Araújo, Ricardo Macedo, Higor, Daiane Cunha, Quésia Costa e colegas do LEMA.

Ao professor **Raimundo Andrade**, pela confiança, incentivo, orientação e oportunidades dadas durante o curso técnico em Catolé do Rocha, vislumbrando um novo mundo para minha pessoa.

A **Expedito Cavalcante do Nascimento Neto**, pela amizade e todos os momentos de alegria.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, e à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco – FACEPE.

Venho aqui fazer meus sinceros agradecimentos às pessoas acima citadas e a todos que de maneira direta ou indireta contribuíram com meu trabalho nessa nova e importante etapa da minha vida.

## Fixação biológica de nitrogênio e emissões de gases de efeito estufa em cultivos irrigados de gramíneas e leguminosa no semiárido

### RESUMO GERAL

As emissões de gases de efeito estufa (GEEs) estão relacionadas com as necessidades de produção de alimentos e energia, exigindo, dentro do contexto atual de aquecimento global, esforços significativos para as minimizarem. Entre as medidas para redução de emissões de GEEs, a fixação biológica de nitrogênio (FBN) é um processo crítico para sustentar a produtividade e minimizar os impactos ambientais dos sistemas agrícolas. Desta forma, essa pesquisa foi realizada com o objetivo de avaliar as emissões de GEEs do solo ( $N_2O$ ,  $CO_2$  e  $CH_4$ ) e estimar o aporte de nitrogênio atmosférico em sistemas de cultivo de gramíneas e leguminosa para fins forrageiros no Semiárido de Pernambuco. O estudo foi desenvolvido no campo experimental da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Petrolina – PE. Utilizou-se sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench, cultivar BRS Ponta Negra), milheto (*Pennisetum glaucum* (L.), cultivar BRS 1501) e feijão guandu (*Cajanus cajan* (L.) Mills., cultivar BRS Mandarin) em sistemas de cultivo solteiros, consorciados e rotacionados. O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado (DIC), com 7 tratamentos (cultivo de feijão guandu solteiro (G), cultivo de feijão guandu consorciado com milheto (GM), cultivo de feijão guandu consorciado com sorgo (GS), cultivo solteiro de milheto (M), cultivo de milheto consorciado com feijão guandu (MG), cultivo de milheto solteiro após cultivo de feijão guandu (sistema rotacionado, MR), cultivo de sorgo solteiro (S), cultivo de sorgo consorciado com feijão guandu (SG) e cultivo de sorgo solteiro após cultivo de feijão guandu (sistema rotacionado, SR)), com 4 repetições. O experimento foi conduzido por dois anos, sendo realizados 4 cortes das culturas em cada ano. Antes dos cortes, amostras compostas de folhas verdes e sadias de cinco indivíduos das espécies alvo (sorgo, milheto e guandu), escolhidas aleatoriamente nas bordaduras das parcelas, foram coletadas para estimativa dos aportes de N, utilizando a técnica da abundância natural do  $^{15}N$ . As coletas dos gases emitidos pelo solo foram realizadas utilizando-se câmaras estáticas durante o segundo ano de cultivo. Foram verificadas diferenças significativas entre os diferentes cultivos nas médias anuais de composição isotópica do carbono 13 ( $\delta^{13}C$ ), carbono total (%C), relação carbono nitrogênio (C/N), nitrogênio total (%N) e no percentual de nitrogênio derivado da atmosfera (%N<sub>dda</sub>). O feijão guandu apresentou médias de %N<sub>dda</sub> muito altas (entre 79 e 92%), sendo um pouco menores no primeiro corte do primeiro ano do experimento (que fixaram entre 41 e 68%). Entre as gramíneas, também observou-se %N<sub>dda</sub> importantes (em alguns caso próximos a 50%), porém com grande variação entre cortes e anos. Os tratamentos que incluíram o feijão guandu foram os que proporcionaram maiores aportes de N atmosférico. Os fluxos de  $CH_4$  foram predominantemente positivos, mas em algumas ocasiões negativos, nos ciclos de cultivo. Os fluxos de  $CO_2$  foram predominantemente positivos, sendo a menor média observada no cultivo de sorgo solteiro (S).

Palavras-chave: Fixação biológica de nitrogênio. Semiárido. Espécies forrageiras. Gramíneas C4.  $N_2O$ . Rizóbios.

## Biological nitrogen fixation and greenhouse gas emissions in irrigated crops of grasses and legumes in the semi-arid region

### GENERAL ABSTRACT

Greenhouse gas (GHG) emissions are related to food and energy production needs, and require, within the current context of global warming, significant efforts to minimize them. Among the measures to reduce GHG emissions, biological nitrogen fixation (BNF) is a critical process for sustaining productivity and minimizing the environmental impacts of agricultural systems. This research was therefore carried out with the aim of assessing soil GHG emissions (N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>) and estimating the atmospheric nitrogen input in grass and legume cultivation systems for fodder purposes in the semi-arid region of Pernambuco. The study was carried out in the experimental field of the Federal University of the São Francisco Valley (UNIVASF), Petrolina - PE. Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench, cultivar BRS Ponta Negra), millet (*Pennisetum glaucum* (L.), cultivar BRS 1501) and guandu beans (*Cajanus cajan* (L.) Mills., cultivar BRS Mandarin) were used in single, intercropped and rotated cultivation systems. The experimental design adopted was completely randomized (DIC), with 7 treatments (cultivation of single pigeonpea (G), cultivation of pigeonpea intercropped with millet (GM), cultivation of pigeonpea intercropped with sorghum (GS), single cultivation of millet (M), cultivation of millet intercropped with pigeonpea (MG), single millet crop after guandu beans (rotated system, MR), single sorghum crop (S), sorghum crop intercropped with guandu beans (SG) and single sorghum crop after guandu beans (rotated system, SR)), with 4 replications. The experiment was carried out over two years, with four crop cuts each year. Before the cuts, samples of green, healthy leaves from five individuals of the target species (sorghum, millet and guandu), chosen at random from the edges of the plots, were collected to estimate N inputs, using the <sup>15</sup>N natural abundance technique. The gases emitted by the soil were collected using static chambers during the second year of cultivation. There were significant differences between the different crops in the annual averages of the isotopic composition of carbon 13 ( $\delta^{13}C$ ), total carbon (%C), carbon-nitrogen ratio (C/N), total nitrogen (%N) and the percentage of nitrogen derived from the atmosphere (%N<sub>dda</sub>). Guandu beans had very high %N<sub>dda</sub> averages (between 79 and 92%), which were slightly lower in the first cut of the first year of the experiment (which fixed between 41 and 68%). Among the grasses, there were also significant %N<sub>dda</sub> (in some cases close to 50%), but with great variation between cuts and years. The treatments that included guandu beans were the ones that provided the greatest atmospheric N inputs. CH<sub>4</sub> flows were predominantly positive, but sometimes negative, in the crop cycles. CO<sub>2</sub> flows were predominantly positive, with the lowest average observed in the single sorghum crop (S).

Keywords: Biological nitrogen fixation. Arid. Forage species. C4 grasses. N<sub>2</sub>O. Rhizobia.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Precipitação pluvial, evapotranspiração potencial (ETP) de Thornthwaite (1948) e balanço hídrico na área experimental, durante o período de julho de 2020 a outubro de 2022. DEF (-1) = déficit hídrico, EXC= excesso hídrico..... 45
- Figura 2** - Valores médios mensais de temperatura média, temperatura máxima, temperatura mínima e umidade relativa do ar em Petrolina-PE durante o período de execução do experimento..... 46
- Figura 3** - Balanço Hídrico e Evapotranspiração potencial (ETP) de Thornthwaite (1948) e a precipitação no período experimental de julho de 2020 a outubro de 2022. DEF (-1) = déficit hídrico, EXC= excesso hídrico..... 73
- Figura 4** - Valores médios mensais de temperatura, temperatura máxima, temperatura mínima, e umidade relativa do ar em Petrolina-PE durante o período de execução do experimento. .... 74
- Figura 5** – Precipitação mensal (mm) durante coletas de gases no cultivo de feijão guandu, sorgo e milho em diferentes sistemas de cultivo no município de Petrolina sertão de Pernambuco..... 75
- Figura 6** – Emissão total de N<sub>2</sub>O (mg N m<sup>-2</sup>) emitido durante coletas de gases no cultivo de feijão guandu, sorgo e milho em diferentes sistemas de cultivo no município de Petrolina sertão de Pernambuco. .... 79
- Figura 7** - Emissão total de CH<sub>4</sub> (mg C m<sup>-2</sup>) emitido durante coletas de gases no cultivo de feijão guandu, sorgo e milho em diferentes sistemas de cultivo no município de Petrolina sertão de Pernambuco. .... 80
- Figura 8** - Emissão acumulada de CO<sub>2</sub> (mg C m<sup>-2</sup>) emitido durante coletas de gases, temperatura do e da câmara no cultivo de feijão guandu, sorgo e milho em diferentes sistemas de cultivo no município de Petrolina sertão de Pernambuco. .... 81
- Figura 9** - Emissão de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) de fevereiro de 2022 a novembro de 2022 no cultivo de feijão guandu, sorgo e milho em diferentes sistemas de cultivo. no município de Petrolina sertão de Pernambuco. .... 82
- Figura 10** - Emissão de óxido nitroso (CH<sub>4</sub>) de fevereiro de 2022 a novembro de 2022 no cultivo de feijão guandu, sorgo e milho em diferentes sistemas de cultivo. no município de Petrolina sertão de Pernambuco. .... 84
- Figura 11** - Emissão de óxido nitroso (CO<sub>2</sub>) de fevereiro de 2022 a novembro de 2022 no cultivo de feijão guandu, sorgo e milho em diferentes sistemas de cultivo. no município de Petrolina sertão de Pernambuco. .... 85

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Atributos físicos do Neossolo Quartzarênico da área experimental.....	40
<b>Tabela 2</b> - Atributos químicos do Neossolo Quartzarênico da área experimental.....	40
<b>Tabela 3</b> - Datas das semeaduras e cortes das culturas forrageiras durante os dois anos de condução do experimento .....	42
<b>Tabela 4</b> - Nutrientes aplicados ao longo dos ciclos de cultivo solteiro e consórcio de sorgo, milho e guandu, em Neossolo Quartzarênico no campo experimental da Universidade Federal do Vale do São Francisco, em Petrolina - PE, no período de 2020-2022. ....	44
<b>Tabela 5</b> – Médias anuais da composição isotópica de C ( $\delta^{13}\text{C}$ ), carbono total (%), nitrogênio total (%N) e relação carbono nitrogênio (C/N) em plantas de sorgo, milho e feijão guandu em dois anos de cultivo (2020-2021 e 2021-2022) em Petrolina Pernambuco. ....	49
<b>Tabela 6</b> - Médias de dois anos de cultivo (2020-2021 e 2021-2022) no sinal isotópico de nitrogênio ( $\delta^{15}\text{N}$ ), em plantas de sorgo, milho e feijão guandu em diferentes sistemas de cultivo em Petrolina no estado de Pernambuco. ....	51
<b>Tabela 7</b> - Médias dos diferentes cortes realizados em dois anos de cultivo (2020-2021 e 2021-2022) na composição isotópica de nitrogênio ( $\delta^{15}\text{N}$ ), nitrogênio total (%N) e no percentual do N derivado da atmosfera (%N <sub>dda</sub> ) em plantas de sorgo, milho e feijão guandu em diferentes sistemas de cultivo em Petrolina Pernambuco.....	52
<b>Tabela 8</b> - Médias dos diferentes cortes realizados em dois anos de cultivo (2020-2021 e 2021-2022) no sinal isotópico de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ), no carbono total (%C) e na relação carbono nitrogênio (C/N) em plantas de sorgo, milho e feijão guandu em diferentes sistemas de cultivo em Petrolina no estado de Pernambuco. ....	56
<b>Tabela 9</b> - Médias dos diferentes cortes realizados em dois anos de cultivo (2020-2021 e 2021-2022) na produção de biomassa, nitrogênio acumulado e nitrogênio fixado biologicamente, em plantas de sorgo, milho e feijão guandu em diferentes sistemas de cultivo em Petrolina no estado de Pernambuco. ....	60
<b>Tabela 10</b> - Composição isotópica de N e C (‰), Nitrogênio total (%), Carbono total (%) e relação C/N no solo cultivado com sorgo, milho e feijão guandu em diferentes sistemas de cultivo em Petrolina no estado de Pernambuco. ....	64
<b>Tabela 11</b> - Teores de carbono e relação C/N em solos cultivados com milho, sorgo e feijão guandu submetidos a diferentes sistemas de cultivo (média $\pm$ erro padrão da média) em Petrolina Pernambuco. ....	87

**Tabela 12** - Densidade do solo e nitrogênio em solo cultivado com milho, sorgo e feijão guandu submetidos a diferentes sistemas de cultivo (média  $\pm$  erro padrão da média) em Petrolina Pernambuco. .... 88

**Tabela 13** - Estoque de carbono e nitrogênio em solos cultivados com milho, sorgo e feijão guandu submetidos a diferentes sistemas de cultivo (média  $\pm$  erro padrão da média) em Petrolina Pernambuco. .... 89

**Tabela 14** - Datas de coleta de gases em diferentes sistemas de cultivo no município de Petrolina sertão de Pernambuco. .... 95

## SUMÁRIO

1. Introdução Geral .....	14
1.1. Hipóteses .....	16
1.2. Objetivos .....	16
1.2.1 <i>Objetivo geral</i> .....	16
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	16
2. Capítulo I: Revisão de Literatura .....	17
2.1 A produtividade de forragem no Semiárido .....	17
2.2 Leguminosas em cultivos forrageiros no Semiárido brasileiro .....	19
2.3 A Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) .....	21
2.4 Emissão de Gases de Efeito Estufa (GEEs) em solos agrícolas .....	23
2.5 Sistemas integrados para produção forrageira de baixo carbono .....	26
Referências Bibliográficas .....	28
Resumo .....	36
Abstract .....	37
3.1 Introdução .....	38
3.2 Material e Métodos .....	39
3.2.1 Caracterização da área experimental .....	39
3.2.2 Delineamento experimental e estratégias de manejo .....	40
3.2.3 Dados meteorológicos e irrigação .....	44
3.2.4 Detalhes das amostragens e avaliações .....	46
3.2.5 Análise estatística .....	48
3.3 Resultados e Discussão .....	48
3.3.1 Composição Isotópica ( $\delta^{13}\text{C}$ , $\delta^{15}\text{N}$ ) .....	48
3.3.2 Biomassa .....	58
3.3.3 Sinal isotópico no solo ( $\delta^{15}\text{N}$ , $\delta^{13}\text{C}$ ) .....	61
3.4 Conclusão .....	65
Referências Bibliográficas .....	66
Resumo .....	69
Abstract .....	70
4.1 Introdução .....	71
4.2 Material e Métodos .....	73
4.2.1 Caracterização da área experimental .....	73
4.2.2 Delineamento experimental e estratégias de manejo .....	73
De acordo com o apresentado na seção 3.2.2. ....	73

4.2.3	Dados meteorológicos e irrigação .....	73
4.2.4	Avaliação dos gases de efeito estufa (GEES) .....	75
4.2.5	Atributos do solo .....	77
4.2.6	Estatística .....	78
4.3	Resultados e Discussão.....	78
4.3.1	Emissão Acumulada de N <sub>2</sub> O .....	78
4.3.2	Emissão Acumulada de CH <sub>4</sub> .....	79
4.3.3	Emissão Acumulada de CO <sub>2</sub> .....	80
4.3.4	Fluxos de N <sub>2</sub> O .....	81
4.3.5	Fluxos de CH <sub>4</sub> .....	83
4.3.6	Fluxos de CO <sub>2</sub> .....	84
4.3.7	Atributos do Solo .....	85
4.4	Conclusões .....	90
	Referências Bibliográficas .....	91
5.	Considerações Finais.....	94
	Anexo.....	95



## 1. Introdução Geral

As necessidades básicas da sociedade em matéria de produção de alimentos e energia são crescentes diante do aumento populacional e continuarão a impactar o ambiente, a menos que sejam feitos esforços significativos para o desenvolvimento de sistemas mais sustentáveis. O Brasil está entre os maiores produtores de alimentos, como carne, leite e cereais do mundo e, dentro do contexto atual de aquecimento global, assumiu compromissos de diminuir as emissões de gases de efeito estufa (GEEs) relacionadas com a produção agropecuária. Entre as medidas para redução de emissões de GEEs, a fixação biológica de nitrogênio (FBN) é um processo crítico para sustentar a produtividade e minimizar os impactos ambientais dos sistemas agrícolas.

Formas sustentáveis de uso da terra, que adotem sistemas agrícolas que utilizam tecnologias como rotação de culturas, plantio sucessivo e cultivo consorciado, agricultura sem revolvimento do solo ou sistemas integrados de lavoura-pecuária-floresta possuem alto potencial para mitigar as emissões de GEE, como ( $\text{CO}_2$ ), ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e ( $\text{CH}_4$ ). Embora  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  sejam emitidos em quantidades inferiores ao  $\text{CO}_2$ , esses gases apresentam um potencial de aquecimento global de 21 e 310 vezes maior, respectivamente (THANGARAJAN et al., 2013), sendo o setor agrícola responsável por quase 12% das emissões antropogênicas globais.

Nos solos, o óxido nitroso pode ser produzido durante o processo microbiano de desnitrificação. Em geral, quanto maior a disponibilidade de N no solo, mais intensos são os processos de nitrificação e desnitrificação, explicando a grande influência dos fertilizantes nitrogenados sobre as emissões de  $\text{N}_2\text{O}$ . O teor de matéria orgânica no solo e a presença de resíduos vegetais na superfície favorecem a emissões  $\text{N}_2\text{O}$ , porque a matéria orgânica é utilizada pelos microrganismos como fonte de energia e porque a decomposição cria sítios anaeróbios no solo, o que favorece o a produção de  $\text{N}_2\text{O}$ .

Uma forma eficiente de fornecer nitrogênio nos sistemas agrícolas, evitando o uso de fertilizantes químicos sintéticos, é por meio do processo de FBN. Neste sentido, a capacidade das leguminosas de formar relações simbióticas com bactérias diazotróficas do grupo dos rizóbios as torna um componente-chave em cultivos mistos. Vários estudos demonstram os benefícios do consórcio entre gramíneas e

leguminosas, sendo importante conhecer o potencial de aporte de N atmosférico nesses cultivos para o estabelecimento de manejos adequados. Para a estimativa da contribuição da FBN existem diferentes métodos, sendo as técnicas isotópicas baseadas no  $^{15}\text{N}$  consideradas as mais adequadas. As técnicas baseadas na abundância natural de  $^{15}\text{N}$  mostram-se bastante eficientes no estudo da FBN em sistemas agrícolas, sendo adotadas por muitos grupos envolvidos na pesquisa com bactérias diazotróficas endofíticas, pois é o único método direto para demonstrar a fixação biológica de  $\text{N}_2$  e que integraliza o N fixado em todo o ciclo da planta ou dos cultivos.

No presente estudo, a técnica de abundância natural de  $^{15}\text{N}$  foi empregada para quantificar a FBN em uma espécie de leguminosa e em duas gramíneas C4, todas de uso forrageiro. Apesar dos muitos benefícios do consórcio, existem atualmente poucas informações sobre a contribuição no cultivo consorciado ou na cultura de sucessão, da FBN na região semiárida de Pernambuco. Além disso, as emissões de gases de efeito estufa podem apresentar reduções a partir da redução da aplicação de fontes sintéticas de N e também sistemas empregados.

Diante disso, o objetivo da realização desse estudo é estimar a FBN e a emissão de gases de efeito estufa do solo ( $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ ) em diferentes sistemas de cultivo de gramíneas e leguminosa para fins forrageiros no Semiárido de Pernambuco.

## **1.1. Hipóteses**

A quantidade de N fixado em cultivos de sorgo ou milho é maior em cultivos consorciados com leguminosa que em cultivo solteiro.

A emissão dos gases de efeito estufa óxido nitroso ( $N_2O$ ), metano ( $CH_4$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ) são afetados pelas espécies cultivadas e sistema de cultivo adotado.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Estimar a fixação biológica de nitrogênio atmosférico e a emissão de gases de efeito estufa do solo ( $N_2O$ ,  $CO_2$  e  $CH_4$ ) em diferentes sistemas de cultivo de gramíneas e leguminosa para fins forrageiros no Semiárido de Pernambuco.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Estimar a produção de biomassa aérea em dois ciclos consecutivos em diferentes sistemas de cultivo de milho, sorgo e feijão-guandu para fins forrageiros no Semiárido de Pernambuco.

Estimar a contribuição da fixação biológica de N nas plantas e os aportes totais de N atmosférico em dois ciclos consecutivos em diferentes sistemas de cultivo de feijão guandu, milho e sorgo, para fins forrageiros no Semiárido de Pernambuco.

Estimar as emissões de gases de efeito estufa (óxido nitroso ( $N_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e metano ( $CH_4$ )) do solo em diferentes sistemas de cultivo de feijão guandu, milho e sorgo, para fins forrageiros no Semiárido de Pernambuco.

## 2. Capítulo I: Revisão de Literatura

### 2.1 A produtividade de forragem no Semiárido

De maneira geral, o Semiárido brasileiro apresenta um sistema agrícola que enfrenta dificuldades para atingir o seu ápice de produção e desenvolvimento. Os principais problemas são relacionados à irregularidade pluviométrica, o que resulta em secas severas e prolongadas em determinados períodos, assim como chuvas excessivas em outros períodos (LOPES et al., 2019).

Nessa região, a produtividade de algumas gramíneas de interesse é inferior à média do país. Além das condições climáticas desfavoráveis, a baixa produtividade deve-se à baixa adoção de insumos tecnológicos nos sistemas de produção. Em relação à fertilidade do solo, o nitrogênio é o nutriente requerido em maior quantidade pelas poáceas e, por isso, é um fator limitante não só no rendimento de grãos, mas também na qualidade do produto em consequência do teor de proteína nos grãos (FUERTES-MENDIZÁBAL et al., 2010).

Para alcançar altos rendimentos de grãos, o cultivo de cereais é dependente de diversos fatores. Além das características intrínsecas à planta e das condições climáticas da região de cultivo, o manejo também interfere na produção da lavoura (BENITEZ-ALFONSO et al., 2023). A utilização em excesso de adubos nitrogenados para suprir a necessidade nutricional dos cultivos é uma prática bastante disseminada em áreas agrícolas (AHMED et al., 2017). Esta prática torna o adubo nitrogenado um dos mais consumidos no mundo e o que mais influencia no custo de produção de um cultivo. Tendo em vista os custos ambientais e econômicos, faz-se necessário encontrar alternativas sustentáveis para o mercado agrícola no Semiárido, que visem à redução do uso de fertilizantes e do custo de produção, como também dos impactos ambientais (SETIONINGTYAS et al., 2022).

O N, além de ser o elemento exigido em maior quantidade pela maioria das plantas, é também o que mais influencia na produtividade, sendo essa essencialidade relacionada a constituição das proteínas, pigmentos, aminoácidos, hormônios, ácidos nucleicos e vitaminas (FUERTES-MENDIZÁBAL et al., 2010). O N é um nutriente extremamente dinâmico e que pode ser perdido dos

Os benefícios da presença de leguminosas em sistemas de consórcio ou sucessão com gramíneas não são devidos apenas ao aporte de nitrogênio (N) ao solo,

mas também ao efeito direto ou indireto sobre o rendimento das gramíneas associadas (HAHN et al., 2014). Neste sentido, além de inserirem o N atmosférico no sistema solo-planta através da fixação biológica, os rizóbios simbiotes de leguminosas e adaptados às condições edafoclimáticas podem estimular diretamente as gramíneas cultivadas em consórcio ou sucessão com estas leguminosas.

No cenário atual, é notável a fragilidade dos solos da região semiárida brasileira em termos de decomposição da matéria orgânica, alterando atributos químicos, físicos e biológicos. A substituição da vegetação nativa por sistemas agrícolas interfere na dinâmica da matéria orgânica, alterando seu aporte e sua decomposição (CARDOSO et al., 2015; SANTOS et al., 2019). A conversão da vegetação nativa em áreas de pastagem submetidas a manejo inadequado afeta várias propriedades do solo (OLIVEIRA et al., 2016) supracitadas.

Gramíneas de sistema fotossintético C4 apresentam alta eficiência fotossintética e de utilização de água, além de potencial de alta produção de biomassa (BURNER et al., 2009; GORLITSKY et al., 2015; MORAIS et al., 2009; PEDROSO et al., 2014). Além da importância na alimentação humana e de animais, apresentam grande interesse para utilização como culturas energéticas (LIMA et al., 2014) e são matéria-prima ideal para produção de etanol e outros biomateriais. No caso da cana-de-açúcar, principalmente no Brasil, e do milho, principalmente nos Estados Unidos da América (BALAT AND BALAT, 2009), este potencial já vem sendo bem utilizado desde a crise do petróleo. Pesquisas demonstram que o sorgo (TIMUCIN et al., 2021) e o milheto (MADELLA et al., 2016) podem ser culturas estratégicas para cultivo em áreas menos apropriadas para as gramíneas mais tradicionais. Por serem plantas típicas de regiões de clima quente e apresentarem alta eficiência do uso de água, essas gramíneas representam uma opção alternativa e/ou estratégia para cultivo em áreas com pouca disponibilidade hídrica.

O sorgo (*Sorghum bicolor*) é uma angiosperma, monocotiledônea, anual, diplóide e alógama, que pertence à família Poaceae. Provavelmente foi “domesticado” na Etiópia, cerca de 5.000 anos atrás, e em seguida foi cultivado na África Ocidental, desde o Sudão até o rio Níger (CARLESSO et al., 2012). No Brasil, a sua introdução se atribui aos escravos e, por isso, a cultura ficou conhecida como milho d’Angola. O sorgo adapta-se a condições de restrições hídricas desfavoráveis à maioria de outros cereais e apresenta boa composição bromatológica, podendo ser utilizado para silagem, pastejo/corte, fenação, cobertura morta ou fabricação de

vassoura (BOLSON et al., 2014; SANTOS et al., 2013). Além disso, possui ampla faixa de adaptação agroecológica e tolerância a estresses ambientais (ANANDA et al., 2011; VASILAKOGLU et al., 2011), representando um potencial de produção de biomassa em áreas inadequadas às culturas mais tradicionais para produção de etanol (FERNANDES et al., 2014; GUIGOU et al., 2011). O suprimento adequado de N para o sorgo, desde os estágios iniciais, permite à cultura um crescimento rápido e uma área foliar suficiente para interceptar a maior quantidade de luz e, assim, transformá-lo em biomassa (CAVALCANTE et al., 2018). Assim, fica indicado que o sorgo requer a contribuição de quantidades abundantes de nutrientes para o seu desenvolvimento, visto que a baixa fertilidade do solo é um dos fatores que podem limitar sua produção (CARMO et al., 2016).

O milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) também é uma angiosperma, monocotiledônea, anual, diplóide e alógama, pertencente à família Poaceae. É uma planta de origem africana, de fácil implantação e manejo, que se destaca por sua adaptação a uma grande diversidade de ambientes e a diferentes condições de clima e solo, caracterizando-se por sua precocidade, seu alto potencial de produção e sua qualidade nutritiva, além de sobreviver melhor que outros cereais em locais de baixa disponibilidade hídrica, devido ao seu sistema radicular, que explora maior área lateral e em profundidade, conseguindo assim absorver maiores quantidades de água, mesmo quando ocorre baixa precipitação, além de terem maior capacidade de recuperação com o retorno da chuva (TORRES et al., 2014).

## **2.2 Leguminosas em cultivos forrageiros no Semiárido brasileiro**

O Semiárido brasileiro é caracterizado principalmente pela distribuição espaço temporal das chuvas. Apesar de ser o semiárido mais chuvoso do mundo, possui ampla variação pluviométrica, apresentando magnitudes entre 400 e 800 mm/ano, gerando elevado déficit hídrico, devido à alta evapotranspiração potencial, em torno de 1800 mm/ano (MELO et al., 2011), e capacidade de suporte reduzida quando comparada a outros sistemas de produção (MOREIRA, 2013). Atualmente o Semiárido depara-se com a real importância da utilização de forrageiras mais produtivas, já que o ganho em qualidade é uma necessidade emergente nos sistemas de alta produtividade, aliado à estacionalidade da produção de alimentos. A reduzida produção de forragens no período seco interfere na produtividade dos rebanhos

(SALES, 2001), devido à baixa qualidade nutritiva das plantas forrageiras nativas nesta época do ano.

As leguminosas forrageiras são plantas de uso múltiplo, que conseguem se destacar na eficiência do uso da terra nos sistemas de produção animal em pastagens (AGUIAR; LIMA, 2023). O uso crescente de plantas leguminosas como fonte proteica tem sido uma alternativa nutricionalmente potencializadora para compor dietas, além de reduzir custos de alimentação na região semiárida nordestina. Como exemplo, temos o feijão guandu, que é uma espécie pertencente à família Fabaceae, com ciclo anual ou semiperene de porte arbustivo (ARAÚJO et al., 2019). O seu ciclo produtivo pode variar de 80 a 180 dias, para as variedades anãs (baixo porte de crescimento e estrutural) e convencionais (denominadas de porte normal), respectivamente (PINHEIRO et al., 2013). O feijão guandu traz características que contribuem bastante para a reforma de pastos e aumento da produtividade na propriedade. A forragem proveniente desta leguminosa, é composta por alto valor nutritivo, com isso, disponibilizando um alimento com excelente fonte de energia e proteína para os ruminantes da região semiárida (CHOUDHARY et al., 2013; KHOURY et al., 2015). Além da associação leguminosa-gramínea, o cultivo rotacionado tem contribuído positivamente para o valor nutritivo da dieta dos ruminantes e para melhorar a eficiência do uso dos fertilizantes aplicados, quando comparada à monocultura com gramíneas tropicais.

Segundo Andrade et al. (2013) e Minuzzi et al. (2014) tais práticas agrícolas auxiliam na tomada de decisão no semiárido do Nordeste brasileiro, que é muito afetado pela sazonalidade da chuva, resultando em prejuízos para a agricultura familiar e pecuária local, tornando-as vulneráveis e com baixo rendimento. Para minimizar estes efeitos, torna-se necessário a busca por alternativas, como a utilização de espécies vegetais resistentes ou tolerantes e, com isso, potencializar a agricultura local (DINIZ et al., 2017; PEREIRA et al., 2015).

O consórcio de culturas forrageiras, é um sistema que busca a melhoria da resiliência agrícola e a diversificação agrícola. A otimização da eficiência no uso da terra é função da quantidade ideal de plantas por unidade de área (MENG et al., 2020; SILVA et al., 2019). Por outro lado, essa prática deve consistir na adequação do cultivo, a fim de melhorar a interceptação luminosa dos vegetais, com influência direta na área e inserção foliar, e na produção de matéria seca (BUESA; MIRÁS-AVALOS; INTRIGLILOLO, 2020; TONINI et al., 2019).

O cultivo consorciado de gramíneas e leguminosas no sistema integração lavoura pecuária tem proporcionado um incremento considerável na biomassa microbiana do solo, segundo Laroca et al (2018), a relação C/N proveniente deste conjunto de diferentes espécies tem gerando um aumento na biodiversidade dos microrganismos no solo e atividade de enzimas que decompõem os resíduos vegetais, além de proporcionar um incremento na produtividade de grãos (SHINKAI et al., 2020). Contudo, Miguel et al. (2018) também constataram que este consórcio tem auxiliado no acréscimo de N e K quando cultivado em sucessão de culturas.

Como o seu sistema radicular é profundo e ramificado, a cultura do feijão guandu é capaz de resistir a períodos de seca e de diminuir a compactação dos solos, atuando como adubo verde, fazendo a manutenção da fitomassa e beneficiando a atuação dos micro-organismos heterotróficos do solo (ARAÚJO et al., 2019). O feijão guandu atua na restauração química dos solos por seu importante papel na FBN (FAVERO et al., 2000) e, em consórcio, também apresenta a vantagem de melhoria na qualidade das dietas dos animais.

O guandu é uma leguminosa de ótima aceitabilidade pelos bovinos, apresenta desempenho satisfatório em consórcios (GUIMARÃES et al., 2017). A incorporação de leguminosas nos sistemas de produção de ruminantes pode ser feita sob pastejo direto em consórcio com espécies de gramíneas, na forma de suplementos ou bancos de proteínas, tem-se a possibilidade de utilização de colher a forragem, para posteriormente picar ou oferecer os ramos *in natura* para os animais (STIVARI et al., 2011).

### **2.3 A Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN)**

O processo de fixação biológica de N (FBN) está restrito aos microrganismos que possuem o complexo enzimático da nitrogenase (SUR'S et al., 2010). Esses microrganismos realizam a FBN a partir do N<sub>2</sub> atmosférico, fornecendo às plantas NH<sub>3</sub> que pode ser o suficiente para o crescimento e desenvolvimento da planta ou suprir parte das necessidades da planta por N, levando a uma dispensa de aplicação de fertilizantes nitrogenados industriais (BARGAZ et al., 2018).

Para obter uma compreensão mais profunda da FBN e suas contribuições para o ciclo do nitrogênio, os pesquisadores têm recorrido a técnicas isotópicas como ferramentas poderosas para elucidar os intrincados processos envolvidos, que dependem de variações nos isótopos estáveis <sup>15</sup>N e <sup>14</sup>N (LI et al., 2023).

Para a estimativa da contribuição da FBN existem diferentes métodos. Os primeiros estudos para estimativa da FBN basearam-se no uso do ensaio de redução de acetileno para fornecer evidências qualitativas de fixação de  $N_2$  por diazotróficos, posteriormente outros métodos foram sendo adotados, como a diferença de N total, o balanço de nitrogênio no sistema solo-planta, a abundância relativa de ureídeos e as técnicas isotópicas baseadas no uso de  $^{15}N$  (CHALK, 2016).

As técnicas baseadas na abundância natural de  $^{15}N$  mostram-se bastante eficientes no estudo da FBN em sistemas agrícolas, sendo adotadas por muitos grupos envolvidos na pesquisa com bactérias endofíticas. Isto se deve ao fato que é o único método direto para demonstrar a FBN (ARAÚJO et al., 2019). Este método é capaz de distinguir o nitrogênio que a planta assimilou do ar e aquele proveniente do solo, com base no fato que em condições naturais existem dois isótopos estáveis do nitrogênio,  $^{14}N$  e  $^{15}N$ , sendo encontrados no ar, na proporção de 99,6337% e 0,3663% de átomos de  $^{14}N$  e  $^{15}N$ , respectivamente (CHALK, 2016).

Uma das técnicas isotópicas mais adequadas para produzir resultados confiáveis em condições de campo é baseada na diluição isotópica de  $^{15}N$  (CARCELÉN et al., 2017). A diluição isotópica de  $^{15}N$  produz estimativas indiretas, sendo necessário cultivar a planta fixadora de  $N_2$  e uma planta referência, não fixadora de  $N_2$ , em substrato ou solo onde o N mineral apresente uma marcação com  $^{15}N$  acima da abundância natural (MARRON et al., 2018).

Plantas que obtenham, além do N do solo, o N atmosférico, sofrem uma diluição no seu enriquecimento em  $^{15}N$  (LAMA et al., 2020). Quanto maior a diluição, maior a quantidade de N atmosférico incorporado e, por conseguinte, maior a contribuição da FBN. Este método tem a vantagem de poder fornecer uma estimativa integrada da percentagem de N atmosférico ao longo de um período prolongado de crescimento da planta (CHALK, 2016).

A FBN é um processo crítico para sustentar a produtividade agrícola e a saúde ecológica (LADHA et al., 2022). Entre as gramíneas tropicais, as tentativas de comprovação da FBN através de técnicas isotópicas são mais abundantes para a cana-de-açúcar, mas os resultados são variáveis, sugerindo forte influência de fatores ambientais e/ou do genótipo da planta. Por exemplo, resultados demonstram que algumas variedades cultivadas no Brasil (BAPTISTA et al., 2014; URQUIAGA et al., 2012) e no Uruguai (TAULÉ et al., 2012) podem obter quantidades consideráveis de N atmosférico, mas para a cana-de-açúcar cultivada em outros locais, como na

Austrália (BIGGS et al., 2002) e na África do Sul (HOEFSLOOT et al., 2005), não foram encontradas evidências de FBN. Para outras gramíneas, como milho (MONTAÑEZ et al., 2009), sorgo (BARROS et al 2020) e capim elefante (MORAIS et al., 2012), os relatos são escassos e não foi encontrado artigo demonstrando FBN em milheto.

Diante da necessidade de esforços para o estabelecimento de práticas agrícolas mais sustentáveis e ecológicas, estimativas de aportes de N desempenham um papel crucial na otimização do manejo do nitrogênio e na promoção da saúde do ecossistema (PIÑEIRO et al., 2020). A abordagem interdisciplinar envolvendo biologia, química e ciência ambiental abre novos caminhos para explorar a FBN e seu impacto ecológico mais amplo (LI et al., 2023).

## **2.4 Emissão de Gases de Efeito Estufa (GEEs) em solos agrícolas**

No solo encontramos um ambiente favorável para a formação e emissões dos principais gases com potencial efeito estufa, principalmente dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) (SHAKOOR et al., 2021), que são apontados como os principais contribuintes para o aquecimento global (REN et al., 2017).

A produção e emissão de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) em solos agrícolas é de extrema importância no contexto das mudanças climáticas e da agricultura sustentável (FAN et al., 2022; SIGNOR; CERRI, 2013). O  $\text{N}_2\text{O}$  é um dos principais gases de efeito estufa e é liberado principalmente a partir de atividades agrícolas, como o uso de fertilizantes nitrogenados, práticas de manejo de resíduos e cultivos. O impacto do  $\text{N}_2\text{O}$  na mudança climática é significativo, pois sua capacidade de aquecimento global é muito maior do que a do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (FAN et al., 2022).

É importante destacar a relação complexa entre a fertilização nitrogenada e a produção de  $\text{N}_2\text{O}$ . O uso de fertilizantes contendo nitrogênio é essencial para o aumento da produtividade agrícola, mas a aplicação inadequada e o excesso de nitrogênio podem resultar em perdas significativas de  $\text{N}_2\text{O}$  para a atmosfera (ZHOU et al., 2016).

O  $\text{N}_2\text{O}$  é formado no solo através dos processos de nitrificação e desnitrificação. A nitrificação ocorre através da transformação de amônio para nitrato (aeróbico) e durante a desnitrificação ocorre a formação de gás  $\text{N}_2$  proveniente da redução do nitrato (anaeróbico) (FAN et al., 2022), processo que pode ter NO e  $\text{N}_2\text{O}$  como intermediários.

A interação dos fatores que influenciam a nitrificação e desnitrificação é complexa porque a quantidade de  $N_2O$  produzida depende das concentrações de oxigênio ( $O_2$ ) no solo, a temperatura determina a velocidade com que os microrganismos realizam a nitrificação e a desnitrificação, e as quantidades de N disponível no solo são menores em temperaturas mais baixas e aumentam de acordo com temperaturas mais quentes, dessa forma solos mais quentes tendem a produzir mais  $N_2O$  (QIU et al., 2022). Portanto, as mudanças climáticas e o aumento da temperatura do solo podem agravar as emissões de  $N_2O$ . (GEESING, 2000).

Estratégias de manejo eficazes, como a aplicação de fertilizantes com base nas necessidades das culturas e a escolha de fontes de nitrogênio de liberação lenta, podem reduzir as emissões de  $N_2O$  (ZHOU et al., 2016). Além disso, a qualidade do solo desempenha um papel crucial na produção de  $N_2O$ . Solos saudáveis e bem gerenciados têm uma capacidade maior de reter o nitrogênio, reduzindo assim a produção de  $N_2O$  (SIGNOR; CERRI, 2013). Práticas como a rotação de culturas, o cultivo de plantas de cobertura e o manejo de resíduos orgânicos podem melhorar a eficiência do uso de nitrogênio e diminuir as emissões de  $N_2O$  (PIÑEIRO et al., 2020).

A produção e emissão de  $N_2O$  em solos agrícolas são questões complexas que exigem uma abordagem integrada, considerando práticas de manejo, condições climáticas, qualidade do solo e tecnologias inovadoras (SHEN et al., 2021). A pesquisa contínua e a implementação de estratégias de manejo sustentável são essenciais para mitigar as emissões de  $N_2O$  e contribuir para a agricultura sustentável no contexto das mudanças climáticas globais (FAN et al., 2022).

O processo de emissão e absorção de metano ( $CH_4$ ) em solos agrícolas tem sido objeto de pesquisa intensa e é fundamental para o entendimento das implicações ambientais da agricultura. O metano é um gás de efeito estufa, e sua produção e emissão nos solos agrícolas estão relacionadas principalmente a processos de decomposição anaeróbica da matéria orgânica. Essa decomposição ocorre em ambientes com baixo teor de oxigênio, como solos encharcados, lodos de esgoto e campos de arroz inundados (SERRANO-SILVA et al., 2014).

Estudos recentes têm destacado que diferentes práticas agrícolas podem influenciar substancialmente as emissões de  $CH_4$ . A cultura do arroz, por exemplo, é conhecida por ser um importante emissor de  $CH_4$  devido ao cultivo em campos inundados. No entanto, técnicas de manejo de água, como a alternância entre

períodos de inundação e drenagem, podem reduzir as emissões de CH<sub>4</sub> (GULPTA et al., 2021).

Outro aspecto importante é a absorção de CH<sub>4</sub> pelos solos. Alguns tipos de solos têm a capacidade de reter parte do CH<sub>4</sub> produzido, atuando como sumidouros desse gás. Solos ricos em matéria orgânica e bem drenados têm maior potencial para absorver CH<sub>4</sub>. O CH<sub>4</sub> pode ser consumido e produzido por bactérias metanotróficas, presentes no solo (ZANONI et al., 2015), as quais, em níveis baixos de oxigenação, reduzem compostos orgânicos, utilizando o C comoceptor de elétrons. Além disso, os fluxos de CH<sub>4</sub> entre o solo e a atmosfera também são influenciados pela disponibilidade de N no sistema (SERRANO-SILVA et al., 2014).

Dependendo na umidade e disponibilidade de N no ecossistema, os solos podem ser um sumidouro líquido ou fonte de CH<sub>4</sub>, (GREGORICH et al., 2004; LIEBIG et al., 2005; SERRANO-SILVA et al., 2014). Além disso, a aplicação de fertilizantes nitrogenados, comumente usados na agricultura, pode estimular a produção de CH<sub>4</sub> em solos. Portanto, estratégias de manejo que visam reduzir o excesso de nitrogênio no solo podem contribuir para a diminuição das emissões de CH<sub>4</sub> (GULPTA et al., 2021).

Embora a relação entre o N-fertilizante e a redução no consumo de CH<sub>4</sub> ainda não tenha sido totalmente explicada, pode ser causada por inibição induzida do N na atividade dos microrganismos que oxidam o CH<sub>4</sub> (MOSIER et al., 1999), assim como pelo aumento da atividade microbiana, que consome o O<sub>2</sub> e ocasiona a formação temporária de pequenos sítios com baixa difusão de gases (SILVA, 2014), onde a atividade de microrganismos metanotróficos é favorecida.

Práticas como a rotação de culturas, o cultivo mínimo e a cobertura do solo com resíduos vegetais podem ser exploradas como práticas de agricultura de conservação, que buscam preservar a qualidade do solo e a matéria orgânica, na redução das emissões de CH<sub>4</sub> e na promoção da absorção desse gás (FRANCAVIGLIA et al., 2023).

Os estudos destacam a complexidade dos processos de emissão e absorção de metano em solos agrícolas (KRÓLICZEWSKA et al., 2023). A compreensão desses processos é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de manejo sustentável que ajudem a mitigar as emissões de CH<sub>4</sub> e, ao mesmo tempo, preservar a produtividade agrícola (KRÓLICZEWSKA et al., 2023).

## 2.5 Sistemas integrados para produção forrageira de baixo carbono

As alterações climáticas são um dos desafios mais sérios que a sociedade enfrenta atualmente representando uma séria ameaça para a sobrevivência e o desenvolvimento da humanidade (HUANG 2022). O aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera causado pelas atividades humanas é uma das principais fontes de aquecimento global (KURNIAWAN et al., 2022).

O enfrentamento das mudanças climáticas tornou-se um consenso global e é listado como um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável pelas Nações Unidas (STEVANOVIĆ et al., 2016). O desenvolvimento de uma economia de baixo carbono é unanimemente reconhecido pelos países de todo o mundo como uma das formas efetivas de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e mitigar o aquecimento global (CHEN, L. 2022).

Os sistemas integrados de produção surgiram como uma abordagem promissora para atender a essa demanda. Sistemas integrados de produção agrícola abrangem uma variedade de práticas que combinam culturas agrícolas, criação de animais, agroflorestas e outros componentes em um sistema holístico (DARVISH et al., 2020).

Essa abordagem visa otimizar a eficiência do uso de recursos, reduzir resíduos e promover a resiliência do sistema, ao mesmo tempo em que minimiza as emissões de GEEs. Diversos estudos têm contribuído com informações valiosas sobre estratégias eficazes para reduzir a emissão de GEEs em sistemas de produção integrada (HEGAB et al., 2023).

Um dos principais focos da pesquisa é a gestão de resíduos orgânicos, como esterco animal e restos de culturas. Estudos têm demonstrado que a compostagem e a utilização de resíduos orgânicos como fertilizantes podem diminuir as emissões de metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), que são GEEs com alto potencial de aquecimento global (SERRANO-SILVA et al., 2014; ZHOU et al., 2016).

Além disso, práticas de cultivo direto, que envolvem a não perturbação do solo, contribuem para o aumento do teor de carbono orgânico no solo, ajudando a sequestrar carbono e reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> (DARVISH et al., 2020). A rotação de culturas e o cultivo de cobertura também têm sido eficazes na promoção de solos saudáveis e na mitigação das emissões de GEEs (HEGAB et al., 2023).

A integração de árvores e sistemas agroflorestais nos sistemas de produção contribui para a absorção de carbono da atmosfera e proporciona diversos benefícios, como a produção de madeira, frutas e a proteção do solo (PANTERA et al., 2021).

Outro ponto importante da pesquisa em sistemas integrados de produção é o uso eficiente de água e energia. A irrigação de precisão e a utilização de fontes de energia renovável podem reduzir significativamente as emissões de GEEs associadas ao uso desses recursos (KANG et al., 2021). A criação de gado em sistemas integrados, que inclui práticas de pastoreio racional, também tem demonstrado ser uma maneira eficaz de reduzir as emissões de metano do sistema digestivo dos animais (FARIAS et al., 2020).

Em resumo, as pesquisas ressaltam que os sistemas integrados de produção oferecem um caminho promissor para a mitigação das emissões de GEEs (DARVISH et al., 2020; PANTERA et al., 2021). Através da combinação de práticas agrícolas, agroflorestais, pecuárias e de gestão de resíduos, esses sistemas têm o potencial de contribuir significativamente para a redução das emissões e para o desenvolvimento de sistemas agrícolas mais sustentáveis e resilientes (FARIAS et al., 2020). O investimento contínuo em pesquisa e adoção de práticas sustentáveis é fundamental para enfrentar os desafios das mudanças climáticas e promover a segurança alimentar global (HEGAB et al., 2023).

## Referências Bibliográficas

AGUIAR, P. H. D. S.; LIMA, R. A. FABACEAE: IMPORTÂNCIA ECOLÓGICA DO FEIJÃO GUANDU (*Canajus cajan* L.). **Educamazônia-Educação, Sociedade e Meio Ambiente**, 16, 172-180, 2023.

AHMED, M.; RAUF, M.; MUKHTAR, Z.; SAEED, N. A. Excessive use of nitrogenous fertilizers: an unawareness causing serious threats to environment and human health. **Environmental Science and Pollution Research**, 24, 26983-26987, (2017). <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0589-7>

ANANDA, N.; VADLANI, P. V.; PRASAD, P. V. Evaluation of drought and heat stressed grain sorghum (*Sorghum bicolor*) for ethanol production. **Industrial Crops and Products**, v. 33, n. 3, p. 779-782, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.01.007>

ANDRADE, A.J.P.; SOUZA, C.R.; SILVA, N.M. A vulnerabilidade e a resiliência da agricultura familiar em regiões semiáridas: o caso do seridó potiguar. **Revista de Geografia Agrária**, v.8, p.1–30. 2013.

ARAÚJO, B. de A.; MOREIRA, F. J. C.; GUEDES, F. L. Emergência e crescimento inicial de feijão guandu em função dos substratos e salinidade da água de irrigação. **Revista Agrária Acadêmica**, v.2, n.4, p.90-101, 2019.

ARAUJO, K. E. C.; TORRES, C. V.; GUIMARÃES, A. P.; SILVA, M. A. D.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Natural abundance of  $^{15}\text{N}$  of  $\text{N}$  derived from the atmosphere by different strains of *Bradyrhizobium* in symbiosis with soybean plants. **Ciência Rural**, 49, 2019. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20180265>

BALAT, M.; BALAT, H. Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. **Applied Energy**, v. 86, p. 2273–2282, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.03.015>

BAPTISTA, R. B.; MORAIS, R. F.; LEITE, J. M.; SCHULTZ, N.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA S. Variations in the  $^{15}\text{N}$  natural abundance of plant-available  $\text{N}$  with soil depth: Their influence on estimates of contributions of biological  $\text{N}_2$  fixation to sugar cane. **Applied Soil Ecology**, v. 73, p. 124–129, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.08.008>

BARGAZ, A.; LYAMLOULI, K.; CHTOUKI, M.; ZEROUAL, Y.; DHIBA, D. Soil microbial resources for improving fertilizers efficiency in an integrated plant nutrient management system. **Frontiers in microbiology**, v. 9, 1606, 2018. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01606>

BENITEZ-ALFONSO, Y.; SOANES, B. K.; ZIMBA, S.; SINANAJ, B.; GERMAN, L.; SHARMA, V.; FOYER, C. H. Enhancing climate change resilience in agricultural crops. **Current Biology**, 33(23), R1246-R1261, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.10.028>  
BIGGS, I.M., STEWART, G.R., WILSON, J.R., CRITCHLEY, C.  $\text{N}$  natural abundance studies in Australian commercial sugarcane. *Plant Soil* 238, p. 21–30, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1014280420779>

BUESA, I.; MIRÁS-AVALOS, J. M.; INTRIGLILOLO, D. S. Row orientation effects on potted-vines performance and water-use efficiency. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.294, 108148, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108148>

BURNER, D.M.; TEW, T.L.; HARVEY, J.J.; BELESKY, D.P. Dry matter partitioning and quality of Miscanthus, Panicum, and Saccharum genotypes in Arkansas, USA. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, p. 610–619, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.10.002>

CARCELÉN, J. N.; GAYÓN, J. M. M.; GONZÁLEZ, P. R.; VALLEDOR, L.; CAÑAL, M. J.; ALONSO, J. I. G. A cost-effective approach to produce <sup>15</sup>N-labelled amino acids employing Chlamydomonas reinhardtii CC503. **Microbial cell factories**, 16(1), 1-8, 2017. <https://doi.org/10.1186/s12934-017-0759-9>

CARDOSO, J. A. F.; LIMA, A. M. N.; CUNHA, T. J. F; RODRIGUES, M. S.; HERNANI, L. C.; AMARAL, A. J.; OLIVEIRA NETO, M. B. Organic matter fractions in a quartzipsamment under cultivation of irrigated mango in the lower São Francisco Valley region, Brasil. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 39, p. 1068-1078, 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140498>

CARMO, D. L. D.; LIMA, L. B. D.; SILVA, C. A. Soil fertility and electrical conductivity affected by organic waste rates and nutrient inputs. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, 2016. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20150152>

CAVALCANTE, T. J.; CASTOLDI, G.; RODRIGUES, C. R., NOGUEIRA, M. M.; ALBERT, A. M. Macro and micronutrients uptake in biomass sorghum. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 48, n. 4, p. 364-373, 2018. <https://doi.org/10.1590/1983-40632018v48n4p364-373>

CHALK, P.M. The strategic role of <sup>15</sup>N in quantifying the contribution of endophytic N<sub>2</sub> fixation to the N nutrition of non-legumes. **Symbiosis**, v. 69, p.63–80, 2016. <https://doi.org/10.1007/s13199-016-0397-8>

CHEN, L.; MSIGWA, G.; YANG, M.; OSMAN, A. I.; FAWZY, S.; ROONEY, D. W.; YAP, P. S. Strategies to achieve a carbon neutral society: a review. **Environmental Chemistry Letters**, 20(4), 2277-2310, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01435-8>

CHOUDHARY, A. K.; KUMAR, S.; PATIL, B. S.; SHARMA, M.; KEMAL, S.; ONTAGODI, T. P.; VIJAYAKUMAR, A. G. Narrowing yield gaps through genetic improvement for Fusarium wilt resistance in three pulse crops of the semi-arid tropics. **SABRAO Journal of Breeding and Genetics**, 45(03), 341-370, 2013. <http://oar.icrisat.org/id/eprint/1079>

DARVISH, M.; KIDD, M. P.; COELHO, L. C.; RENAUD, J. Integrated production-distribution systems: Trends and perspectives. **Pesquisa Operacional**, 41, e246080, 2020. <https://doi.org/10.1590/0101-7438.2021.041s1.00246080>

DINIZ, W. J. D. S.; SILVA, T. G. F. D.; FERREIRA, J. M. D. S.; SANTOS, D. C. D.; MOURA, M. S. B. D.; ARAÚJO, G. G. L. D.; ZOLNIER, S. Forage cactus-sorghum intercropping at different irrigation water depths in the Brazilian Semiarid Region. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 52, 724-733, 2017. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000900004>

FAN, D.; HE, W.; SMITH, W. N.; DRURY, C. F.; JIANG, R.; GRANT, B. B.; ZOU, G. Global evaluation of inhibitor impacts on ammonia and nitrous oxide emissions from agricultural soils: A meta-analysis. **Global Change Biology**, 28(17), 5121-5141, 2022. <https://doi.org/10.1111/gcb.16294>

FARIAS, G. D.; DUBEUX, J. C. B.; SAVIAN, J. V.; DUARTE, L. P.; MARTINS, A. P.; TIECHER, T.; BREMM, C. Integrated crop-livestock system with system fertilization approach improves food production and resource-use efficiency in agricultural lands. **Agronomy for Sustainable Development**, 40, 1-9, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00643-2>

FAVERO, C.; JUCKSCH, I.; COSTA, L. D.; ALVARENGA, R. C.; NEVES, J. C. L. Crescimento e acúmulo de nutrientes por plantas espontâneas e por leguminosas utilizadas para adubação verde. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, n.1, p.171-177, 2000. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000100019>

FERNANDES, G.; BRAGA, T. G.; FISCHER, J.; PARRELLA, R. A.; DE RESENDE, M. M.; CARDOSO, V. L. Evaluation of potential ethanol production and nutrients for four varieties of sweet sorghum during maturation. **Renewable Energy**, v. 71, p. 518-524, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.033>

FRANCAVIGLIA, R.; ALMAGRO, M.; VICENTE-VICENTE, J. L. Conservation agriculture and soil organic carbon: principles, processes, practices and policy options. **Soil Systems**, 7(1), 17, 2023. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7010017>

FUERTES-MENDIZÁBAL, T.; AIZPURUA, A.; GONZÁLEZ-MORO, M. B.; ESTAVILLO, J. M. Improving wheat breadmaking quality by splitting the N fertilizer rate. **European Journal of Agronomy**, 33(1), 52-61, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.03.001>

GORLITSKY, L.E., SADEGHPOUR, A., HASHEMI, M., ETEMADI, F., HERBERT, S.J. Biomass vs. quality tradeoffs for switchgrass in response to fall harvesting period. **Industrial Crops and Products**, v. 63, p. 311-315, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.10.012>

GUIGOU, M.; LAREO, C.; PÉREZ, L. V.; LLUBERAS, M. E.; VÁZQUEZ, D.; FERRARI, M. D. Bioethanol production from sweet sorghum: Evaluation of post-harvest treatments on sugar extraction and fermentation. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 7, p. 3058-3062, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.04.028>

GUIMARÃES, F. S.; CIAPPINA, A. L.; ANJOS, R. A. R.; SILVA, A.; PELÁ, A. Consórcio guandu-milho-braquiária para integração lavoura-pecuária. **Revista de Agricultura Neotropical**, 4(5), 22-27, 2017. <https://doi.org/10.32404/rean.v4i5.2218>

GUPTA, K.; KUMAR, R.; BARUAH, K. K.; HAZARIKA, S.; KARMAKAR, S.; BORDOLOI, N. Greenhouse gas emission from rice fields: a review from Indian context. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 30551-30572, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13935-1>

HAHN, L.; SÁ, E. L. S. D.; OSÓRIO FILHO, B. D.; MACHADO, R. G.; DAMASCENO, R. G.; GIONGO, A. Rhizobial inoculation, alone or coinoculated with *Azospirillum brasilense*, promotes growth of wetland rice. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, 2016. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20160006>

HEGAB, H.; SHABAN, I.; JAMIL, M.; KHANNA, N. Toward sustainable future: Strategies, indicators, and challenges for implementing sustainable production systems. **Sustainable Materials and Technologies**, 36, e00617, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00617>

HOEFSLOOT, G., TERMORSHUIZEN, A. J., WATT, D. A., CRAMER, M.D. Biological nitrogen fixation is not a major contributor to the nitrogen demand of a commercially grown South African sugarcane cultivar. **Plant Soil** v.277, p. 85–96, 2005. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-2581-0>

KANG, J.; HAO, X.; ZHOU, H.; DING, R. An integrated strategy for improving water use efficiency by understanding physiological mechanisms of crops responding to water deficit: Present and prospect. **Agricultural Water Management**, 255, 107008, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107008>

KHOURY, C. K.; CASTAÑEDA-ALVAREZ, N. P.; ACHICANOY, H. A.; SOSA, C. C.; BERNAU, V.; KASSA, M. T.; STRUIK, P. C. Crop wild relatives of pigeonpea [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.]: Distributions, ex situ conservation status, and potential genetic resources for abiotic stress tolerance. **Biological Conservation**, 184, 259-270, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.01.032>

KRÓLICZEWSKA, B.; PECKA-KIEŁB, E.; BUJOK, J. Strategies Used to Reduce Methane Emissions from Ruminants: Controversies and Issues. *Agriculture*, 13(3), 602, 2023. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030602>

KURNIAWAN, K.; SUPRIATNA, J.; SAPOHELUWAKAN, J.; SOESILO, T. E. B.; MARIATI, S.; GUNARSO, G. The analysis of forest and land fire and carbon and greenhouse gas emissions on the climate change in Indonesia. **AgBioForum**, 24(2), 1-11, 2022.

LADHA, J. K.; PEOPLES, M. B.; REDDY, P. M.; BISWAS, J. C.; BENNETT, A.; JAT, M. L.; KRUPNIK, T. J. Biological nitrogen fixation and prospects for ecological intensification in cereal-based cropping systems. **Field Crops Research**, 283, 108541, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108541>

LAMA, S.; KUHN, T.; LEHMANN, M. F.; MÜLLER, C.; GONZALEZ, O.; EISENHAUER, N.; WILCKE, W. The biodiversity-N cycle relationship: a 15 N tracer experiment with soil from plant mixtures of varying diversity to model N pool sizes and transformation rates. **Biology and Fertility of Soils**, 56, 1047-1061, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01480-x>

LAROCA, J. V.S.; DE SOUZA, J. M. A., PIRES, G. C., PIRES, G. J. C., PACHECO, L. P., DA SILVA, F. D.; SOUZA, E. D. Qualidade do solo e produtividade de soja em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.53, n.11, p.1249-1259, 2018. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018001100007>

LI, M.; GAO, L.; WHITE, J. C.; HAYNES, C. L.; O'KEEFE, T. L.; RUI, Y.; ZHANG, P. Nano-enabled strategies to enhance biological nitrogen fixation. **Nature Nanotechnology**, 1-4, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41565-023-01392->

LIMA, M. A; GOMEZ, L.D.; STEELE-KING, C.G.; SIMISTER, R.; BERNARDINELLI, O.D.; CARVALHO, M. A; REZENDE, C. A; LABATE, C. A; DEAZEVEDO, E.R.; MCQUEEN-MASON, S.J.; POLIKARPOV, I. Evaluating the composition and processing potential of novel sources of Brazilian biomass for sustainable biorenewables production. **Biotechnol Biofuels**, v.7, n. 10, 2014. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-7-10>

LOPES, J. R. F.; DANTAS, M. P.; FERREIRA, F. E. P. Identificação da influência da pluviometria no rendimento do milho no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 13, n. 5, p. 3610-3618, 2019. <https://doi.org/10.7127/rbai.v13n5001119>

MADELLA, M.; LANCELOTTI, C.; GARCÍA-GRANERO, J. J. Millet microremains—an alternative approach to understand cultivation and use of critical crops in Prehistory. **Archaeological and Anthropological Sciences**, 8, 17-28, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12520-013-0130-y>

MARRON, N.; GANA, C.; GÉRANT, D.; MAILLARD, P.; PRIAULT, P.; EPRON, D. Estimating symbiotic N<sub>2</sub> fixation in Robinia pseudoacacia. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 181(2), 296-304, 2018. <https://doi.org/10.1002/jpln.201700503>

MENG, X.; LIAN, Y.; LIU, Q.; ZHANG, P.; JIA, Z.; HAN, Q. Optimizing the planting density under the ridge and furrow rainwater harvesting system to improve crop water productivity for foxtail millet in semiarid areas. **Agricultural Water Management**, 238, 106220, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106220>

MIGUEL, A. S. D. C. S.; PACHECO, L. P.; CARVALHO, Í. C. D.; SOUZA, E. D. D.; FEITOSA, P. B.; PETTER, F. A. Phytomass and nutrient release in soybean cultivation systems under no-tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 53, 1119-1131, 2018. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018001000005>

MINUZZI, R. B.; RIBEIRO, A. J.; DA SILVA, D. O.; KUNESKI, A. C. Estimativa da evapotranspiração de referência diária por Penman-Monteith FAO com dados de temperatura do ar para Santa Catarina. **Irriga**, 19(4), 548-558, 2014. <https://doi.org/10.15809/irriga.2014v19n4p548>

- MONTAÑEZ, A.; ABREU, C.; GILL, P. R.; HARDARSON, G.; SICARDI, M. Biological nitrogen fixation in maize (*Zea mays* L.) by <sup>15</sup>N isotope-dilution and identification of associated culturable diazotrophs. **Biology and fertility of soils**, v. 45, n. 3, p. 253-263, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00374-008-0322-2>
- MORAIS, R. F. D.; SOUZA, B. J. D.; LEITE, J. M.; SOARES, L. H. D. B.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. Elephant grass genotypes for bioenergy production by direct biomass combustion. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 44, 133-140, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000200004>
- OLIVEIRA, S. P.; C, N. B.; BANDIDO, M. J. D.; WEBER, O. B.; XAVIER, F. A. S. ESCOBAR, M. E. O.; OLIVEIRA, T. S. Conversion of forest into irrigated pasture I. changes in the chemical and biological properties of the soil. **Catena**, v. 137, p. 508-516, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.017>
- PANTERA, A.; MOSQUERA-LOSADA, M. R.; HERZOG, F.; DEN HERDER, M. Agroforestry and the environment. **Agroforestry Systems**, 95(5), 767-774. (2021). <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00640-8>
- PEDROSO, G. M.; HUTMACHER, R. B.; PUTNAM, D.; SIX, J.; VAN KESSEL, C.; LINQUIST, B. A. Biomass yield and nitrogen use of potential C4 and C3 dedicated energy crops in a Mediterranean climate. **Field Crops Research**, v. 161, p. 149-157, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.02.003>
- PEREIRA, P. D. C.; SILVA, T. G. F. D.; ZOLNIER, S.; MORAIS, J. E. F. D.; SANTOS, D. C. D. Morfogênese da palma forrageira irrigada por gotejamento. **Revista Caatinga**, v.28, n.3, p.184-195. 2015. <https://doi.org/10.1590/1983-21252015v28n321rc>
- PIÑEIRO, V.; ARIAS, J.; DÜRR, J.; ELVERDIN, P.; IBÁÑEZ, A. M.; KINENGYERE, A.; TORERO, M. A scoping review on incentives for adoption of sustainable agricultural practices and their outcomes. **Nature Sustainability**, 3: 809–820, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00617-y>
- PINHEIRO, G.; ZANOTTI, R.; PAIVA, C. E.; LOPES, J. C.; GAI, Z. T. Efeito do estresse salino em sementes e plântulas de feijão guandu. **Enciclopédia Biosfera**, v.9, n.6, p.901–912, 2013. <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/3414>
- QIU, Q.; MGELWA A. S.; JIN S.; HU, Y. Nitrogen-Induced Changes in Soil Environmental Factors Are More Important Than Nitrification and Denitrification Gene Abundance in Regulating N2O Emissions in Subtropical Forest Soils. **Frontiers in Plant Science**, 13:950367, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.950367>
- REN, F.; ZHANG, X.; LIU, J.; SUN, N.; WU, L.; LI, Z.; XU, M. A synthetic analysis of greenhouse gas emissions from manure amended agricultural soils in China. **Scientific Reports**, 7(1), 8123, 2017. [10.1038/s41598-017-07793-6](https://doi.org/10.1038/s41598-017-07793-6)
- SANTOS, R. D. D.; PEREIRA, L. G. R.; NEVES, A. L. A.; RODRIGUES, J. A. S.; COSTA, C. T. F.; OLIVEIRA, G. F. D. Agronomic characteristics of forage sorghum cultivars for silage production in the lower middle San Francisco Valley. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 35, n. 1, p. 13-19,2013. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v35i1.13072>

SANTOS, U. J.; DUDA, G. P.; MARQUES, M. C.; MEDEIROS, E. V.; LIMA, J. R. S.; SOUZA, E. S.; BROSSARD, M.; HAMMECKER, C. Soil organic carbon fractions and humic substances are affected by land uses of Caatinga forest in Brazil. **Arid Land Research and Management**, v. 33, p. 255-273, 2019. <https://doi.org/10.1080/15324982.2018.1555871>

SERRANO-SILVA, N.; SARRIA-GUZMÁN, Y.; DENDOOVEN, L.; LUNA-GUIDO, M. Methanogenesis and methanotrophy in soil: a review. **Pedosphere**, 24(3), 291-30720, 214. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(14\)60016-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(14)60016-3)

SETIONINGTYAS, W. P.; ILLÉS, C. B.; DUNAY, A.; HADI, A.; WIBOWO, T. S. Environmental Economics and the SDGs: A Review of Their Relationships and Barriers. **Sustainability**, 14(12), 7513, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14127513>

SHAKOOR, A.; SHAKOOR, S.; REHMAN, A.; ASHRAF, F.; ABDULLAH, M.; SHAHZAD, S. M.; ALTAF, M. A. Effect of animal manure, crop type, climate zone, and soil attributes on greenhouse gas emissions from agricultural soils—A global meta-analysis. **Journal of Cleaner Production**, 278, 124019, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124019>

SHEN, H.; SHIRATORI, Y.; OHTA, S.; MASUDA, Y.; ISOBE, K.; SENOO, K. Mitigating N<sub>2</sub>O emissions from agricultural soils with fungivorous mites. **The ISME Journal**, 15(8), 2427-2439, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41396-021-00948-4>

SHINKAI, A. L. F.; YANO, É. H.; ROSABONI, V. M.; CASAGRANDE, R.; MARQUES, F. L. C.; RIBEIRO, J. A. Características produtivas da soja sobre sistemas integrados de produção do consórcio de gramíneas e leguminosas em modo de colheita do milho. **Brazilian Journal of Development**, 6(6), 37700-37705, 2022. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n6-342>

SIGNOR, D.; CERRI, C. E. P. Emissões de óxido nitroso em solos agrícolas: Uma revisão. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 43, 322-338, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1983-40632013000300014>

STIVARI, T. S. S.; MONTEIRO, A. L. G.; DE PAULA, E. F. E.; FERNANDES, S. R.; SOUZA, D. F.; GILAVERTE, S. Leguminosas na alimentação de ovinos: possibilidades de uso e resposta animal. **Pubvet**, 5, Art-1205, 2011.

TAULÉ, C.; MAREQUE, C.; BARLOCCO, C.; HACKEMBRUCH, F.; REIS, V. M.; SICARDI, M.; BATTISTONI, F. The contribution of nitrogen fixation to sugarcane (*Saccharum officinarum* L.), and the identification and characterization of part of the associated diazotrophic bacterial community. **Plant Soil**, v. 356, p. 35–49, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1023-4>

TIMUCIN, T. A. S.; YUCEL, C.; GUNEL, F. D.; OKTEM, A.; CETINER, I. H. Avaliação do bagaço de sorgo sacarino como recurso alimentar alternativo para a pecuária em regiões semiáridas. **Revista MAS de Ciências Aplicadas**, 6(2), 303-311, 2021. <https://doi.org/10.52520/masjaps.50>

TONINI, H.; MORALES, M. M.; SILVA, V. P. D.; LULU, J.; FARIAS NETO, A. L. D. Effect of planting system and solar exposure on biomass allocation in the initial growth of eucalyptus. **Ciência Florestal**, v.29, n.1, p.86–95, 2019. <https://doi.org/10.5902/1980509817808>

TORRES, J. L.; PEREIRA, M.; CUNHA, M.; VIEIRA, D. M.; RODRIGUES, E. Produtividade do milho cultivado em sucessão a crotalária, milho e braquiária no cerrado mineiro. **Enciclopédia Biosfera**, v. 10, n. 18, 2014.

URQUIAGA, S.; XAVIER, R.P; MORAIS, R. F. DE; BATISTA, R. B.; SCHULTZ, N.; LEITE, J. M.; MAIA E SÁ, J.; BARBOSA, K. P.; RESENDE, A. S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Evidence from Field nitrogen balance and <sup>15</sup>N natural abundance data for the contribution of biological N<sub>2</sub> fixation to Brazilian sugarcane varieties. **Plant and Soil**, v. 356, p.5-21, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1016-3>

VASILAKOGLU, I.; DHIMA, K.; KARAGIANNIDIS, N.; GATSI, T. Sweet sorghum productivity for biofuels under increased soil salinity and reduced irrigation. **Field Crops Research**, v. 120, n. 1, p. 38-46, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.08.011>

ZHOU, W. J.; JI, H. L.; ZHU, J.; ZHANG, Y. P.; SHA, L. Q.; LIU, Y. T.; ZHENG, X. H. The effects of nitrogen fertilization on N<sub>2</sub>O emissions from a rubber plantation. **Scientific Reports**, 6(1), 28230, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep28230>

## APORTE DE NITROGÊNIO ATMOSFÉRICO EM DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO FORRAGEIRO COM GRAMÍNEAS E LEGUMINOSA NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO

### Resumo

A fixação biológica é um processo que permite aportes de nitrogênio aos sistemas de cultivo com vantagens ecológicas e financeiras em relação aos fertilizantes químicos, dependentes de energia fóssil para fabricação e muitas vezes inacessíveis em sistemas de cultivo de baixa utilização de insumos. O presente estudo teve o objetivo de estimar os aportes de N atmosférico em gramíneas e leguminosa cultivadas em diferentes sistemas, para fins forrageiros no Semiárido pernambucano. Foi desenvolvido um experimento em campo, utilizando delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições, no Campus de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), no município de Petrolina, entre julho de 2020 e outubro de 2022. Os tratamentos consistiram em diferentes sistemas de cultivo: 1) guandu solteiro; 2) sorgo solteiro; 3) milho solteiro; 4) consórcio de guandu e sorgo; 5) consórcio guandu e milho; 6) rotação de guandu e sorgo; e 7) rotação de guandu e milho. Foram utilizadas as variedades BRS Ponta Negra, de sorgo; BRS 1501, de milho; e BRS Mandarim, de feijão guandu. Ao fim do ciclo de cada cultura, a produção total de matéria verde foi estimada cortando as plantas a 10 cm do solo e pesando-se toda a biomassa aérea de todas as plantas da área útil da parcela. Desta massa, foram coletadas amostras de matéria verde para determinação do teor de umidade e estimativa da produção de biomassa seca. Antes do corte, amostras compostas de folhas verdes e sadias de cinco plantas das espécies alvo (sorgo, milho e guandu), escolhidas aleatoriamente nas linhas externas das parcelas foram coletadas para estimativa da FBN utilizando a técnica da abundância natural do  $^{15}\text{N}$ . Foram verificadas diferenças significativas entre os diferentes cultivos nas médias anuais de composição isotópica do carbono 13 ( $\delta^{13}\text{C}$ ), carbono total (%C), relação carbono nitrogênio (C/N), nitrogênio total (%N) e no percentual de nitrogênio derivado da atmosfera e (%N<sub>dda</sub>). A biomassa produzida não foi afetada pelos sistemas de cultivo em nenhum dos anos avaliados. Os sistemas de cultivos feijão guandu solteiro apresentaram aporte de nitrogênio total mais elevados no primeiro ano de cultivo. No segundo ano o aporte foi igual para todos os sistemas de cultivo e espécies estudadas. Os tratamentos com o cultivo de feijão guandu, independente do sistema de cultivo e do ano, apresentaram médias mais elevadas de %N<sub>dda</sub>, sendo observado no primeiro ano (2020-21) médias de 79,3 (G); 68,8 (GM); 73,5 (GS), e no segundo ano (2021-2022) médias de 85,1 (G); 86,7 (GM); 84,5 (GS). A cultura do sorgo e do milho apresentaram maiores relação de C/N nos dois anos de cultivos independente do sistema de cultivo que foram submetidas.

Palavras-chave: Fixação biológica de nitrogênio (FBN). Técnicas isotópicas. *Cajanus cajan* (L.) Mills. *Pennisetum glaucum* (L.). *Sorghum bicolor* (L.) Moench

## ATMOSPHERIC NITROGEN INPUT IN DIFFERENT FORAGE CROPPING SYSTEMS WITH GRASSES AND LEGUMES IN THE SEMI-ARID REGION OF PERNAMBUCO

### Abstract

For the estimation of the contribution of biological nitrogen fixation (BNF), there are different methods, the first BNF studies among them isotopic techniques based on the use of  $^{15}\text{N}$  have stood out due to their efficiency, being adopted by many groups involved in research with endophytic bacteria, this is because it is the only direct method to demonstrate biological  $\text{N}_2$  fixation. Therefore, the present study was carried out in order to estimate the contribution of BNF in the sole and intercropped cultivation of grasses and legumes in the region of the Pernambuco backlands. The study was conducted in the experimental field of the Campus of Agricultural Sciences (CCA), belonging to the Federal University of the São Francisco Valley (UNIVASF), Petrolina - PE, located at geographic coordinates  $9^\circ 19' 17.55''\text{S}$ ,  $40^\circ 33' 30.99''\text{W}$  and altitude 392 meters, between July 2020 and October 2022, with a planting direction of East-West. The sorghum - BRS Ponta Negra, pearl millet - BRS 1501, and pigeon pea - BRS Mandarin were used, organized into seven different cultivation systems: Pigeon pea cultivation (G), pigeon pea intercropped with pearl millet (GM), pigeon pea intercropped with sorghum (GS), pearl millet cultivation (M), pearl millet intercropped with pigeon pea (MG), pearl millet rotated with pigeon pea (MR), sorghum cultivation (S), sorghum intercropped with pigeon pea (SG), and sorghum rotated with pigeon pea (SR), with four replications. The intercropping plots between pigeon pea and pearl millet were used for collecting material from the GM and MG treatments, the same applying to the pigeon pea cultivated in intercropping with sorghum. At the end of each crop cycle, the total green matter production was estimated by cutting the plants 10 cm above the ground and weighing the entire above-ground biomass of all plants in the useful area of the plot. From this mass, samples of green matter were collected to determine the moisture content and estimate the production of dry biomass. Before cutting, composite samples of green and healthy leaves from five plants of the target species (sorghum, pearl millet, and pigeon pea), randomly selected from the outer rows of the plots, were collected to estimate Biological Nitrogen Fixation (BNF) using the natural abundance technique of  $^{15}\text{N}$ . Significant differences were found among the different crops in the annual means of isotopic composition of carbon 13 ( $\delta^{13}\text{C}$ ), total carbon (%C), carbon-to-nitrogen ratio (C/N), total nitrogen (%N), and the percentage of nitrogen derived from the atmosphere (%Ndfa). The treatments with pigeon pea cultivation, regardless of the cropping system and the year, showed higher averages of %Ndfa, with means of 79.3 (G); 68.8 (GM); 73.5 (GS) in the first year (2020-21), and means of 85.1 (G); 86.7 (GM); 84.5 (GS) in the second year (2021-2022).

Keywords: Biological nitrogen fixation (BNF). Isotopic techniques. *Cajanus cajan* (L.) Mills. *Pennisetum glaucum* (L.). *Sorghum bicolor* (L.) Moench

### 3.1 Introdução

Como composto essencial do DNA, proteínas ou enzimas, o nitrogênio (N) é um componente chave da vida e um nutriente fundamental (DENK et al., 2017; LU et al., 2020; ZHU et al., 2018). Um processo importante na ciclagem de N é a fixação biológica, no qual ocorre a conversão de  $N_2$  atmosférico para  $NH_3$  por microrganismos diazotróficos que oxidam carboidratos para ganhar energia e, assim, reduzir o  $N_2$  para  $NH_3$  utilizando o complexo enzimático da nitrogenase (DENK et al., 2017).

Quando associadas a bactérias do solo chamadas rizóbios, as leguminosas formam nódulos radiculares, e as bactérias dentro dessas estruturas são capazes de reduzir o  $N_2$  atmosférico em  $NH_3$  para uso próprio (NGWENYA; MOHAMMED; DAKORA, 2024). Uma vez fixado, o N é transformado em biomassa microbiana ou vegetal (imobilização e absorção, respectivamente), acabando no reservatório de matéria orgânica do solo (MOS) após senescência, serapilheira e decomposição (DENK et al., 2017).

Sistemas de cultivo como o consórcio, que é a prática de cultivar mais de uma espécie em uma mesma área, aumenta o uso de recursos que, de outra forma, seriam utilizados por uma única cultura (PHIRI; NJIRA, 2023). O consórcio de gramíneas com leguminosas aumenta os benefícios para os agricultores, uma vez que as leguminosas contribuem para a melhoria da fertilidade do solo através da FBN, melhorando os rendimentos das espécies em consórcio e aquelas que serão cultivadas em sequência (WALDMAN et al., 2016).

Além da produtividade das plantas e do aumento da quantidade de nitrogênio estocado no sistema, o consórcio de leguminosas com gramíneas aumenta a disponibilidade de outros nutrientes no solo (PHIRI; NJIRA, 2023). Outra vantagem é o uso da mão de obra de forma eficiente e muitas vezes também leva ao aumento da produtividade da lavoura (PHIRI; NJIRA, 2023).

Para se mensurar as quantidades de N fixado pelas bactérias associadas às leguminosas, existem diversas técnicas, dentre elas os métodos isotópicos fornecem estimativas da porcentagem de N total da leguminosa proveniente do  $N_2$  fixação (HERRIDGE; GILLER, 2016), sendo mais eficientes por exemplo que o balanço de nitrogênio, em que se compara o N total de um sistema planta-solo em duas ocasiões distintas, com qualquer aumento atribuído ao  $N_2$  fixação após outras entradas e saídas possíveis de N terem sido contabilizadas (NGWENYA; MOHAMMED; DAKORA, 2024).

Esforços consideráveis têm sido feitos para investigar os fatores determinantes da FBN (YANG et al., 2022). Investigando esse padrão espacial de  $\delta^{15}\text{N}$  do solo pode ajudar a identificar a importância relativa das diferentes rotas de entrada e saída de N no solo, além de melhorar nossa compreensão do ciclo do N terrestre (LAI et al., 2022). Além de contribuir em elucidações sobre os efeitos que desencadeiam em fatores agronômicos.

Diante do exposto, a realização dessa pesquisa tem por objetivo estimar a produção de fitomassa aérea em diferentes sistemas de cultivo de milho, sorgo e feijão-guando para fins forrageiros no Semiárido de Pernambuco, estimar a contribuição da FBN nas plantas e os aportes totais de N atmosférico.

## **3.2 Material e Métodos**

### **3.2.1 Caracterização da área experimental**

O estudo foi desenvolvido no campo experimental do Campus de Ciências Agrárias (CCA), pertencente à Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Petrolina - PE, localizado nas coordenadas geográficas 9°19'17.55"S, 40°33'30.99"W e altitude 392 metros, entre julho de 2020 e outubro de 2022. O clima é considerado semiárido, segundo Köppen, como tipo BSw $\bar{h}$ . O índice pluviométrico anual médio é 571,5 mm, distribuído entre os meses de dezembro a abril (LOPES et al., 2017). A temperatura média anual é de 26,4 °C, com média mínima de 20,6 °C e máxima de 31,7 °C (RAMOS et al., 2011).

Na área do experimento, o solo é classificado como Neossolo Quartzarênico de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2013). Antes do início do experimento, foram realizadas coletas de solo para as análises químicas e físicas, a partir de amostras retiradas nas camadas de 0-20 e 20-40 cm de profundidade (Tabelas 1 e 2).

**Tabela 1-** Atributos físicos do Neossolo Quartzarênico da área experimental.

Prof.	Areia	Silte	Argila	Densidade do solo	Densidade de partículas	Porosidade total
Cm	g/kg			kg/dm <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	%
<b>0-20</b>	816,3	127,5	56,1	1,48	2,34	42,1
<b>21-40</b>	759,2	143,2	97,5	1,46	2,35	36,3

**Tabela 2-** Atributos químicos do Neossolo Quartzarênico da área experimental.

Amostra	cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>								%
	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	S (bases)	T	V
<b>0 - 20 cm</b>	0,20	1,83	0,30	0,06	0,01	0,82	2,39	3,21	74,4
<b>20 - 40 cm</b>	0,11	1,61	0,31	0,08	0,41	1,06	2,11	3,17	66,5

Amostra	CE <sub>ext</sub> (dS/m)	MO (g/kg)	m (%)	pH (H <sub>2</sub> O) 1:2,5	P (mg/dm <sup>3</sup> )	Ca <sup>2+</sup> (%)	Mg <sup>2+</sup> (%)	Na <sup>+</sup> (%)	K <sup>+</sup> (%)
<b>0 - 20 cm</b>	0,65	13,30	0,50	5,25	1,00	57,10	9,30	1,80	6,20
<b>20 - 40 cm</b>	0,45	5,80	16,2	4,50	0,55	50,70	9,70	2,50	3,40

Extratores: \* P, K e Na → Mehlich (HCl + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>); \* Ca, Mg e Al → KCl 1M; Cálculos: Sb= Ca+Mg+Na+K; T= Sb+(H+Al); V%= (S/T) x100.

### 3.2.2 Delineamento experimental e estratégias de manejo

Foi realizado um experimento utilizando um delineamento inteiramente casualizado (DIC), com sete tratamentos e quatro repetições. O DIC foi adotado devido à homogeneidade da área experimental quanto às características físicas e químicas do solo e à declividade do terreno. A direção do cultivo foi Leste-Oeste. Os tratamentos consistiram em diferentes formas de cultivo, com finalidade forrageira, de uma espécie de leguminosas nodulante (feijão guandu, *Cajanus cajan*, cultivar BRS Mandarin) e duas espécies de gramíneas C<sub>4</sub>, o milho (*Pennisetum glaucum*, cultivar BRS 1501) e o sorgo (*Sorghum bicolor*), cultivar Ponta Negra. A unidade experimental foi constituída por uma parcela de 6,5 metros de comprimento por 8 m de largura (52 m<sup>2</sup>). O espaçamento utilizado foi 0,20 x 1,60 m, para todos os tratamentos, sendo cada parcela composta por 5 linhas e com uma população total equivalente a 31.250 plantas ha<sup>-1</sup>. Nos tratamentos consorciados, as linhas foram semeadas de forma alternada. A área útil da parcela foi constituída pelas três linhas centrais, desprezando-se as plantas das extremidades.

Os tratamentos consistiram em diferentes sistemas de cultivo das espécies utilizadas: 1) guandu solteiro; 2) sorgo solteiro; 3) milho solteiro; 4) consórcio de

guandu e sorgo; 5) consórcio guandu e milho; 6) rotação de guandu e sorgo; e 7) rotação de guandu e milho, totalizando 28 parcelas. Os tratamentos com rotação consistiram no cultivo da leguminosa no primeiro ano e de cada gramínea no segundo ano. Quatro parcelas extras foram utilizadas para cultivo de girassol, para coletar plantas para avaliação da composição isotópica do N do solo disponível para as culturas. O experimento foi conduzido por dois anos de cultivos consecutivos (2020-2021 e 2021-2022).

No primeiro ano do experimento, as parcelas reservadas para os tratamentos de rotação da leguminosa com as gramíneas foram excluídas das avaliações, uma vez que seriam repetições do tratamento de cultivo de feijão-guandu solteiro. Dessa forma, o experimento foi considerado com cinco tratamentos (os 3 cultivos solteiros e os 2 cultivos de consórcio leguminosa com gramínea C4), totalizando 20 parcelas.

Na cultura do feijão-guandu foi realizada uma semeadura para cada ano de cultivo, enquanto no milho e no sorgo foram realizadas duas semeaduras. Foram realizados 4 cortes das plantas de todos os tratamentos durante cada ano de cultivo (2020-2021 e 2021-2022).

No primeiro ano de cultivo (2020-2021), a primeira semeadura foi realizada entre os dias 8 e 20 de julho de 2020 para todas as culturas e realizado 4 cortes consecutivos, sendo que para o feijão guandu o segundo, terceiro e 4 cortes realizados a partir da rebrota do corte anterior (1º corte a partir da semeadura; 2º corte a partir da rebrota do 1º corte; 3º corte a partir da rebrota do 2º corte e por fim o 4º corte a partir da rebrota do 3º corte). Para o sorgo e milho foi realizada uma nova semeadura entre o 2º e 3º corte (1º corte a partir da 1ª semeadura; 2º corte a partir da rebrota do 1º corte; 3º corte a partir da 2ª semeadura; e 4º a partir da rebrota do 3º corte), a segunda semeadura do sorgo e milho ocorreu entre os dias 15 e 26 de janeiro de 2021.

No segundo ano de cultivo (2021-2022), a primeira semeadura foi realizada entre os dias 25 e 28 de outubro de 2021, para todas as culturas; a segunda semeadura do sorgo e do milho ocorreu entre 05 e 25 de maio de 2022, a sequência de cortes e semeaduras foi realizada da mesma maneira descrita para o primeiro ano. As datas de semeaduras e cortes estão sumarizadas na Tabela 3.

**Tabela 3-** Datas das semeaduras e cortes das culturas forrageiras durante os dois anos de condução do experimento

Sistema de cultivo/espécie		Eventos					
		1 Ano (2020-2021)					
		1 <sup>a</sup> Semeadura	1 <sup>o</sup> Corte	2 <sup>o</sup> Corte	2 <sup>a</sup> Semeadura	3 <sup>o</sup> Corte	4 <sup>o</sup> Corte
<b>Solteiro</b>	Milheto	08/07/2020	27/09/2020	17/12/2020	26/01/2021	17/04/2021	05/07/2021
	Guando	08/07/2020	16/10/2020	14/01/2021	-	14/04/2021	12/07/2021
	Sorgo	08/07/2020	16/10/2020	14/01/2021	17/01/2021	17/04/2021	15/07/2021
<b>Consortiado</b>	Milheto	08/07/2020	27/09/2020	17/12/2020	20/01/2021	11/04/2021	29/06/2021
	Guandu	08/07/2020	27/09/2020	17/12/2020	-	08/03/2021	26/05/2021
<b>Consortiado</b>	Sorgo	08/07/2020	16/10/2020	14/01/2021	17/01/2021	19/04/2021	18/07/2021
	Guandu	08/07/2020	16/10/2020	14/01/2021	-	16/04/2021	15/07/2021
		2 Ano (2021-2022)					
		1 <sup>a</sup> Semeadura	1 <sup>o</sup> Corte	2 <sup>o</sup> Corte	2 <sup>a</sup> Semeadura	3 <sup>o</sup> Corte	4 <sup>o</sup> Corte
<b>Solteiro</b>	Milheto	26/10/2021	15/01/2022	05/04/2022	26/05/2022	14/08/2022	02/11/2022
	Guando	28/10/2021	05/02/2022	08/05/2022	-	07/08/2022	08/11/2022
	Sorgo	25/10/2021	02/02/2022	05/05/2022	06/05/2022	05/08/2022	06/11/2022
<b>Consortiado</b>	Milheto	26/10/2021	15/01/2022	05/04/2022	06/05/2022	25/07/2022	13/10/2022
	Guandu	26/10/2021	15/01/2022	05/04/2022	-	24/06/2022	12/09/2022
<b>Consortiado</b>	Sorgo	27/10/2021	04/02/2022	05/05/2022	06/05/2022	05/08/2022	06/11/2022
	Guandu	27/10/2021	04/02/2022	07/05/2022	-	06/08/2022	07/11/2022
<b>Rotacionado</b>	Milheto	28/11/2021	16/02/2022	07/05/2022	25/05/2022	13/08/2022	01/11/2022
	Sorgo	25/10/2021	02/02/2022	05/05/2022	06/05/2022	14/08/2022	12/11/2022

Dessa forma, a duração do cultivo no período (2020-2022) do guandu solteiro foi 745 dias; guandu consorciado com o sorgo foi 726 dias; guandu consorciado com o milho foi 643 dias; sorgo solteiro 741 dias; sorgo consorciado com o guandu 726 dias; o sorgo rotacionado 380 dias; o milho solteiro e consorciado com guandu 643 dias; e o milho rotacionado teve duração de 360 dias

Para estimar o requerimento de um nutriente pela cultura, as recomendações dependem inicialmente de informação sobre a produtividade esperada para o primeiro corte, com base na recomendação de adubação. Assim a recomendação de doses de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O, em kg/ha, para o sorgo forrageiro foi em função dos teores de P e K no solo e expectativas de produtividades (modificado por ALVES et al. 1999), considerando 100% da adubação e uma produtividade esperada < 50 t/ha de MF. Correspondeu a N: 90 kg/ha; o P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 70 kg/ha e o K<sub>2</sub>O: 60 kg/há, Ca 17,5 kg/ha, Mg 8,8 kg/há, 2,6 kg/ha de Zn, 1,8 kg/ha de B e 0,3 kg/ha de Cu.

Para o milho as recomendações de adubação foram baseadas na finalidade de exploração (forragem) e na análise de solo (adaptado de CANTARUTTI et al., 1999;

SOUSA & LOBATO, 2004). Para o 1º corte recomendou-se: 110 kg/ha de N; 60 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 40 kg/ha de K<sub>2</sub>O, 2,6 kg/ha de Zn; 1,8 kg/ha de B e 0,3 kg/ha de Cu.

A cultura do feijão guandu cv. Mandarin recomendou-se para o 1º corte (considerando o ciclo de 120 dias): não aplicar N; 34,9 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 40,1 kg/ha de K<sub>2</sub>O, 0,9 kg/ha de B; 1,3 kg/ha de Zn e 0,1 kg/ha de Cu. A aplicação de micronutrientes recomendados foram efetuadas somente no primeiro corte.

Na rebrota foi utilizada a seguinte estratégia: repor os nutrientes extraído no corte anterior. Assim foi aplicado em função da extração dos nutrientes na biomassa produzida no corte anterior, sendo, 20 kg/ha de N; 10 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 18 kg/ha de K<sub>2</sub>O; 3 kg/ha de Ca; e 1,5 kg/ha de Mg por tonelada de MS produzida. Para o milho utilizou a seguinte estratégia: 27 kg/ha de N; 17 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 45 kg/ha de K<sub>2</sub>O; 4,8 kg/ha de Ca e 2,6 kg/ha de Mg por tonelada de MS produzida. O feijão guandu foi definido: 6 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 3 kg/ha de K<sub>2</sub>O; 4 kg/ha de Ca e 2 kg/ha de Mg por tonelada de MS produzida, visto que, não foram aplicados micronutrientes. A realização da adubação foi dividida em três doses (40% no plantio para fontes de N, P,K, Ca e Mg, e 100% de Zn e B, e adubação de cobertura em mais dois momentos com 20-30 dias após a semeadura e com 50-60 dias após a semeadura, aplicando em cada momento 30% da dose recomendada. A quantidade de nutrientes aplicados em cada cultura pode ser observada com mais detalhes na Tabela 4.

**Tabela 4** - Nutrientes aplicados ao longo dos ciclos de cultivo solteiro e consórcio de sorgo, milho e guandu, em Neossolo Quartzarênico no campo experimental da Universidade Federal do Vale do São Francisco, em Petrolina - PE, no período de 2020-2022.

Ciclos	Corte	Elementos (kg ha <sup>-1</sup> )*								
		N	P	K	Ca	Mg	Zn	B	Cu	
Ano 1 2020-2021	1°	-	34,9	40,1	7,60	10,3	1,3	0,9	0,1	
	2°	-	57,7	29,1	12,5	19,5	-	-	-	
	3°	-	15,7	7,8	3,4	5,2	-	-	-	
	4°	-	35,4	17,7	7,7	11,8	-	-	-	
Ano 2 2021-2022	1°	-	55,9	165,7	7,60	10,3	1,3	0,9	0,1	
	2°	-	35,6	17,4	7,8	11,5	-	-	-	
	3°	-	26,6	13,3	17,7	8,9	-	-	-	
	4°	-	39,9	19,9	26,6	13,3	-	-	-	
Ano 1 2020-2021	1°	90,0	70,1	60,1	17,5	8,8	2,6	1,8	0,3	
	2°	174,8	87,4	157,3	26,2	13,1	-	-	-	
	3°	90,0	70,1	60,1	17,5	8,8	2,6	1,8	0,3	
	4°	53,7	26,8	53,7	8,1	4,0	-	-	-	
Ano 2 2021-2022	1°	90,0	70,1	60,1	17,5	8,8	2,6	1,8	0,3	
	2°	110,8	55,7	68,7	16,7	8,4	-	-	-	
	3°	90,0	70,1	60,1	17,5	8,8	2,6	1,8	0,3	
	4°	109,8	54,9	98,8	16,5	8,2	-	-	-	
Ano 1 2020-2021	1°	110,0	60,1	40,0	9,0	4,9	2,6	1,8	0,3	
	2°	147,2	93,4	247,0	26,3	14,3	-	-	-	
	3°	110,0	60,1	40,0	9,0	4,9	2,6	1,8	0,3	
	4°	65,6	41,3	109,5	11,7	6,3	-	-	-	
Ano 2 2021-2022	1°	53,5	12,7	89,4	-	-	2,6	1,8	0,3	
	2°	96,6	60,4	159,3	17,4	9,2	-	-	-	
	3°	78,1	49,0	130,2	13,9	7,5	2,9	2,0	0,3	
	4°	118,4	74,5	197,5	21,0	11,4	-	-	-	

\*Fonte de fertilizantes: P (MAP – milho e sorgo; Super Triplo - guandu); N (Ureia, MAP e Nitrato De Cálcio); K (Sulfato De Potássio); Ca (Nitrato De Cálcio - milho e sorgo; Super Triplo - guandu); Mg (Sulfato De Magnésio); Zn (FDE); B (FTE, Ácido Bórico); Cu (FTE).

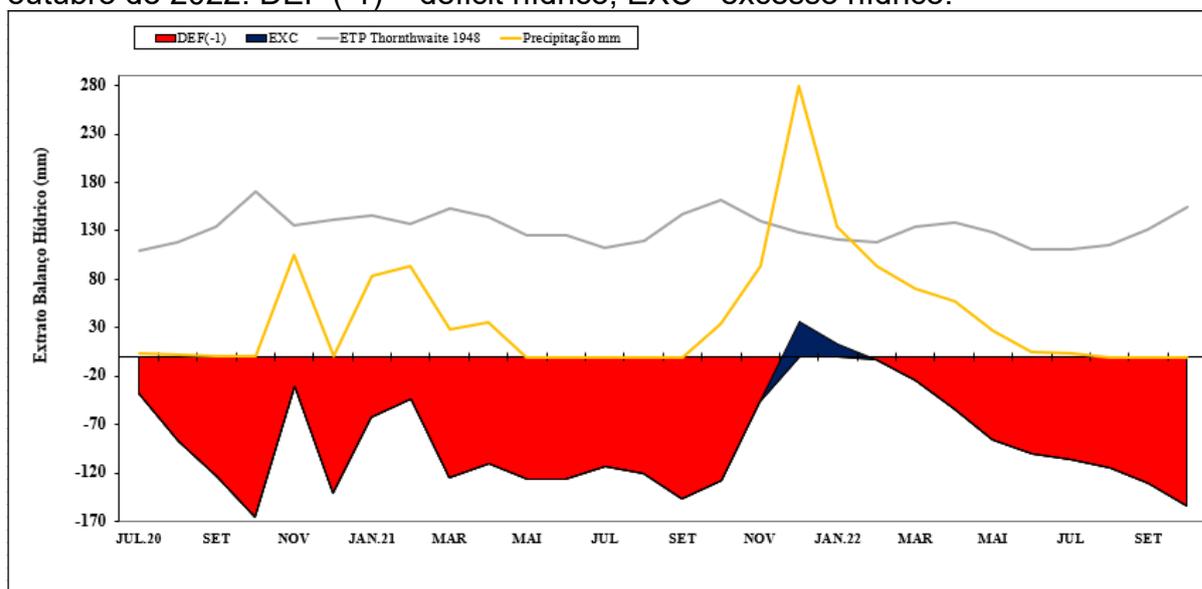
Vale salientar que no cultivo consorciado, a recomendação de adução respeitava a espécie que estava sendo cultivada em cada linha, ou seja, nas parcelas com cultivo consorciado de sorgo e feijão guandu, as linhas de sorgo respeitavam a recomendação para o cultivo do sorgo, e as linhas com guandu seguiam as recomendações para o feijão guandu, essa lógica também foi usada nas parcelas com consorcio de milho e feijão guandu.

### 3.2.3 Dados meteorológicos e irrigação

Ao longo do período experimental, a precipitação foi obtida por meio de uma estação automática, da UNIVASF, localizada a uma distância de aproximadamente 400 m do local de condução do experimento.

As épocas seca e chuvosa foram definidas a partir do balanço hídrico sequencial (BHS), calculado pelo método proposto por Thornthwaite e Mather (1955) em planilhas Excel (ROLIM et al., 1998) (Figura 1), considerando época chuvosa os meses com balanço hídrico positivo (excesso hídrico) e época seca balanço hídrico negativo (déficit hídrico).

**Figura 1** - Precipitação pluvial, evapotranspiração potencial (ETP) de Thornthwaite (1948) e balanço hídrico na área experimental, durante o período de julho de 2020 a outubro de 2022. DEF (-1) = déficit hídrico, EXC= excesso hídrico.

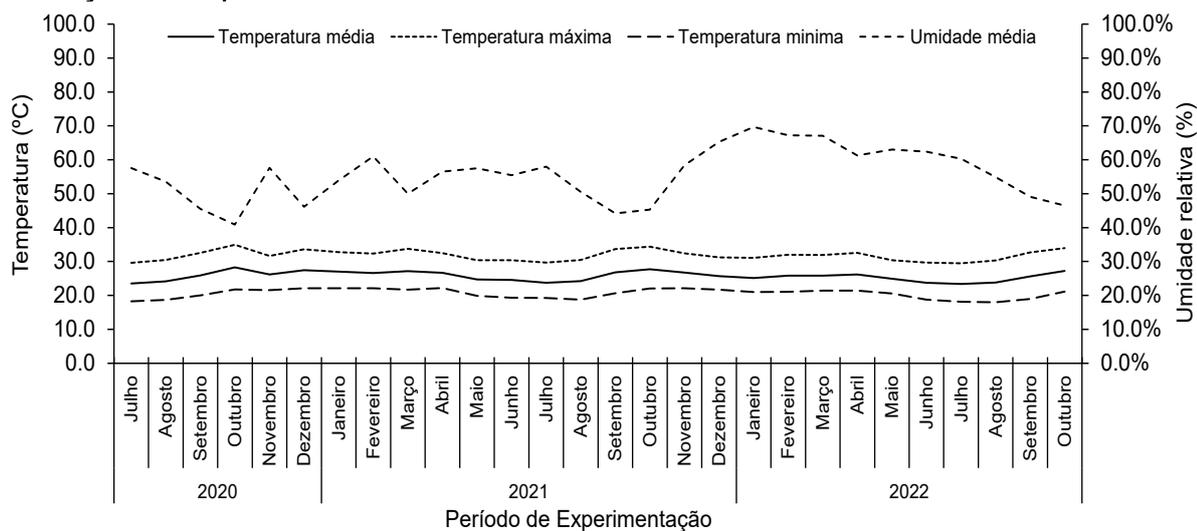


O sistema de irrigação utilizado foi por gotejamento, com fitas posicionadas próximas às linhas de cultivo, e os gotejadores espaçados a 0,2 m, com vazão de 1,6 L h<sup>-1</sup> a 1 atm, com diâmetro nominal (DN) de 13 mm e coeficiente de distribuição de 93%. A água utilizada na irrigação foi proveniente do Rio São Francisco. Foram aplicados 1195,9 mm de lâmina bruta de água durante o período experimental, em que ocorreu uma precipitação natural de 1536,5 mm (Figura 1), totalizando 2732,4 mm de lâmina de água durante o período experimental (2020-2022).

A irrigação realizada na área experimental foi caracterizada como uma irrigação de salvamento, realizada conforme observação empírica de necessidade das plantas cultivadas, adotando tempo irrigação de 30 a 40 minutos diários com interrupção da irrigação em épocas que apresentaram precipitação e sua retomada ao se perceber sinais de estresse hídrico nas culturas.

As médias mensais de temperatura média, de temperatura máxima, de temperatura mínima do ar e de umidade relativa do ar durante a execução do experimento podem ser visualizadas na figura 2.

**Figura 2** - Valores médios mensais de temperatura média, temperatura máxima, temperatura mínima e umidade relativa do ar em Petrolina-PE durante o período de execução do experimento.



### 3.2.4 Detalhes das amostragens e avaliações

Por ocasião de todos os cortes de cada cultura, em cada tratamento, a produção total de matéria verde foi estimada cortando as plantas (à altura de 10 cm da superfície do solo para as culturas do sorgo e do milho, e à altura de 20 cm para o guandu) e pesando-se toda a biomassa aérea de todas as plantas da área útil da parcela. Desta massa, foram coletadas amostras de matéria verde para determinação do teor de umidade e estimativa da produção de biomassa seca.

Imediatamente antes dos cortes, cinco indivíduos de cada espécie alvo (sorgo, milho e guandu), escolhidas aleatoriamente nas linhas externas das parcelas foram coletados para estimativa da FBN utilizando a técnica da abundância natural do  $^{15}\text{N}$ . Nessas ocasiões, também foram coletadas amostras de girassol, nas parcelas extras, assim como de espécies de ocorrência espontânea dentro do experimento e em áreas adjacentes (*Amaranthaceae*, *Rubiaceae*, *Malvaceae*), que foram utilizadas como plantas referência para estimativa do sinal isotópico do N do solo disponível para as plantas. As amostras individuais de cada espécie coletadas em cada parcela foram agrupadas para formar uma amostra composta de cada repetição experimental. Nas parcelas com cultivo de duas espécies diferentes, foram obtidas duas amostras

compostas, sendo uma para cada espécie. As amostras compostas (plantas alvo e referências) foram picadas, homogeneizadas e subamostras foram acondicionadas em saco de papel e submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até peso constante. Posteriormente, as amostras foram processadas em moinho de facas e maceradas quando necessário.

Alíquotas de todo o material vegetal das amostras compostas foram enviadas para determinação dos teores de N total (%) e abundância natural de  $^{15}\text{N}$  em espectrômetro de massa Thermo Quest-Finnigan Delta Plus (Finnigan-MAT; CA, USA) com interface com um Analisador Elementar (Carlo Erba model 1110; Milan, Italy), no Laboratório de Ecologia Isotópica do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA-USP).

Os valores de abundância natural de  $^{15}\text{N}$  foram expressos em unidades de “delta” ( $\delta^{15}\text{N}$ ), que representa o desvio por mil (‰), em relação ao  $\text{N}_2$  atmosférico, da razão entre as massas de  $^{15}\text{N}$  e  $^{14}\text{N}$  do nitrogênio contido na amostra:

$$\delta = (\text{Ramostra}/\text{Rpadrão} - 1) \times (1000)$$

Em que Ramostra e Rpadrão são as razões  $^{15}\text{N}:^{14}\text{N}$  da amostra e do padrão ( $\text{N}_2$  atmosférico), respectivamente.

O percentual de nitrogênio derivado do ar (%Ndda) em cada espécie foi calculado quando houve diferença significativa entre os sinais isotópicos de espécies alvo e referência, utilizando a fórmula descrita por Shearer e Kohl (1986):

$$\% \text{Ndda} = [(\delta^{15}\text{N}(\text{referência}) - \delta^{15}\text{N}(\text{alvo})) / \delta^{15}\text{N}(\text{referência} - B)] \times 100$$

Em que %Ndda é a porcentagem de nitrogênio derivado da atmosfera;  $\delta^{15}\text{N}$  (referência) é o valor médio dos  $\delta^{15}\text{N}$  das plantas referência em cada tratamento;  $\delta^{15}\text{N}$  (alvo) é o valor médio de  $\delta^{15}\text{N}$  das plantas de sorgo, milho e guandu em cada parcela, e B é o valor de  $\delta^{15}\text{N}$  para plantas fixadoras cultivadas na ausência de N. Considerando a ausência de dados de valor B para gramíneas, foi utilizado o valor de -1,06 ‰, estimado para o feijão guandu por Gathumbi et al. (2002), para as três espécies utilizadas.

A quantidade de N acumulado na parte aérea das espécies alvo, em cada tratamento, foi estimada pelo produto das concentrações de N das biomassas secas

da parte aérea. As quantidades de N fixadas ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) foram obtidas multiplicando as quantidades de N total pelos resultados de %Nda médios de cada espécie.

### 3.2.5 Análise estatística

Os resultados de produção de biomassa aérea, concentrações e quantidades de C e N totais,  $\delta^{13}\text{C}$ , relação C/N e quantidades de N fixado foram analisados considerando um arranjo fatorial duplo, no qual os fatores foram os sistemas de cultivo (5 no primeiro ano e 7 no segundo ano) e os sucessivos cortes ou ciclos (4 cortes e 2 ciclos), com delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. Foi utilizado o programa computacional R, versão 4.1.2, sendo primeiramente verificada a normalidade dos resíduos, pelo teste de SHAPIRO WILK e análise de variância, pelo teste F.

Quando houve diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, em cada variável. Os resultados de  $\delta^{15}\text{N}$  foram analisados considerando um DIC com os tratamentos relativos apenas às espécies dentro de cada época de cultivo. Os dados de percentagem foram analisados após transformação em arco seno.

## 3.3 Resultados e Discussão

### 3.3.1 Composição Isotópica ( $\delta^{13}\text{C}$ , $\delta^{15}\text{N}$ )

Como esperado, os valores da composição isotópica média da biomassa aérea de todos os cortes realizados no guandu (planta C3) sempre foram estatisticamente inferiores aos valores médios anuais do sorgo e do milho (planta C4), independente do sistema de cultivo. Da mesma forma, o teor de N sempre foi maior no guandu, o que se refletiu nos valores da relação C/N (menores na leguminosa que nas gramíneas) (Tabela 5).

**Tabela 5** – Médias anuais da composição isotópica de C ( $\delta^{13}\text{C}$ ), carbono total (%), nitrogênio total (%N) e relação carbono nitrogênio (C/N) em plantas de sorgo, milho e feijão guandu em dois anos de cultivo (2020-2021 e 2021-2022) em Petrolina Pernambuco.

Sistema de cultivo/espécie	$\delta^{13}\text{C}$		%C		%N		C/N		
	Ano		Ano		Ano		Ano		
	1º	2º	1º	2º	1º	2º	1º	2º	
<b>Solteiro</b>	Milheto	-12,43aA	-12,20aA	40,87abA	41,73bA	1,78bcA	1,42bcA	25,88bcA	32,03bcA
	Guandu	-29,72cA	-29,24cA	45,66aA	46,36aA	2,73aA	2,58aA	16,95cA	1808dA
	Sorgo	-12,87abA	-12,84bA	41,85abA	42,22bA	0,96dA	0,91bcA	45,80aA	46,90aA
<b>Consortio</b>	Milheto	-12,40aA	-12,11aA	40,50cB	41,60bA	1,74bcA	1,49bA	27,08bcA	32,12bcA
	Guandu	-29,59cA	-29,02cA	45,35aB	47,11aA	2,20abA	3,12aB	22,8cA	15,26dB
	Sorgo	-15,03bA	-12,77abA	42,11bA	42,30bA	1,32cdA	0,86cB	36,25abE	50,76aA
<b>Rotação com Feijão Guandu</b>	Milheto	-	-12,20a	-	41,63b	-	1,46bc	-	30,23c
	Sorgo	-	-12,82b	-	42,06b	-	1,01bc	-	42,61a

Letras maiúsculas iguais nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras minúsculas iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Dessa forma, as médias do sinal de  $\delta^{13}\text{C}$  que se diferenciaram ficaram separadas basicamente em 2 grupos, sendo um primeiro grupo, no qual se observam médias menores, composto pelos tratamentos das gramíneas, independente do sistema de cultivo que estavam sendo submetidas, e um segundo grupo formado pelo feijão guandu em seus diferentes sistemas de cultivo, que apresentaram médias estatisticamente superiores. Esse comportamento foi observado nos dois anos de cultivo 2020-2021 (1º ano de cultivo) e 2021-2022 (2º ano de cultivo). Não foi observado diferença estatística nas médias entre os anos de cultivo para o sinal de  $\delta^{13}\text{C}$ .

O comportamento das médias do carbono total (%C) apresentaram comportamento inverso ao observado nas médias do sinal de  $\delta^{13}\text{C}$ . Nessa variável ocorreu, também, a formação de dois grupos distintos semelhantes aos grupos formados na variável supra citada, entretanto, com as médias mais elevadas, nesse caso, sendo observadas no grupo do feijão guandu, e as médias mais baixas sendo destaque no grupo das gramíneas. Vale destacar que a diferença entre as médias se tornou mais proeminentes no segundo ano de cultivo, enquanto no primeiro ano as médias do grupo de cultivo do feijão guandu foram mais elevadas, mas não se diferenciaram do milho rotacionado, milho solteiro, sorgo rotacionado e sorgo solteiro.

Com relação ao nitrogênio total (%N) observou-se médias mais elevadas no feijão guandu independente do sistema de cultivo e do ano avaliado. O destaque das médias de nitrogênio total das gramíneas fica por conta do sorgo, no qual pode ser observado as menores médias, independente do ano avaliado e da forma que foi cultivado (consorciado, rotacionado ou solteiro) (Tabela 5).

O comportamento das médias observadas na relação entre o carbono nitrogênio (C/N) é resultado do observado entre as médias das variáveis %C e %N. A relação de C/N mais elevada é um fator que infere na recalcitrância à biodegradação, com essa maior recalcitrância do material em consequência de uma maior C/N reflete em uma maior capacidade de sequestrar carbono (Wang et al., 2021). As maiores médias de relação C/N foram obtidas nos cultivos de sorgo, independente do sistema de cultivo que estava submetido, apresentando médias de 36,25 (sorgo em consorcio); 45,80 (sorgo em rotação com o feijão guandu) e 45,80 (Sorgo solteiro) no primeiro ano, e 50,76 (sorgo em rotação com o feijão guandu); 42,61 (sorgo em rotação com o feijão guandu) e 46,9 (Sorgo solteiro) no segundo ano de cultivo.

Na tabela 6 temos valores anuais do sinal isotópico de nitrogênio ( $\delta^{15}\text{N}$ ), onde pode ser observado diferença significativa entre as médias dos tratamentos dentro de cada ano. No primeiro ano as menores médias do sinal isotópico de nitrogênio foram as médias observadas nas leguminosas independente do sistema de cultivo que foi avaliada, e a maior média encontrada nas plantas referência, com média de sinal isotópico de nitrogênio de 8,38‰.

**Tabela 6** - Médias de dois anos de cultivo (2020-2021 e 2021-2022) no sinal isotópico de nitrogênio ( $\delta^{15}\text{N}$ ), em plantas de sorgo, milho e feijão guandu em diferentes sistemas de cultivo em Petrolina no estado de Pernambuco.

Sistema de cultivo/espécie		Ano	
		1	2
Solteiro	Milheto	4,57 b	6,35 b
	Guandu	0,53 c	-0,57 c
	Sorgo	5,86 b	7,65 ab
Consortiado	Milheto	5,04 b	6,12 b
	Guandu	1,42 c	-0,75 c
Consortiado	Sorgo	4,35 b	7,44 ab
	Guandu	1,11 c	-0,52 c
Rotação com Feijão	Milheto	-	5,90 b
	Guandu	Sorgo	-
Plantas referência <sup>(1)</sup>		-	8,38 a
		8,38 a	8,38 a

Letras minúsculas iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

<sup>1</sup>Girassol, *Amaranthaceae*, *Rubiaceae* e *Malvaceae*.

Foram verificadas diferenças significativas entre as médias dos diferentes cortes realizados no primeiro e segundo ano de cultivo (2020-2021 e 2021-2022) para todos tratamentos em relação ao sinal isotópico do nitrogênio ( $\delta^{15}\text{N}$ ). O valor médio da abundância natural de  $\delta^{15}\text{N}$  das plantas referência foi de 8,39‰, não havendo diferença de médias entre espécies e nem entre épocas de coleta das espécies (cortes e anos). Dessa forma, este valor médio foi utilizado para todos os cálculos de %N<sub>da</sub> (Tabela 7).

Os valores da composição isotópica obtidos no presente estudo estão de acordo com os resultados encontrados por Liu et al. (2022) estudando a abundância natural  $^{15}\text{N}$  de plantas herbáceas C3 e C4 e sua resposta a fatores climáticos ao longo de uma zona agro-pastoril do Norte da China, encontrando valores médios de  $\delta^{15}\text{N}$  das plantas C3 significativamente menores que o valor médio das Plantas C4.

**Tabela 7** - Médias dos diferentes cortes realizados em dois anos de cultivo (2020-2021 e 2021-2022) na composição isotópica de nitrogênio ( $\delta^{15}\text{N}$ ), nitrogênio total (%N) e no percentual do N derivado da atmosfera (%N<sub>dda</sub>) em plantas de sorgo, milho e feijão quando em diferentes sistemas de cultivo em Petrolina Pernambuco.

Sistema de cultivo/espécie	$\delta^{15}\text{N}$ Corte				%N Corte				%N <sub>dda</sub> Corte				
	1°	2°	3°	4°	1°	2°	3°	4°	1°	2°	3°	4°	
<b>1° ano (2020-2021)</b>													
<b>Milho</b>	4,37*aA	3,32*abA	<u>5,29</u> abA	5,23aA	1,31 bB	2,08 bcA	1,15 cdeB	2,58 aA	42,55aA	53,62bcA	32,75cdA	32,49bA	
<b>Solteiro</b>	<b>Guandu</b>	1,99*aA	0,42*bcA	-0,60*cdA	0,35*bA	2,74 aA	3,08 aA	2,39 abA	2,73 aA	67,70aA	84,35abA	95,21aA	85,05aA
	<b>Sorgo</b>	4,14*aA	<u>6,26</u> aA	<u>6,20</u> aA	<u>6,85</u> aA	1,22 bA	1,05 eA	0,67 eA	0,93 bA	44,93aA	22,56cAB	23,09dAB	16,27bB
<b>Consórcio</b>	<b>Milho</b>	4,84*aA	4,68*aA	<u>5,51</u> abA	5,12*aA	1,31 bBC	1,97 cdB	0,98 cdC	2,73 aA	37,54aA	39,18cA	30,46dA	34,60bA
	<b>Guandu</b>	3,79*aA	-0,03*cB	-1,85*dB	3,79*aA	1,50 bB	2,83 abA	2,96 aA	1,50 bB	48,65aB	89,18aA	99,44aA	98,81aA
<b>Consórcio</b>	<b>Sorgo</b>	3,60*aB	4,70*aB	2,43*bcB	<u>6,68</u> aA	1,23 bAB	1,17 deB	1,94 bcA	0,95 bB	50,60aA	39,04cAB	62,99bcA	18,04bB
	<b>Guandu</b>	4,47*aA	0,21*cB	-0,28*cdB	0,06*bB	3,08 aA	2,02 bcBC	1,52 bcC	2,63 aAB	41,45aB	86,56aA	91,72abA	88,14aA
<b>2° ano (2021-2022)</b>													
<b>Milho</b>	4,95*aC	<u>8,19</u> abA	6,91aAB	5,38*cBC	1,03 bC	2,11 bA	1,10 cdBC	1,44 dB	36,37bA	2,10bcC	15,77cBC	31,77bAB	
<b>Solteiro</b>	<b>Guandu</b>	-0,22*bA	-0,06*cA	-1,17*cA	-0,86*dA	2,45 aB	2,90 aA	2,49 aB	2,52 bAB	91,12aA	89,49aA	99,14aA	97,89aA
	<b>Sorgo</b>	<u>6,67</u> aB	<u>9,24</u> aA	<u>6,89</u> aB	<u>7,81</u> abAB	1,04 bA	0,89 cA	0,87 cdA	0,85 eA	0	0	0	0
<b>Consórcio</b>	<b>Milho</b>	<u>5,72</u> *aA	6,51*bA	5,83*abA	<u>6,45</u> abcA	0,83 bC	1,97 bA	1,28 cB	1,92 cdA	28,27bA	19,91bA	27,02bcA	20,50bcdA
	<b>Guandu</b>	-1,63*bB	0,9*cAA	-1,29*cB	-1,01*dB	2,73 aC	3,15 aAB	3,55 bA	3,08 aBC	99,06aA	79,28aB	98,43aA	98,50aA
<b>Consórcio</b>	<b>Sorgo</b>	<u>6,26</u> aC	<u>9,02</u> aA	<u>6,45</u> aBC	<u>8,03</u> abAB	0,83 bC	1,97 bA	1,28 cB	1,92 cdA	0	0	0	0
	<b>Guandu</b>	-0,52*bAB	0,58*cA	-1,21*cB	-0,94*dAB	2,49 aAB	2,76 aA	2,68 bA	2,27 bcB	94,26aA	82,64aB	99,62aA	98,68aA
<b>Rotação com Feijão</b>	<b>Milho</b>	5,57*aBC	7,78ab*A	4,4*bC	6,02*bcB	1,01 bC	1,91 bA	1,35 cBC	1,60 dAB	29,82bAB	6,54bcC	43,96bA	24,99bcB
	<b>Sorgo</b>	<u>6,01</u> *aB	<u>9,76</u> aA	<u>5,28</u> *abB	<u>8,41</u> aA	1,13 bA	1,14 cA	0,92 cdA	0,84 eA	0	0	0	0

Letras maiúsculas iguais nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras minúsculas iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. (\*) Estatisticamente diferentes do valor médio das plantas referência. Médias sublinhadas não diferem estatisticamente das médias das plantas referência.

A média dos sinais de  $\delta^{15}\text{N}$  das espécies referência foi de 8,35‰, e os sinais do guandu foram todos significativamente menores, indicando que a leguminosa obteve N da atmosfera em todos os tratamentos e foram feitos os cálculos para estimativa dos %N<sub>da</sub>. O guandu sempre fixou altas proporções (entre 68 e 99%) de nitrogênio atmosférico em todas as rebrotas. A exceção ao desempenho simbiótico da leguminosa foi no primeiro corte das plantas consorciadas com as gramíneas (entre 48,65 e 41,45%), mas apenas no primeiro ano de cultivo.

As razões pelas quais o valor de  $\delta^{15}\text{N}$  das plantas C4 sejam superiores aos das plantas C3 pode ser explicado a partir dos seguintes aspectos: Primeiramente devido o  $\delta^{15}\text{N}$  foliar ser geralmente afetado pela diferença no metabolismo fotossintético de carbono e nitrogênio entre diferentes plantas e em segundo devido às diferenças na taxa de utilização de nitrogênio fotossintético entre as plantas C3 e C4, também existem diferenças na eficiência de uso de N (LIU et al., 2022).

Nos cultivos solteiros, os sinais de  $\delta^{15}\text{N}$  do milho e do sorgo foram menores que os das plantas referência em alguns dos cortes avaliados, nos dois anos, indicando contribuição de N isotopicamente mais leve que o N do solo disponível para as demais plantas, possivelmente N atmosférico. No primeiro ano de cultivo o milho só não apresentou composição isotópica que pode ser considerada como indicativa de nutrição por meio de FBN nas plantas do terceiro corte; mas no segundo ano esse comportamento só foi observado nas plantas do primeiro corte. O sorgo só apresentou empobrecimento isotópico em relação às plantas referência no primeiro corte do primeiro ano. Entretanto, quando consorciadas com o guandu, o empobrecimento isotópico das gramíneas só não foi observado no terceiro corte do primeiro ano e no quarto corte do segundo ano para o milho; enquanto que para o sorgo não foi observado no último corte do primeiro ano e nos cortes 2, 3 e 4 do segundo ano. Nessas plantas consorciadas, não fica estabelecido se houve absorção de N da atmosfera, por fixação FBN realizada por microrganismos diazotróficos associados às gramíneas (endofíticos ou rizosféricos) ou se houve, além de FBN, transferência do N fixado no guandu consorciado.

Para Kermah et al. (2018) em estudo da contribuição de  $\text{N}_2$  atmosférico fixado biologicamente por leguminosas, a princípio esperasse que as leguminosas contribuam com  $\text{N}_2$  fixado para os sistemas de cultivo, entretanto, em estudos de balanço de N é um balanço parcial que representa apenas a diferença entre o N retirado na produção do grão e o N adicionado através de fertilizante ou  $\text{N}_2$  fixação,

mas outros insumos como deposição aérea e perdas de N por lixiviação, volatilização de amônia ou desnitrificação não são contabilizados.

Na tabela 7 pode ser observado que as médias de nitrogênio total (%N) apresentaram médias mais elevadas em sua maioria nas leguminosas nos três primeiros cortes, com exceção do cultivo de feijão guandu em consorcio com o milho no primeiro e quarto corte, e do cultivo de feijão guandu em consorcio com o sorgo no segundo e terceiro corte, onde pode ser observado médias menores que as demais medias das leguminosas dentro de cada corte no primeiro ano de cultivo, sendo que no segundo ano observou uma redução do nitrogênio total no quarto corte do cultivo solteiro do feijão guandu no terceiro corte quando cultivado em consorcio com o milho e no terceiro e quarto corte quando cultivado consorciado com o sorgo.

Um destaque positivo pode ser observado nas médias de %N do primeiro ano de cultivo e no quarto corte do cultivo de milho, independente do sistema que foi submetido, que apresentou médias estatisticamente iguais as médias da observadas no cultivo da leguminosa nesse corte. No segundo ano de cultivo esse comportamento não se manteve, observado uma predominância de maiores médias nos cultivos da leguminosa, independente do sistema que foi submetida.

A elevação na média de %N no cultivo de milho consorciado com feijão guandu pode estar atrelado ao nitrogênio fixado biologicamente por bactérias que possuam a enzima nitrogenase em seu metabolismo e que em associação com o feijão guandu possam ter fixado nitrogênio atmosférico e disponibilizado para as plantas de milho que estavam sendo cultivadas em consorcio. Vale salientar que essa hipótese pode não ser o ponto chave desse maior incremento de %N na composição do milho cultivado em consorcio, visto que esse incremento também foi observado nos cultivos milho em rotação e no cultivo solteiro do milho no mesmo corte, podendo este incremento ser atribuído a outros fatores.

No estudo de Ngwenya, Mohammed e Dakora (2024), diferenças no crescimento das plantas, no funcionamento simbiótico e produtividade de grãos foram avaliadas em seis leguminosas consorciadas com milho, obtendo resultados que revelaram diferenças significativas no crescimento das plantas, desempenho simbiótico e produtividade de grãos devido a diferenças de espécies, fenologia e características de crescimento.

As médias de %N da apresentou médias iguais entre os tratamentos no primeiro corte do primeiro ano de cultivo. A partir do segundo corte observa-se maior

percentagem de %Ndda no feijão guandu independente do sistema de cultivo que esteve submetido. Entre as gramíneas, vale salientar que o sorgo, em geral, a partir do segundo corte apresentou as médias de %Ndda mais baixas. Esses resultados corroboram com Kermah et al. (2018), onde os autores constataram que o %Ndda das leguminosas não é influenciado pelo sistema de cultivo, entretanto, no estudo de Ngwenya, Mohammed e Dakora (2024), o sistema de cultivo teve um efeito marcante sobre o %Ndda das leguminosas testadas.

O %Ndda no segundo ano apresentou comportamento similar ao observado no primeiro ano. A principal diferença observada está nas médias do primeiro corte, que já apresentaram diferença estatística, com superioridade do %Ndda dos tratamentos composto pela leguminosa. Esses dados corroboram com os resultados de Ngwenya, Mohammed e Dakora (2024) sendo as leguminosas que registraram baixos valores de  $\delta^{15}\text{N}$  exibindo altos %Ndda, e vice-versa.

Na tabela 8 pode-se verificar diferença significativa entre as médias dos diferentes cortes realizados no primeiro e segundo ano de cultivo (2020-2021 e 2021-2022) para todos tratamentos em relação a composição isotópica do carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ), carbono total (%C) e relação carbono nitrogênio (C/N).

**Tabela 8** - Médias dos diferentes cortes realizados em dois anos de cultivo (2020-2021 e 2021-2022) no sinal isotópico de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ), no carbono total (%C) e na ralação carbono nitrogênio (C/N) em plantas de sorgo, milho e feijão guandu em diferentes sistemas de cultivo em Petrolina no estado de Pernambuco.

Sistema de cultivo/espécie	$\delta^{13}\text{C}$ Corte				%C Corte				C/N Corte				
	1º	2º	3º	4º	1º	2º	3º	4º	1º	2º	3º	4º	
<b>1º ano (2020-2021)</b>													
Solteiro	Milheto	-12,46 aA	-12,62 aA	-12,31 aA	-12,32 aA	39,73 dA	41,32 bA	41,32 cdA	41,12 cA	31,34 aAB	19,98 bBC	35,97 bA	16,24 cdC
	Guandu	-29,98 bA	-29,61 bA	-29,71 cA	-29,60 bA	45,97 aA	46,42 aA	45,16 abA	45,11 aA	16,85b cA	15,08 bA	19,17 cdA	16,70 cdA
	Sorgo	-12,95 aA	-12,74 aA	-12,81 aA	-13,01 aA	42,64 bcA	42,66 bA	40,32 dB	41,79 bcAB	35,67 aB	40,86 aB	61,18 aA	45,53 aB
Consórcio	Milheto	-12,55 aA	-12,51 aA	-12,14 aA	-12,43 aA	41,05 cdA	40,73 bA	40,14 dA	40,10 cA	31,38 aAB	20,82 bBC	41,44 bA	14,68 dC
	Guandu	-29,74 bA	-30,34 bA	-28,57 cA	-29,74 bA	43,78 abB	46,67 aA	47,16 aA	43,78 abB	29,34 abA	16,63 bB	15,93 B	29,34 bcA
	Sorgo	-12,74 aA	-13,04 aA	-21,65 bB	-12,70 aA	41,42b cdB	42,45 bBC	43,87 bcA	40,74 cB	34,30 aA	37,42 aA	30,33 bcA	42,95 abA
Rotação com Feijão Guandu	Milheto	-12,74 aA	-13,04 aA	-21,65 bB	-12,70 aA	39,73 dA	41,32 bA	41,32 cdA	41,12 cA	35,67 aB	40,86 aB	61,18 aA	45,53 aB
	Sorgo	-12,95 aA	-12,74 aA	-12,81 aA	-13,01 aA	42,64 bcA	42,66 bA	40,32 dB	41,79 bcAB	35,67 aB	40,86 aB	61,18 aA	45,53 aB
<b>2º ano (2021-2022)</b>													
Solteiro	Milheto	-11,82 aA	-11,89 aA	-12,62 aB	-12,49 abB	41,95 cA	42,14 bA	41,65 bA	41,19 bA	40,75 bA	20,07 bC	37,86 bcAB	29,44 bB
	Guandu	-29,41 dB	-29,16 cAB	-29,48 bB	-28,91 eA	44,83 bB	46,56 aA	46,84 aA	47,23 aA	18,35 cA	16,27 bA	18,86 dA	18,85 bcA
	Sorgo	-12,90 bA	-12,74 bAB	-12,63 aAB	-13,12 cB	42,78 cA	41,37 bA	42,43 bA	42,33 bA	41,62 abA	47,28 aA	48,81 bA	49,89 aA
Consórcio	Milheto	-11,62 aA	-11,96 aAB	-12,57 aC	-12,30 aBC	42,03 cA	41,85 bA	41,40 bA	41,13 bA	52,05 aA	21,30 bC	33,68 cB	21,45 bcC
	Guandu	-28,67 cA	-28,94 cAB	-29,20 bB	-29,28 eB	46,74 aA	46,70 aA	48,14 aA	46,86 aA	17,13 cA	14,82 bA	13,60 dA	15,49 cA
	Sorgo	-12,62 bA	-12,89 bA	-12,67 aA	-12,94 bcA	41,95 cA	42,14 bA	41,65 bA	41,19 bA	41,72 abC	46,22 aBC	61,54 aA	53,56 aAB
Rotação com Feijão Guandu	Guandu	-28,85 cB	-29,19 cBC	-29,26 bC	-28,27 dA	47,40 aA	47,10 aA	47,20 aA	47,25 aA	19,21 cA	17,12 bA	17,67 dA	20,89 bcA
	Milheto	-11,79 aA	-12,05 aA	-12,50 aB	-12,49 abB	41,22 cA	41,89 bA	42,08 bA	41,34 bA	41,56 abA	21,96 bB	31,10 cB	26,32 bcB
	Sorgo	-12,75 bA	-12,76 bAB	-12,62 aA	-13,15 cB	42,65 cA	41,83 bA	42,55 bA	41,22 bA	38,16 bB	37,04 aB	46,18 bAB	49,10 aA

Letras maiúsculas iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras minúsculas iguais nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para a composição isotópica do carbono 13 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) as médias em cada corte apresentaram comportamento idêntico as médias gerais por anos. Sendo em todos os cortes possível verificar que as maiores médias de  $\delta^{13}\text{C}$  são observadas nos cultivos das gramíneas independente da forma que foram cultivadas. As médias dos tratamentos entre os cortes não apresentaram diferença estatística, com exceção do cultivo de feijão guandu em consorcio com o sorgo, que apresentou uma maior média de  $\delta^{13}\text{C}$  no terceiro corte realizado no primeiro ano de cultivo e do cultivo de milho rotacionado que apresentou médias mais baixa no terceiro corte no primeiro ano de cultivo.

A média da composição isotópica do carbono 13 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) no segundo ano de cultivo apresentou comportamento similar ao observado nas médias do primeiro ano de cultivo (2020-2021). As médias mais baixas, em cada corte, encontram-se nos tratamentos que a leguminosa está inserida, desde seu cultivo solteiro, e seu cultivo em consorcio com as gramíneas.

O  $\delta^{13}\text{C}$  na planta também pode ser afetada por diferentes vias fotossintéticas, onde plantas com vias fotossintéticas C3 comumente tem valores relativamente mais baixos de  $\delta^{13}\text{C}$  em comparação as plantas que apresentam via fotossintética C4 (DONG et al., 2018; LI et al. 2021)

As médias de carbono total (%C) por corte apresentaram maiores valores nos tratamentos das leguminosas, esse comportamento foi observado em todos os 4 cortes realizados no primeiro ano de cultivo. Com relação a comparação entre os cortes destaca-se o quarto corte para o cultivo de feijão guandu consorciado com sorgo, onde ocorreu um acréscimo na sua média, saindo de 43,66; 45,83 e 44,07 do primeiro, segundo e terceiro corte, respectivamente, para uma média de 46,25 no quarto corte. Além do cultivo de feijão guandu em consorcio com sorgo, podemos destacar a redução observada nos dois últimos cortes nos cultivos de sorgo rotacionado e solteiro, onde observou-se uma redução de 2% aproximadamente, entre os dois primeiros cortes e os dois últimos cortes do ano 2020-2021.

O carbono total (%) no segundo ano de cultivo (2021-2022), apresentou maior homogeneidade das médias entre os grupos dos tratamentos que foram compostos pela leguminosa, sendo estes tratamentos que apresentaram as maiores médias de %C, em todos os cortes, com exceção do cultivo de feijão guandu solteiro no primeiro corte que apresentou uma média menor que a observada no cultivo do mesmo em consorcio com o sorgo e o milho.

Os demais tratamentos compostos por gramíneas, independente da forma de cultivo, apresentaram médias estatisticamente iguais, com exceção do primeiro corte que apresentou maior variação das médias e classes criadas pelo teste de comparação múltipla aplicado. Com relação a comparação entre os cortes não houve diferença em nenhum dos tratamentos.

A relação entre o carbono e nitrogênio (C/N) apresentou variações em suas médias, sendo essas variações atribuídas, possivelmente, aos diferentes comportamentos entre reduções e aumentos das médias de %C e %N, visto que a relação C/N é um produto desses dois componentes. Nesse caso podemos destacar médias mais elevadas de C/N nas gramíneas, independente do sistema de cultivo que foram submetidas, com destaque para a redução dessa relação nos três últimos cortes dos cultivos de milho independente do sistema de cultivo (2020-2021). Essas diferenças na relação C/N da parte aérea podem implicar em variação na decomposição da biomassa vegetal quando é incorporada ao solo (LENGWATI, MATHEWS; DAKORA, 2020)

No segundo ano de cultivo (2021-2022) a relação carbono nitrogênio (C/N) destaca-se as maiores médias observadas nos tratamentos em cada corte com a gramínea em específico o sorgo, independente do sistema de cultivo que estava submetida. O cultivo de feijão guandu em todos os seus sistemas de cultivo nos 4 cortes apresentaram médias inferiores as médias das gramíneas, esse fato está relacionado aos maiores valores de nitrogênio total %N que compõem esses tratamentos que resulta na redução da relação C/N, mesmo esses tratamentos em geral apresentando médias de %C total superiores as médias de %C total dos tratamentos compostos por gramíneas.

### **3.3.2 Biomassa**

Na tabela 9 temos as médias de produção de biomassa, nitrogênio acumulado e nitrogênio fixado biologicamente durante os dois anos cultivo de sorgo milho e feijão guandu em diferentes sistemas de produção. A massa desses componentes foi determinada a partir do peso de cada fração, em função de seu respectivo teor de matéria seca (MS), multiplicado pelo número de plantas e estimado a produção por hectares.

A biomassa produzida no primeiro ano não apresentou diferença entre as espécies cultivadas independente do sistema de cultivo que estava submetida, da mesma forma não foi observado diferença nas médias da produção de biomassa entre os cortes realizados. Esse mesmo comportamento também foi identificado no segundo ano de cultivo.

Para o nitrogênio acumulado as maiores médias foram encontradas no cultivo do feijão guandu solteiro, em todos os 4 cortes realizados no primeiro ano. Vale destacar que o cultivo do milho em rotação ou em consórcio com o guandu sempre apresentou médias mais elevadas em comparação com o seu cultivo solteiro, independente do corte realizado no primeiro ano de cultivo. Para o cultivo do sorgo esse comportamento das médias não foi verificado, apresentando volatilidade no comportamento das médias. No segundo ano de cultivo as médias de nitrogênio acumulado foram estatisticamente iguais.

As maiores médias de nitrogênio fixado biologicamente foram observadas no cultivo de feijão guandu solteiro em todos os cortes do primeiro ano de cultivo, sendo a maior média entre os corte encontrada no terceiro corte apresentando média de 271.16 kg ha<sup>-1</sup>. No segundo ano de cultivo as médias de nitrogênio fixado biologicamente não apresentaram diferença estatística entre os tratamentos e também entre os cortes.

Ngwenya, Mohammed e Dakora (2024) em estudo do Monocultivo e consórcio de milho com seis leguminosas, encontraram que a biomassa da parte aérea, quantidade de N fixado e a absorção de N no solo foram significativamente maiores no monocultivo em relação ao consórcio. Entretanto, os mesmos autores relataram que a porcentagem de N derivada da fixação foi, muito maior no cultivo misto em relação ao monocultivo, enquanto os teores de N na parte aérea e a produtividade de grãos foram semelhantes para as culturas de solteiras e consorciadas.

**Tabela 9-** Médias dos diferentes cortes realizados em dois anos de cultivo (2020-2021 e 2021-2022) na produção de biomassa, nitrogênio acumulado e nitrogênio fixado biologicamente, em plantas de sorgo, milho e feijão guandu em diferentes sistemas de cultivo em Petrolina no estado de Pernambuco.

Sistema de cultivo/espécie	Biomassa (kg ha <sup>-1</sup> )									
	Ano I					Ano II				
	1	2	3	4	Total	1	2	3	4	Total
Guandu solteiro	11480,31aA	10083,95A	11924,18aA	11207,02aA	44695,48	10355,57 aA	12226,37 aA	11450,79 aA	11048,16 aA	45080,90
Sorgo solteiro	12782,35aA	10319,07aA	12217,46aA	10965,03aA	46283,93	12636,07 aA	14078,24 aA	12684,21 aA	13045,74 aA	52444,28
Milheto solteiro	4957,13aA	6877,07aA	5859,33aA	5223,79aA	22917,34	6053,96 aA	6205,10 aA	6545,31 aA	5830,65 aA	24635,04
Milheto e guandu consorciados	7381,45aA	7696,65aA	7352,81aA	6741,79aA	29172,73	9286,64 aA	8531,25 aA	8388,28 aA	8909,04 aA	35115,24
Sorgo e guandu consorciados	10553,95aA	10822,29aA	10026,25aA	10193,66aA	41596,17	10235,24 aA	11450,58 aA	12004,24 aA	12421,30 aA	46111,39
Milheto em rotação com guandu	12412,02aA	10843,19aA	11868,79aA	10896,31aA	46020,32	5431,10 aA	6442,57 aA	5694,20 aA	5779,34 aA	23347,23
Sorgo em rotação com guandu	10646,48aA	10344,33aA	14121,25aA	10412,72aA	45524,80	10876,81 aA	10956,60 aA	10516,98 aA	12390,45 aA	44740,86
	N Acumulado (kg ha <sup>-1</sup> )									
Guandu solteiro	314,78aA	310,77aA	284,80aA	305,79aA	1216,17	253,71 aA	35456 aA	285,12 aA	278,41 aA	1171,81
Sorgo solteiro	155,67bcdA	107,84cA	81,43bcA	101,93bA	446,90	131,41 aA	125,29 aA	110,35 aA	110,88 aA	477,95
Milheto solteiro	65,09dB	143,06bcA	67,56cB	134,79bA	410,52	62,35 aA	130,92 aA	71,99 aA	83,96 aA	349,24
Milheto e guandu consorciados	103,80cdA	184,79bcA	144,92bcA	142,82bA	576,35	165,30 aA	218,40 aA	202,57 aA	222,72 aA	809,01
Sorgo e guandu consorciados	227,05abA	173,07bcA	173,93bA	182,75bA	756,82	169,90 aA	270,80 aA	237,68 aA	260,22 aA	938,62
Milheto em rotação com guandu	162,98bcBC	225,57abAB	136,86bcC	281,17aA	806,60	54,85 aA	123,05 aA	76,87 aA	92,46 aA	347,25
Sorgo em rotação com guandu	129,66cdA	108,11cA	94,12bcA	96,80bA	428,71	122,90 aA	124,90 aA	96,75 aA	104,07 aA	448,65
	N Fixado (kg ha <sup>-1</sup> )									
Guandu solteiro	213,11aB	262,14aAB	271,16aA	260,07aAB	1006,50	231,18 aA	317,30 aA	282,67 aA	272,53 aA	1103,69
Sorgo solteiro	69,94bcA	24,33cA	18,80cA	16,58cA	129,67	23,83 aA	-11,30 aA	17,44 aA	6,73 aA	36,71
Milheto solteiro	27,69cA	76,71bcA	22,12cA	43,79bcA	170,33	22,67 aA	2,74 aA	11,35 aA	26,67 aA	63,46
Milheto e guandu consorciados	44,73bcB	118,60bA	94,12AbB	95,27bAB	352,74	105,23 aA	108,31 aA	127,06 aA	132,52 aA	473,14
Sorgo e guandu consorciados	104,50bA	108,69bA	134,54bA	97,02bA	444,77	99,19 aA	102,85 aA	142,66 aA	133,31 aA	478,03
Milheto em rotação com guandu	69,34bcA	95,98bA	73,38bcA	92,08bA	330,80	16,35 aA	8,04 aA	33,79 aA	23,10 aA	81,31
Sorgo em rotação com guandu	58,25bcA	24,39cA	21,73cA	15,74cA	120,13	30,89 aA	-18,14 aA	31,84 aA	-0,228 aA	44,36

Letras maiúsculas iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras minúsculas iguais nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

### 3.3.3 Sinal isotópico no solo ( $\delta^{15}\text{N}$ , $\delta^{13}\text{C}$ )

O sinal isotópico de  $\delta^{15}\text{N}$  no solo apresentou médias iguais nos tratamentos entre os dois anos de cultivo, com exceção do feijão guandu cultivado em consórcio com o milho, que apresentou uma redução da média do primeiro ano para o segundo ano de cultivo, com média de 13,468‰ no primeiro ano para 12,322‰ no segundo ano (Tabela 10). No primeiro ano de cultivo as maiores médias dos tratamentos foram encontradas no feijão guandu cultivado em sistema solteiro com média de 13,147‰, feijão guandu cultivado em consórcio com milho com média de 13,468‰, milho cultivado em consórcio com o feijão guandu com média de 13,046‰ e o feijão guandu cultivado em consórcio com sorgo com média de 12,713‰. No segundo ano de cultivo a maior média observada foi encontrada no cultivo de feijão guandu cultivado em sistema solteiro com média de 13,625‰. Para Santos et al. (2022) esse comportamento pode sugerir que as áreas que contêm diferentes composições vegetais, podem modificar a predominância e a força das vias de entrada de N, especialmente aquelas de fixação biológica.

Em relação ao sinal isotópico de carbono  $\delta^{13}\text{C}$  não foi observada diferença estatística entre as médias dos tratamentos no primeiro ano de cultivo, sendo as médias de  $\delta^{13}\text{C}$  apresentando a maior média de -22,012‰ e a menor média de -23,122‰. Pereira et al. (2022) em estudo da composição de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{15}\text{N}$  em florestas urbanas subtropicais observaram valores médios de  $\delta^{13}\text{C}$  que variaram nos solos das quatro florestas urbanas em estudo, sendo o local com a média mais negativa do isótopo apresentando valor de (-27,10‰). Sendo essa média superior a menor média de C encontrada nesse estudo (-23,122‰) no cultivo milho solteiro.

No segundo ano de cultivo a menor média de  $\delta^{13}\text{C}$  foi observada no cultivo de milho em rotação com o feijão guandu alcançando média de -23,197‰. Entre os anos de cultivo apenas o tratamento milho solteiro apresentou médias diferentes estatisticamente ocorrendo uma elevação da média de  $\delta^{13}\text{C}$ , saindo de -23,122‰ no primeiro ano de cultivo para -21,465‰ no segundo ano. Rosset et al. (2022) encontraram diferenças significativas nos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  apenas na camada de 0–30 cm.

Wu et al. (2022) em pesquisa realizada no intuito de verificar a influência climática sobre as composições estáveis de isótopos de carbono e nitrogênio de campos temperados no norte da China, encontraram diferença significativa na mesma camada entre os diferentes ecossistemas, no entanto, não houve diferença

significativa quanto ao  $\delta^{13}\text{C}$  do solo entre as várias camadas (profundidades). Os mesmos autores sugerem ainda, que em ecossistemas naturais, os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  no solo são geralmente determinados pela assinatura de  $\delta^{13}\text{C}$  da serapilheira, o que é ainda apoiado pela relação positiva entre o nível de  $\delta^{13}\text{C}$  no solo e na comunidade vegetal, a variação do  $\delta^{13}\text{C}$  na vegetação e solo foram amplamente explicada pela composição da comunidade vegetal acima do solo, sugerindo que mudanças na composição da comunidade vegetal são importantes para a ciclagem de C do ecossistema entre diferentes campos no local de estudo. Mesmo o ecossistema do presente estudo não sendo natural, a composição da vegetação (nesse caso a espécie) foi suficiente para causar alterações no  $\delta^{13}\text{C}$ .

No carbono no solo (%C) não foi observada nenhuma diferença estatística independente do ano avaliado e dos tratamentos avaliados em cada ano. Esse mesmo comportamento também foi observado para a variável nitrogênio total no solo (%N) não sendo observado diferença estatística entre as médias dos tratamentos. A média do carbono no primeiro ano variou de 0,277% no cultivo de feijão guandu solteiro a 0,1824% no cultivo milho consorciado com feijão guandu, no segundo ano as médias variaram de 0,361% no cultivo de sorgo em rotação com feijão guandu a 0,217% milho consorciado com o feijão guandu. O nitrogênio total a variação das médias 0,026% a 0,018%, no cultivo de feijão guandu solteiro e no cultivo de milho em consórcio com feijão guandu respectivamente, para o primeiro ano de cultivo. No segundo ano de cultivo as médias de nitrogênio total no solo variaram entre os valores de 0,034% no cultivo de sorgo solteiro, a 0,020% no cultivo de milho em consórcio com o feijão guandu.

Rosset et al (2022) encontraram diferenças no carbono total apenas para a floresta nativa, com maior valor, e os sistemas de cultivo apresentaram médias iguais, no estudo da matéria orgânica em diferentes sistemas de manejo no Paraná. Resultados similares também foram observados por Medeiros, Soares e Maia (2022) em estudo do estoque de carbono no solo sob sistemas convencionais no semiárido brasileiro verificaram maior estoque de carbono em áreas de vegetação nativa em comparação com sistemas de produção agrícolas convencionais. Vale destacar que o solo do estudo é um solo com teor de argila elevado, o que não se enquadra no presente estudo. Nesse estudo o baixo teor de argila pode ter resultado em menor proteção física da matéria orgânica pelos agregados do solo (DUVAL et al., 2018),

tornando a matéria orgânica mais acessível a ação de microrganismos e facilitando sua decomposição (OLIVEIRA et al., 2016).

A relação entre carbono e nitrogênio no solo apresentou efeito significativo entre os tratamentos e entre os anos de cultivo (Tabela 10). No primeiro ano de cultivo a maior média da relação carbono nitrogênio no solo foi observada no cultivo de milho solteiro, com média de 11,548. A menor média da relação C/N foi verificada no solo cultivado com milho em consórcio com feijão guandu apresentando média de 9,7935. No segundo ano de cultivo a relação C/N no solo teve suas maiores médias observadas no solo cultivado com feijão guandu solteiro e no solo cultivado com sorgo rotacionado com feijão guandu, com médias de 11,581 e 11,735, respectivamente. A menor média da relação C/N no segundo ano foi encontrada no solo cultivado com sorgo solteiro com média de 9,731.

Há relatos de que se a relação C/N do solo for muito alta, a decomposição e mineralização microbiana é lenta, e o nitrogênio disponível no solo é mais consumido, reduzindo assim o nitrogênio disponível no solo que pode ser absorvido pelas plantas, e causando baixa no enriquecimento de  $^{15}\text{N}$  no solo (OLIVEIRA et al., 2019).

**Tabela 10** - Composição isotópica de N e C (‰), Nitrogênio total (%), Carbono total (%) e relação C/N no solo cultivado com sorgo, milho e feijão guandu em diferentes sistemas de cultivo em Petrolina no estado de Pernambuco.

Sistema de cultivo/espécie	$\delta^{15}\text{N}$		$\delta^{13}\text{C}$		%C		%N		C/N		
	1º Ano	2º Ano	1º Ano	2º Ano	1º Ano	2º Ano	1º Ano	2º Ano	1º Ano	2º Ano	
<b>Solteiro</b>	Milheto	12,319 cA	12,808 abA	-23,122 aB	-21,465 cA	0,259 aA	0,244 aA	0,022 aA	0,022 aA	11,548 aA	10,599 abA
	Guandu	13,147 abcA	13,625 aA	-22,858 aA	-23,135 abA	0,277 aA	0,360 aA	0,026 aA	0,030 aA	10,482 abB	11,581 aA
	Sorgo	12,420 bcA	12,666 abA	-22,265 aA	-22,142 abcA	0,259 aA	0,336 aA	0,022 aA	0,034 aA	11,424 abA	9,731 bB
<b>Consorcio</b>	Milheto	13,046 abcA	13,055 abA	-22,012 aA	-21,820 bcA	0,182 aA	0,217 aA	0,018 aA	0,020 aA	9,793 bA	10,494 abA
	Guandu	13,468 abA	12,322 bB	-22,371 aA	-22,657 abcA	0,210 aA	0,247 aA	0,020 aA	0,023 aA	10,085 abA	10,418 abA
<b>Consorcio</b>	Sorgo	12,522 bcA	12,974 abA	-22,194 aA	-21,971 abcA	0,229 aA	0,261 aA	0,021 aA	0,024 aA	10,668 abA	10,714 abA
	Guandu	12,713 abcA	12,483 bA	-22,921 aA	-22,996 abA	0,212 aA	0,2944aA	0,019 aA	0,027 aA	10,929 abA	10,669 abA
<b>Rotação com Feijão Guandu</b>	Milheto	-	13,065 ab	-	-23,197 a	-	0,309 a	-	0,028 a	-	10,698 ab
	Sorgo	-	12,565 ab	-	-22,005 abc	-	0,361 a	-	0,030 a	-	11,735 a
<b>Cv (%)</b>	5,47		3,81		26,9		23,6		9,83		

Letras maiúsculas iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras minúsculas iguais nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

### **3.4 Conclusão**

A biomassa produzida não foi afetada pelos sistemas de cultivo em nenhum dos anos avaliados.

Os sistemas de cultivos feijão guandu solteiro apresentaram aporte de nitrogênio total mais elevados no primeiro ano de cultivo. No segundo ano o aporte foi igual para todos os sistemas de cultivo e espécies estudadas.

O %N<sub>da</sub> foi mais elevada na cultura do feijão guandu em todos os sistemas de cultivo a que foi submetida.

A cultura do sorgo e do milheto apresentaram maiores relação de C/N nos dois anos de cultivos independente do sistema de cultivo que foram submetidas.

## Referências Bibliográficas

DENK, T. R.; MOHN, J.; DECOCK, C.; LEWICKA-SZCZEBAK, D.; HARRIS, E.; BUTTERBACH-BAHL, K.; WOLF, B. The nitrogen cycle: A review of isotope effects and isotope modeling approaches. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 105, p. 121-137, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.11.015>

DONG, S.; LI, Y.; ZHAO, Z.; LI, Y.; LIU, S.; ZHOU, H.; DONG, Q.; LI, S.; GAO, X.; SHEN, H.; XU, Y.; HAN, Y.; ZHANG, J.; YANG, M. Land Degradation Enriches Soil  $\delta^{13}\text{C}$  in Alpine Steppe and Soil  $\delta^{15}\text{N}$  in Alpine Desert by Changing Plant and Soil Features on Qinghai-Tibetan Plateau. **Soil Science Society of America Journal**, v. 82, p. 960–968, 2018. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.01.0017>

DUVAL, M. E.; GALANTINI, J. A.; MARTÍNEZ, J. M.; LIMBOZZI, F. Labile soil organic carbon for assessing soil quality: influence of management practices and edaphic conditions. **Catena**, 171, 316-326, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.07.023>

GATHUMBI, S.; CADISCH, G.; GILLER, K.E.  $^{15}\text{N}$  natural abundance as a tool for assessing  $\text{N}_2$ -fixation of herbaceous, shrub and tree legumes in improved fallows. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 34, p. 1059–1071, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00038-X](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00038-X)

LAI, X.; ZHU, Q.; CASTELLANO, M. J.; ZAN, Q.; LIAO, K. Relationship between soil  $^{15}\text{N}$  natural abundance and soil water content at global scale: Patterns and implications. **Catena**, v. 222, 106879, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106879>

LENGWATI, D. M.; MATHEWS, C.; DAKORA, F.D. Rotation Benefits From  $\text{N}_2$ -Fixing Grain Legumes to Cereals: From Increases in Seed Yield and Quality to Greater Household Cash-Income by a Following Maize Crop. **Front Sustain Food Syst**, v. 4, p. 1–16, 2020. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00094>

LI, C.; PENG, F.; LAI, C.; XUE, X.; YOU, Q.; CHEN, X.; LIAO, J.; MA, S.; WANG, T. Plant community changes determine the vegetation and soil  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  enrichment in degraded alpine grassland. **Land Degradation & Development**, v. 32, p. 2371–2382, 2021. <https://doi.org/10.1002/ldr.3912>

LIU, X.; LI, Y.; ZHANG, Y.; SU, Q.; FENG, T.; SONG, Y.  $^{15}\text{N}$  Natural Abundance of  $\text{C}_3$  and  $\text{C}_4$  Herbaceous Plants and Its Response to Climatic Factors along an Agro-Pastoral Zone of Northern China. **Plants**, 11, 3526, 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11243526>

KERMAH, M.; FRANKE, A. C.; ADJEI-NSIAH, S.; AHIABOR, B. D. K.; ABAIDOO, R. C.; GILLER, K. E.  $\text{N}_2$ -fixation and N contribution by grain legumes under different soil fertility status and cropping systems in the Guinea savanna of northern Ghana. **Agriculture, ecosystems & environment**, 261, 201-210, 2018. <https://doi.org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.agee.2017.08.028>

MEDEIROS, A. D. S.; SOARES, A. A. S.; MAIA, S.; FERREIRA, M. SOIL CARBON STOCKS AND COMPARTMENTS OF ORGANIC MATTER UNDER CONVENTIONAL SYSTEMS IN BRAZILIAN SEMI-ARID REGION. **Revista Caatinga**, 35, 697-710, 2022. <https://doi.org/10.1590/1983-21252022v35n321rc>

NGWENYA, Z. D.; MOHAMMED, M.; DAKORA, F. D. Monocropping and Intercropping of Maize with Six Food Legumes at Malkerns in Eswatini: Their Effects on Plant Growth, Grain Yield and N<sub>2</sub> Fixation, Measured using the <sup>15</sup>N Natural Abundance and Ureide Techniques. **Symbiosis**, 1-13, 2024. <https://doi.org/10.1007/s13199-024-00971-x>

OLIVEIRA, S. P.; CÂNDIDO, M. J. D.; WEBER, O. B.; XAVIER, F. A. S.; ESCOBAR, M. E. O.; OLIVEIRA, T. S. Conversion of forest into irrigated pasture I. Changes in the chemical and biological properties of the soil. **Catena**, 137, 508-516, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.017>

PEREIRA, M. A. G.; DOMINGOS, M.; SILVA, E. A.; ARAGAKI, S.; RAMON, M.; CAMARGO, P. B.; FERREIRA, M. L. Isotopic composition ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$ ) in the soil-plant system of subtropical urban forests. **Science of The Total Environment**, 851, 158052, 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158052>

PHIRI, A. T. e NJIRA, K. O. W. Grain Legume-Based Cropping Systems' Effects on Soil Organic Carbon and Nutrient Dynamics. **Agricultural Research**, 12(1), 45-52, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40003-022-00619-6>

ROSSET, J. S.; CARMO LANA, M.; SCHIAVO, J. A.; CÁSSIA PICCOLO, M., DA SILVA RODRIGUES PINTO, L. A.; ZIVIANI, M. M.; PEREIRA, M. G. Organic matter and isotopic composition of soils under different management systems in western Paraná State, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, 81(4), 136, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10261-8>

SANTOS, F. L.S.; VASCONCELOS, V.; JESUS, K., COUTO JUNIOR, A. F.; NEVES, G., SOUZA, J. P. S.; NARDOTO, G. B. Climatic control effect on the soil nitrogen isotopic composition in Alisols across the physiographic regions of Pernambuco State, Northeast Brazil. **Geoderma**, V. 30, e00565, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00565>

SHAN, Y.; HUANG, M.; SUO, L.; ZHAO, X.; WU, L. Composition and variation of soil  $\delta^{15}\text{N}$  stable isotope in natural ecosystems. **Catena**, 183, 104236, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104236>

WALDMAN, K. B.; ORTEGA ,D. L.; RICHARDSON, R. B.; CLAY, D. C.; SNAPP, S. Preferences for legume attributes in maize-legume cropping systems in Malawi. **Food security**, 8(6):1087–1099, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12571-016-0616-4>

WANG, C.; AMON, B.; SCHULZ, K.; MEHDI, B. Factors that influence nitrous oxide emissions from agricultura l soils as well as their representation in simulation models: a review. **Agronomy**, 11(4), 770, 2021. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040770>

WU, Y.; ZHANG, X.; SONG, Z.; YU, C.; LIU, M.; WANG, Y.; WANG, X. Climatic controls on stable carbon and nitrogen isotope compositions of temperate grasslands in northern China. **Plant and Soil**, 491(1), 133-144, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05712-x>

YANG, Z.; CHEN, X.; HOU, J.; LIU, H.; TAN, W. Soil texture and pH exhibit important effects on biological nitrogen fixation in paddy soil. **Applied Soil Ecology**, 178, 104571, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104571>

## **EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA A PARTIR DO SOLO NO CULTIVO SOLTEIRO E CONSORCIADO DE GRAMÍNEAS E LEGUMINOSAS NA REGIÃO DO SERTÃO PERNAMBUCANO**

### **Resumo**

A quantidade de gases com efeito estufa (GEEs) emitidos por diversas atividades antrópicas aumenta à medida que a população cresce. A maioria desses gases é produzida através dos processos de metanogênese, nitrificação e desnitrificação. Manejos conservacionistas e gestão de água são tecnologias de mitigação de emissões de gases relacionadas às atividades agropecuárias, sendo importante estimar suas magnitudes e viabilidade econômica como parte de processos de desenvolvimento de métodos de sucesso. Desta maneira, com a execução deste experimento objetivou-se estimar as emissões de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>) provenientes do solo em sistemas de cultivo solteiros, consorciados e rotacionados de gramíneas e leguminosa na região do Sertão pernambucano. O estudo foi desenvolvido no campo experimental do Campus de Ciências Agrárias (CCA), pertencente à Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Petrolina - PE, altitude 392 metros, entre fevereiro de 2022 e novembro de 2022, a direção do plantio foi Leste-Oeste. Utilizou-se o sorgo – BRS Ponta Negra, milho - BRS 1501 e o feijão guandu – BRS Mandarim, sendo organizados em sete diferentes sistemas de cultivo: Cultivo de feijão guandu (G), cultivo de feijão guandu consorciado com milho (GM), cultivo de feijão guandu consorciado com sorgo (GS), cultivo de milho (M), cultivo de milho consorciado com feijão guandu (MG), cultivo de milho rotacionado com feijão guandu (MR), cultivo de sorgo (S), cultivo de sorgo consorciado com feijão guandu (SG) e cultivo de sorgo rotacionado com feijão guandu (SR), com quatro repetições. Foram realizadas 25 coletas de amostras de gases emitidos do solo, durante os meses de fevereiro de 2022 a novembro de 2022, utilizando-se câmaras estáticas. As câmaras eram constituídas por duas partes: uma base (dimensões: 60 cm de comprimento por 40 cm de largura) e uma tampa, ambas de aço galvanizado. As tampas são revestidas com manta térmica aluminizada e encaixada sobre a base apenas no momento das coletas. Foram coletadas amostras dos gases emitidos pelo solo em três intervalos de tempo: no momento do fechamento da câmara (tempo zero), aos 10 minutos, aos 20 minutos e aos 40 minutos após o fechamento da câmara. Os fluxos de CO<sub>2</sub> foram predominantemente positivos, sendo a menor média observada no cultivo de sorgo solteiro (S) com média de emissão total acumulada ao fim do período de avaliação de 157,73 mg C m<sup>-2</sup>. Já as maiores médias de emissão de CO<sub>2</sub> acumulada foram obtidas nos cultivos de feijão guandu (G) e no cultivo de milho consorciado com feijão guandu (MG) com média de 302,36 mg C m<sup>-2</sup> e 307,91 mg C m<sup>-2</sup> respectivamente.

Palavras-chaves: Aquecimento global. Semiárido. Cultivo forrageiro.

## **EMISSION OF GREENHOUSE GASES FROM THE SOIL IN THE SINGLE AND INTERCROPPED CULTIVATION OF GRASSES AND LEGUMES IN THE REGION OF THE SERTÃO OF PERNAMBUCO**

### **Abstract**

The amount of greenhouse gases (GHGs) emitted by various activities, including organic and inorganic additives, increases as the population grows. Most of these gases are produced through the processes of methanogenesis, nitrification, and denitrification. Quantifying the potential for global warming, in the face of combinations of mitigation technologies (such as conservation management, water management, cultivation systems, nutrient management, bioenergy, manure management, etc.) and estimating the economic viability of these measures are part of the process of developing additional successful methods. In this way, the objective of this experiment was to evaluate the emissions of nitrous oxide (N<sub>2</sub>O), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), and methane (CH<sub>4</sub>) from the soil in the single and intercropped cultivation of grasses and legumes in the region of the Pernambuco backcountry. The study was conducted in the experimental field of the Campus of Agricultural Sciences (CCA), belonging to the Federal University of Vale do São Francisco (UNIVASF), Petrolina - PE, altitude 392 meters, between February 2022 and November 2022, the planting direction was East-West. Sorghum - BRS Ponta Negra, millet - BRS 1501, and pigeon pea - BRS Mandarin were used, organized into seven different cropping systems: Pigeon pea cultivation (G), pigeon pea cultivation intercropped with millet (GM), pigeon pea cultivation intercropped with sorghum (GS), millet cultivation (M), millet cultivation intercropped with pigeon pea (MG), millet cultivation rotated with pigeon pea (MR), sorghum cultivation (S), sorghum cultivation intercropped with pigeon pea (SG), and sorghum cultivation rotated with pigeon pea (SR), with four replications. Twenty-five collections were made from February 2022 to November 2022. The collections of gases emitted by the soil were made using static chambers. The chambers consisted of two parts: a galvanized steel base in a rectangular shape (dimensions: 60 cm in length and 40 cm in width) and a galvanized steel lid, also in a rectangular shape, covered with aluminized thermal blanket and fitted onto the base only at the time of collection. Each chamber had at its upper end a hole for collecting gas samples and another for attaching a digital thermometer. At the time of collecting the GHG samples emitted by the soil, the lid was fitted onto the base and supported on a groove located on the outer edge of the base. After each chamber was closed, samples of gases emitted by the soil were collected at three time intervals: at the time of chamber closure (zero time), at 10 minutes, at 20 minutes, and at 40 minutes after chamber closure. CO<sub>2</sub> fluxes were predominantly positive, with the lowest average observed in the single sorghum (S) cultivation with an average cumulative emission of 157.73 mg C m<sup>-2</sup> at the end of the evaluation period. The highest average cumulative CO<sub>2</sub> emissions were obtained in the pigeon pea (G) and millet intercropped with pigeon pea (MG) cultivations, with an average of 302.36 mg C m<sup>-2</sup> and 307.91 mg C m<sup>-2</sup> respectively.

Keywords: Global warming. Semiarid. Cultivo de forragem.

## 4.1 Introdução

As mudanças climáticas, resultantes das crescentes concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, constituem um grande desafio global no século XXI, aumentando as preocupações, tanto em países desenvolvidos quanto em desenvolvimento, sobre os impactos ambientais das emissões. A distribuição das emissões globais per capita tem implicações em termos de imparcialidade e é fortemente debatida (BELLOC; MOLINA, 2023).

De acordo com observações de longo prazo, na comparação de 2011-2020 com 1850-1900, a temperatura média global aumentou 1,09 °C, acompanhada por um aumento atmosférico das emissões de gases de efeito estufa (GEE) (OLIVEIRA et al., 2023).

Impulsionada pelo crescimento populacional e pela crescente demanda por produtos de origem animal, a produtividade global das culturas precisa ser aumentada em terras aráveis, estimando-se um aumento de 25% a 70% na demanda de alimentos até 2050 (HUNTER et al., 2017). Entretanto, são as lavouras responsáveis pela emissão de cerca 43% e 25% das emissões totais globais de metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nítrico (N<sub>2</sub>O), respectivamente, nas últimas décadas (CRIPPA et al., 2020). Assim, é importante compreender os impactos das emissões de GEE do sistema agrícola para a mitigação sua emissão global e para o desenvolvimento sustentável da agricultura (GAO et al., 2023; WANG et al., 2022).

Embora CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O sejam emitidos em quantidades inferiores ao CO<sub>2</sub>, seu potencial de aquecimento global é 21 e 310 vezes maior, respectivamente (THANGARAJAN et al., 2013). Além do maior potencial de aquecimento global o óxido nítrico apresenta uma alta vida útil na atmosfera (114 anos) e o metano uma vida útil de 100 anos na atmosfera (IPCC, 2021).

O relatório divulgado no final de fevereiro de 2022 do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas, observa que, mesmo que o aquecimento climático se limite aos 1,5 °C, as implicações, provavelmente, serão assustadoras, uma vez que os sistemas ambientais provavelmente continuarão vulneráveis e isso refletirá em eventos extremos como por exemplo, secas persistentes, inundações, entre outros (PAINEL INTERGOVERNAMENTAL PARA AS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS, 2022).

A intensificação agrícola sob práticas de cultivo em manejo convencional, por exemplo, preparo intensivo do solo e excesso de fertilizantes sintéticos com adubação

nitrogenada, criam uma cadeia de problemas ambientais, gerando impacto na decomposição de carbono orgânico do solo e as emissões de  $N_2O$  e  $CH_4$ .

Com relação as emissões de  $N_2O$ , do ponto de vista dos sistemas de gestão e das práticas agrícolas, as informações na literatura divergem; alguns estudos relatam diminuição e outros aumento de emissões do  $N_2O$  (BADAGLIACCA et al., 2018). Todos esses fatores também são fortemente influenciados pela sequência de cultivo. (OLIVEIRA et al., 2023). Essa falta de um padrão claro pode ser explicada pelas condições edafoclimáticas locais, como umidade do solo, temperatura, N mineral (SANTOS et al., 2016), pH (CARVALHO et al., 2017) e adubação nitrogenada (CAMPANHA et al., 2019), e também pela duração experimental, permitindo efeitos de curto e longo prazo, devido à temporalidade dos eventos/fatores estudados (OLIVEIRA et al., 2023).

Segundo Shang et al. (2021), mudanças na rotação de culturas podem ser uma maneira eficaz de alcançar uma agricultura sustentável. A otimização da rotação de culturas por meio da alteração de espécies e combinações de culturas, manejo de adubação e estratégias de irrigação geralmente leva à redução das emissões de GEE (SHUMBA et al., 2023). Além disso, várias práticas inteligentes de gestão das terras agrícolas têm sido defendidas nas últimas décadas em prol da segurança alimentar e a redução das emissões de GEE.

Globalmente, muitos acordos internacionais como o Protocolo de Kyoto, o Acordo de Paris, etc, foram feitos para reduzir as emissões de GEE, definindo que devem ser feitos esforços rápidos para que todos os setores diminuam a emissão de gases com efeito de estufa (GRUPTA et al., 2021). Em última análise da dinâmica das emissões de gases de efeito estufa, é importante para que os formuladores de políticas avaliem os impactos ambientais ou as políticas de mitigação atuais e elaborem propostas eficientes para combater as mudanças climáticas e atingir as metas de emissões (BELLOC; MOLINA, 2023).

Diante do exposto fica claro a necessidade de entendimento da dinâmica de emissão de GEE em quaisquer sistemas de produção agrícola, a fim de preencher lacunas nas informações sobre quantidades emitidas do solo em diferentes sistemas de cultivo. O objetivo deste trabalho foi estimar as emissões de GEE em diferentes sistemas de cultivo, para fins forrageiros, de feijão-guandu, milheto e sorgo, no Semiárido de Pernambuco.

## 4.2 Material e Métodos

### 4.2.1 Caracterização da área experimental

De acordo com o apresentado na seção 3.2.1.

### 4.2.2 Delineamento experimental e estratégias de manejo

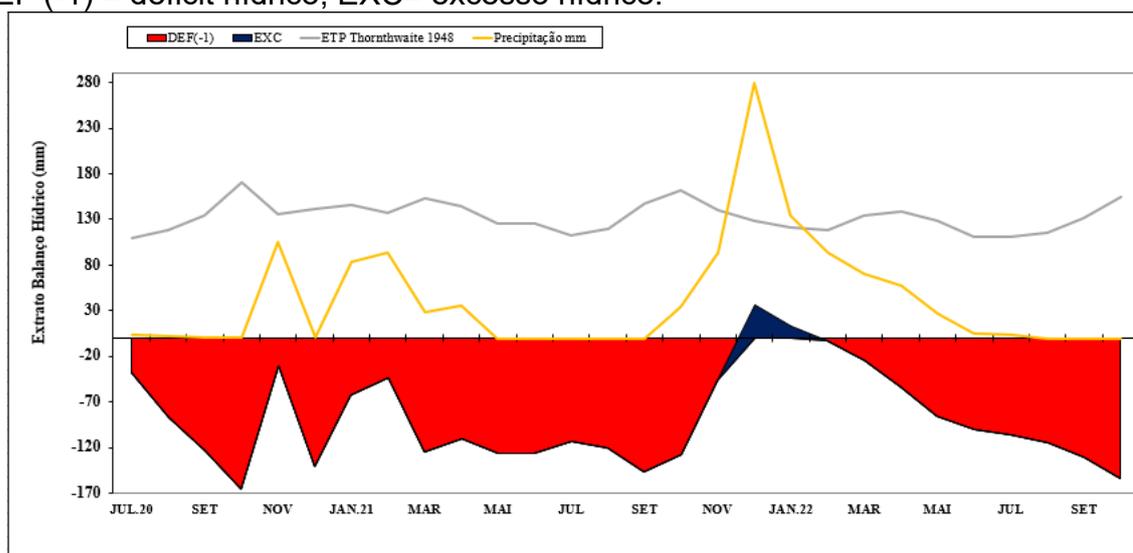
De acordo com o apresentado na seção 3.2.2.

### 4.2.3 Dados meteorológicos e irrigação

Ao longo do período experimental, a precipitação (P), em mm, foi obtida por meio de uma estação automática, da UNIVASF, localizada a uma distância de aproximadamente 400 m do local de condução do experimento.

As épocas seca e chuvosa foram definidas a partir do balanço hídrico sequencial (BHS), calculado pelo método proposto por Thornthwaite e Mather (1955) em planilhas Excel (ROLIM et al., 1998) (Figura 3), considerando época chuvosa os meses com balanço hídrico positivo (excesso hídrico) e época seca balanço hídrico negativo (déficit hídrico).

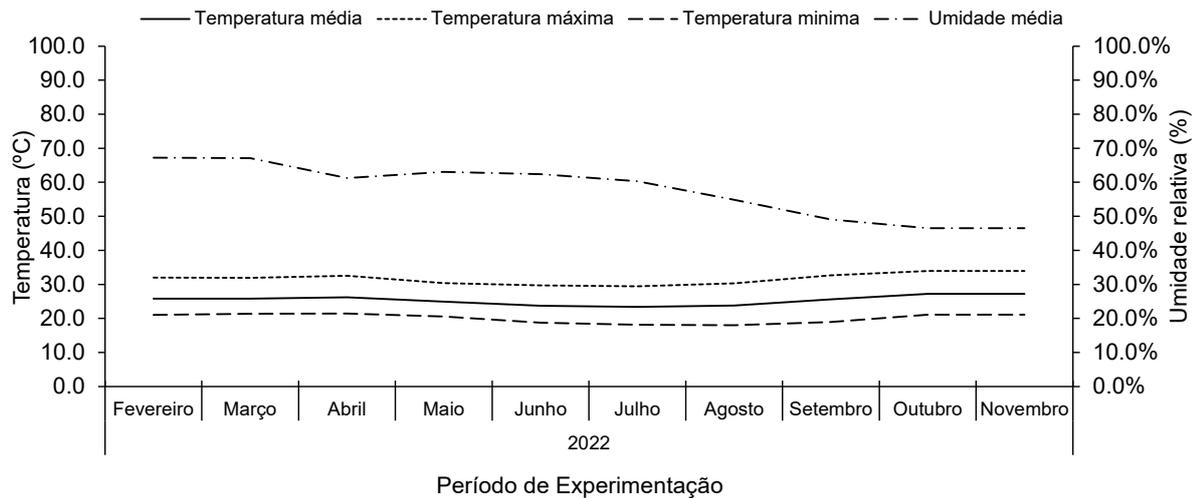
**Figura 3** - Balanço Hídrico e Evapotranspiração potencial (ETP) de Thornthwaite (1948) e a precipitação no período experimental de julho de 2020 a outubro de 2022. DEF (-1) = déficit hídrico, EXC= excesso hídrico.



Foi aplicado 1195,9 mm de lâmina bruta de água durante o período experimental, ocorreu uma precipitação natural de 1536,5 mm (Figura 1), totalizando 2732,4 mm de lâmina de água durante o período experimental (2020-2022).

As médias mensais de temperatura do ar, médias de temperatura máxima, médias de temperatura mínima e umidade relativa do ar durante a execução do experimento podem ser visualizadas na figura 4.

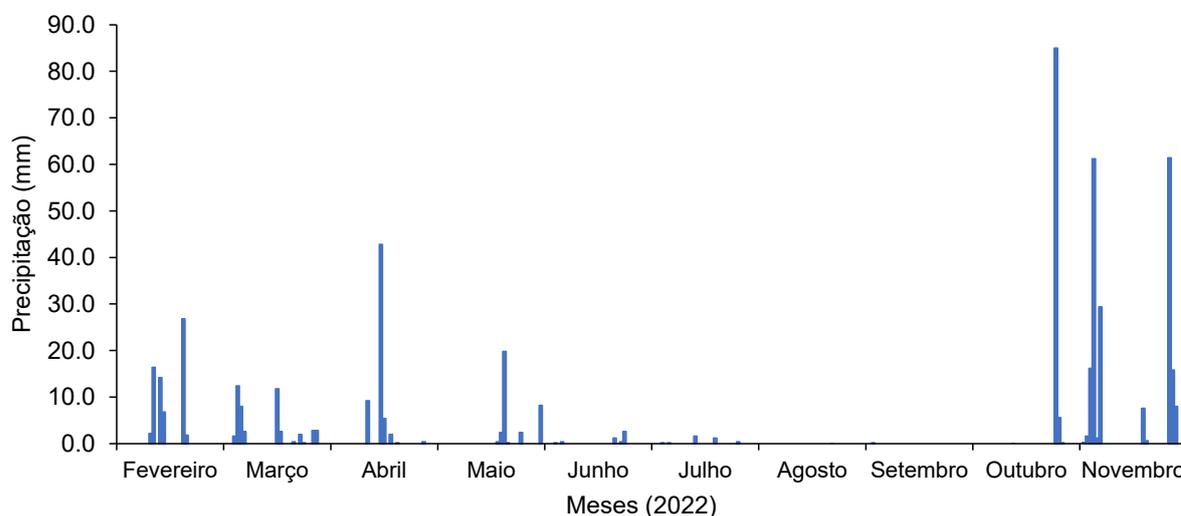
**Figura 4** - Valores médios mensais de temperatura, temperatura máxima, temperatura mínima, e umidade relativa do ar em Petrolina-PE durante o período de execução do experimento.



O sistema de irrigação utilizado foi por gotejamento, com fitas posicionadas próximas às linhas de cultivo, e os gotejadores espaçados a 0,2 m, com vazão de 1,6 L h<sup>-1</sup> a 1 atm, com diâmetro nominal (DN) de 13 mm e coeficiente de distribuição de 93%. A água utilizada na irrigação foi proveniente do Rio São Francisco.

A precipitação mensal durante a execução do experimento está ilustrada na figura 5. Os meses que apresentaram menores precipitações no referido foram junho, julho agosto e setembro, com média mensal alcançando o máximo de 5 mm, nesse estudo esse período foi tratado como período seco. Os meses de fevereiro, março, abril, maio, outubro (a partir do dia 25, com ocorrência de precipitação acima de 80 mm), e novembro apresentaram precipitação mensal acumulada superior a 30 mm, tratado como época de chuvas.

**Figura 5** – Precipitação mensal (mm) durante coletas de gases no cultivo de feijão guandu, sorgo e milho em diferentes sistemas de cultivo no município de Petrolina sertão de Pernambuco.



#### 4.2.4 Avaliação dos gases de efeito estufa (GEES)

Foram realizadas 25 coletas de gases durante os meses de fevereiro a novembro de 2022, portanto no segundo ano de cultivo (2021-2022). Neste ano, a primeira semeadura foi realizada entre os dias 25 e 28 de outubro de 2021, para todas as culturas; a segunda semeadura do sorgo e do milho ocorreu entre 05 e 25 de maio de 2022. As coletas foram realizadas nas datas apresentadas na seção ANEXO (Tabela 18).

As coletas dos gases emitidos pelo solo foram feitas utilizando-se câmaras estáticas. As câmaras eram constituídas por duas partes: uma base de aço galvanizado de formato retangular (dimensões: 60 cm de comprimento por 40 cm de largura) e uma tampa de aço galvanizado, também em formato retangular revestida com manta térmica aluminizada e encaixada sobre a base apenas no momento das coletas, com volume de 76.81 L. Cada câmara possuía em sua extremidade superior um orifício para coleta das amostras de gases e outro para acoplamento de termômetro digital.

Duas bases foram instaladas nas duas linhas centrais no solo em cada parcela, uma semana antes da primeira coleta dos gases e permaneceram no campo durante todo o período de avaliação, nas parcelas que apresentavam mais de uma espécie (consórcio), cada base foi instalada na linha de cada espécie. A instalação consistiu

em enterrar parcialmente a base ao solo (5 cm de profundidade) de maneira que apenas a borda superior onde a tampa se encaixa permanecesse sobre a superfície. Foram instaladas 28 bases em todo experimento, as quais foram mantidas no mesmo local até o final do período de avaliação contemplado nesse estudo.

No momento da coleta das amostras de GEEs emitidos pelo solo, a tampa foi encaixada sobre a base e apoiada sobre uma caneleta localizada na borda externa da base. Após o fechamento de cada câmara, foram coletadas amostras dos gases emitidos pelo solo em três intervalos de tempo: no momento do fechamento da câmara (tempo zero), aos 10 minutos, aos 20 minutos e aos 40 minutos após o fechamento da câmara.

As amostras foram coletadas em seringas de polipropileno com volume de 25ml e transferidas para frascos de vidro (vials) fechados com septo de borracha, lacrados de forma manual e previamente evacuados (-80 KPa). As coletas dos gases foram realizadas sempre pela manhã, às 09:00 horas, de seguindo a metodologia de Alves et al. (2012).

Durante todas as coletas foram medidas as temperaturas do solo, do ambiente e a temperatura interna das câmaras, utilizando termômetros digitais. Além disso, durante todo o período de avaliação foram coletados os dados de umidade relativa do ar, temperatura média diária e precipitação diária de uma estação meteorológica.

Após a coleta dos gases, as amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Cromatografia da Embrapa Semiárido. As análises foram feitas em cromatógrafo gasoso Agilent, modelo 7890A, com forno de injeção a 60°C, detector do tipo FID (120°C), para determinações das concentrações de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, e detector  $\mu$ ECD (300°C) para determinação das concentrações de N<sub>2</sub>O nas amostras.

A partir das concentrações de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O nas amostras, foram calculados, para cada dia de avaliação, os fluxos desses três gases. Os fluxos foram calculados pela seguinte equação (Matthias et al. 1980):

$$F(\mu\text{g N-N}_2\text{O/C-CO}_2\text{/C-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}) = (\Delta\text{C}/\Delta t) \cdot (m/V_m) \cdot V/A.$$

Onde:

1.  $\Delta\text{C}/\Delta t$  é a taxa de variação do gás dentro da câmara em determinado tempo (ppm/hora);
2.  $m$  é a massa molecular de cada gás (g);

3.  $V_m$  é o volume molecular do gás (1 mol ocupa 22,4 L nas condições normais de temperatura e pressão);
4.  $V$  é o volume da câmara (L);
5.  $A$  é a área da câmara ( $m^2$ ).

O volume molecular dos gases foi corrigido em função da temperatura no interior da câmara durante a amostragem, multiplicando 22,4 por  $(273 + T / 273)$ , sendo  $T$  a temperatura média no interior da câmara ( $^{\circ}C$ ).

Os fluxos dos GEEs foram tabulados em planilhas eletrônicas e estimou-se a quantidade total de gases emitida em cada câmara durante o período de avaliação por meio da integração matemática dos fluxos diários.

#### 4.2.5 Atributos do solo

Após a última coleta de gases de efeito estufa, mini trincheiras foram escavadas nas parcelas, com dimensões de 40x40x60 cm, comprimento, largura e profundidade respectivamente, com posterior coleta de amostras indeformadas. As amostras foram coletadas com anel de volume conhecido e nas profundidades de 0-10 cm, 10-20cm e 20-40 cm, em laboratório, determinou-se as respectivas massas e umidade do solo contido no anel. Após a coleta os anéis foram encaminhados para o laboratório de solos da Embrapa semiárido.

A densidade do solo em cada camada foi determinada conforme equação a seguir:

$$\text{Densidade (g cm}^{-3}\text{)} = \text{massa de solo (g)} / \text{volume do cilindro (cm}^{-3}\text{)}$$

Os estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) foram calculados para todas as profundidades, de acordo com a equação a seguir:

$$\text{Estoque (Mg ha}^{-1}\text{)} = \text{teor(\%)} \times \text{profundidade (cm)} \times \text{densidade (g cm}^{-3}\text{)}$$

Após o preparo inicial, aproximadamente 10 g de cada amostra foram moídos e passados em peneira de 100 mesh (0,149 mm). Os teores de C e N foram determinados pelo método de combustão (via seca) em aparelho LECO CN 2000. A densidade utilizada para esse cálculo foi obtida a partir da avaliação descrita anteriormente. Com a divisão da percentagem de C pela percentagem de N foi obtido sua relação (C/N).

#### 4.2.6 Estatística

Os fluxos de cada dia de coleta, as emissões totais acumuladas (obtidas pela integração matemática dos fluxos ao longo do experimento), os teores de carbono, de nitrogênio, relação C/N, estoque de carbono e nitrogênio e densidade do solo foram submetidos à análise de variância e teste de Tukey ( $\alpha=5\%$ ) para comparação de médias entre os tratamentos (sistemas de cultivo). As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R version 4.1.2.

### 4.3 Resultados e Discussão

#### 4.3.1 Emissão Acumulada de N<sub>2</sub>O

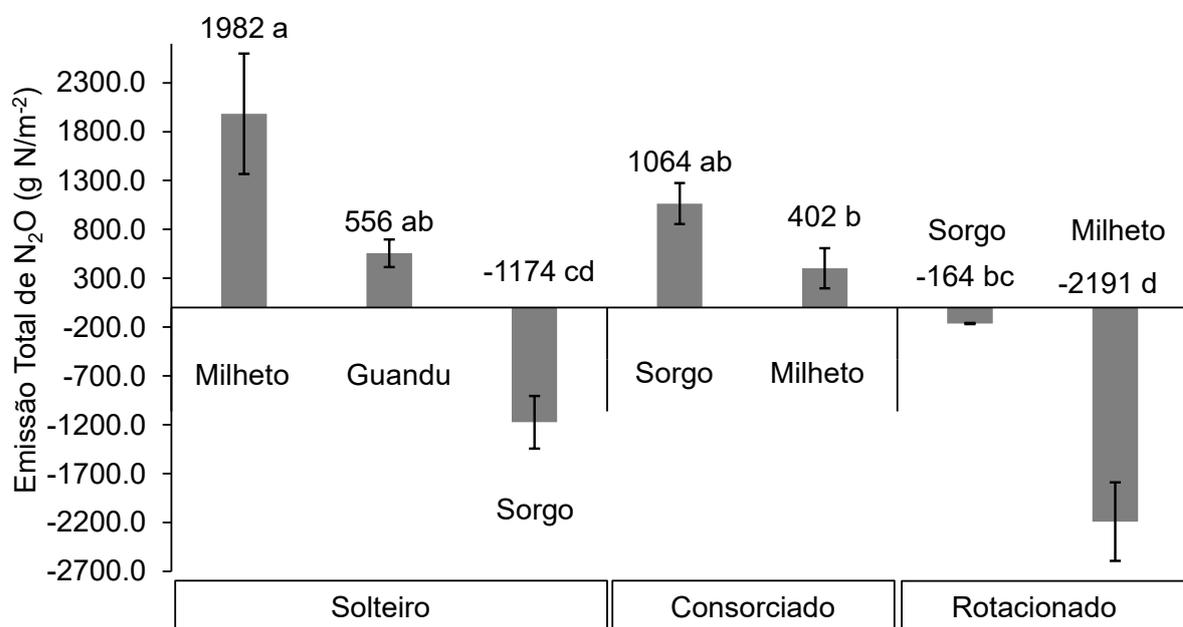
O balanço da emissão total de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) ao final da execução do experimento apresentou médias estatisticamente diferente entre alguns tratamentos (Figura 6). Pode-se observar que a maior média de N<sub>2</sub>O emitido durante o período avaliado foi o tratamento cultivado com milho solteiro, apresentando média de 1982 g N m<sup>-2</sup>. Oliveira et al. (2023) pesquisando uma avaliação multifatorial dos efeitos do manejo, rotação e sequência de culturas sobre as emissões de óxido nitroso do solo no Cerrado, encontrou maiores valores acumulados, nos anos de 2013-2014 e 2014-2015, de emissão N<sub>2</sub>O no sistema de plantio convencional.

Os tratamentos que apresentaram médias negativas de emissão de N<sub>2</sub>O (consumo), ao fim do período experimental foram o milho cultivado em rotação com feijão guandu, com média de -2191 g N m<sup>-2</sup>, seguido pelos tratamentos sorgo solteiro com média de -1174 g N m<sup>-2</sup>, e o tratamento com cultivo de sorgo em rotação com o feijão guandu que apresentou média de -164 g N m<sup>-2</sup>. Valores negativos de emissão de N<sub>2</sub>O também foram encontrados por Galdino, Signor e Moraes (2023) em estudo sobre a modificação das câmaras estáticas fechadas para coleta de GEEs emitidos pelo solo, e por Signor et al. (2022) estudando as emissões de gases de efeito estufa do solo em um sistema de produção de caprinos no semiárido brasileiro onde obtiveram valores negativos de N<sub>2</sub>O.

O fluxo negativo de N<sub>2</sub>O observado no presente estudo, pode estar relacionado a diversos fatores, dentre eles ao rápido aumento da atividade microbiana devido ao incremento da umidade do solo (SIGNOR et al., 2022), em períodos de precipitação e

irrigação fornecida durante a execução do experimento, e à baixa disponibilidade de N e O<sub>2</sub> no solo, desta forma, quanto mais tempo o N<sub>2</sub>O permanecer no solo, seja por ter sido produzido em camadas mais profundas ou por lenta difusão para a atmosfera, maiores quantidades de N<sub>2</sub>O (desnitrificação incompleta), serão utilizadas como acceptor de elétrons e maiores serão as emissões de N<sub>2</sub> no processo completo de desnitrificação (SIGNOR; CERRI, 2013).

**Figura 6** – Emissão total de N<sub>2</sub>O (g N m<sup>-2</sup>) emitido durante coletas de gases no cultivo de feijão guandu, sorgo e milho em diferentes sistemas de cultivo no município de Petrolina sertão de Pernambuco.



Médias com a mesma letra não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

#### 4.3.2 Emissão Acumulada de CH<sub>4</sub>

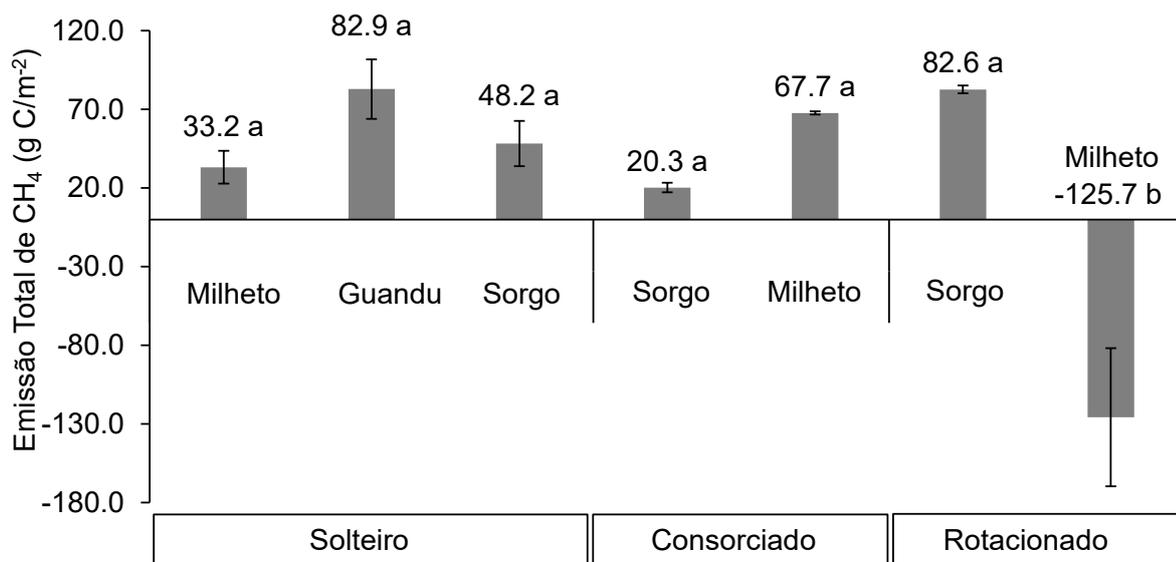
Os fluxos de CH<sub>4</sub> foram predominantemente positivos, com exceção da emissão do tratamento milho cultivado em rotação que apresentou uma emissão total de -125.7 g C m<sup>-2</sup> (consumo) (Figura 7).

Signor e Moraes (2023) encontraram valores fluxo negativo, indicam que o solo se comportou como um pequeno consumidor CH<sub>4</sub>. em estudo sobre a modificação das câmaras estáticas fechadas para coleta de GEEs emitidos pelo solo.

As médias de metano (CH<sub>4</sub>) acumulado durante a execução do experimento dos demais tratamentos foram consideradas iguais com médias oscilando entre 82,9 g C

$\text{m}^{-2}$  no cultivo de feijão guandu solteiro e  $20,3 \text{ g C m}^{-2}$  no cultivo de sorgo consorciado com feijão guandu. No estudo de metano e óxido nítrico de florestas plantadas e ecossistemas nativos de Cerrado no Brasil, os fluxos acumulados não foram influenciados pela variação anual, idade dos povoamentos de *Eucalyptus* ou pela substituição da vegetação nativa por *Eucalyptus* no período estudado (OLIVEIRA et al., 2021). Os valores positivos, possivelmente, ocorrem devido à formação de micro-sítios anaeróbios no solo, induzidos pela umidade associada à alta taxa de decomposição que consome o  $\text{O}_2$  do solo (SIGNOR E MORAIS, 2023).

**Figura 7** - Emissão total de  $\text{CH}_4$  ( $\text{g C m}^{-2}$ ) emitido durante coletas de gases no cultivo de feijão guandu, sorgo e milho em diferentes sistemas de cultivo no município de Petrolina sertão de Pernambuco.



Médias com a mesma letra não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

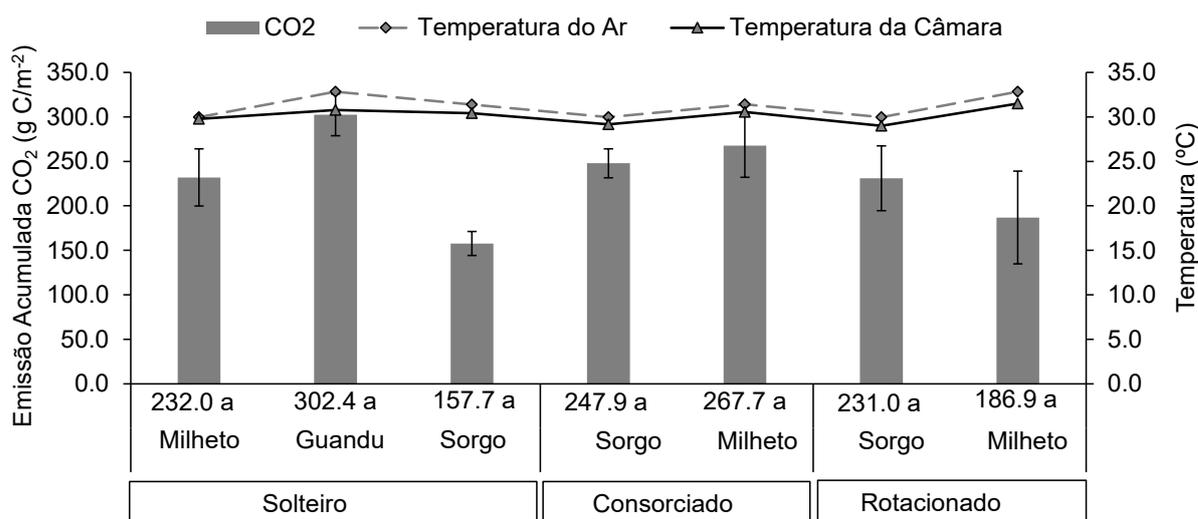
#### 4.3.3 Emissão Acumulada de $\text{CO}_2$

Não foi observada diferença estatística entre as médias de emissão acumulada de  $\text{CO}_2$  durante o período experimental a oscilação das médias foi de  $302,4 \text{ g C m}^{-2}$  no cultivo solteiro de feijão guandu e  $157,7 \text{ g C m}^{-2}$  no cultivo solteiro de sorgo, com maior e menor média respectivamente. A média geral de emissão de  $\text{CO}_2$  acumulada foi de  $232,2 \text{ g C m}^{-2}$  (Figura 8).

Os fluxos de CO<sub>2</sub> estão intimamente relacionados à umidade do solo e a temperatura, maior umidade e temperatura do solo podem promover emissões de CO<sub>2</sub> pelo aumento da respiração do solo e acelerar a decomposição da matéria orgânica (GAO et al., 2023).

A ausência de diferença estatística encontrada nesse estudo pode estar relacionada ao fato dos diferentes tratamentos apresentarem fatores que controlam a emissão de CO<sub>2</sub> semelhantes, de forma que a irrigação adotada para todos os tratamentos ser igual. Mesmo a temperatura apresentando uma variação entre os tratamentos, esse fator pode não ser o suficiente para interferir de forma significativa estatisticamente.

**Figura 8** - Emissão acumulada de CO<sub>2</sub> (g C m<sup>-2</sup>) emitido durante coletas de gases, temperatura do e da câmara no cultivo de feijão guandu, sorgo e milho em diferentes sistemas de cultivo no município de Petrolina sertão de Pernambuco.



Médias com a mesma letra não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

#### 4.3.4 Fluxos de N<sub>2</sub>O

Os fluxos de N<sub>2</sub>O foram basais durante a maior parte do período, com picos de emissão entre as datas 10/maio e 28/junho do ano de 2022, apresentando picos de emissão positiva e negativa (Figura 9). O pico positivo que se destaca é a emissão do tratamento milho solteiro na data de 02/junho, atingindo valor máximo de 6.482,2 ug m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Os picos negativos que se destacam nesse ponto são os observados na emissão dos tratamentos milho consorciado com feijão guandu (milho+guandu) e milho rotacionado com feijão guandu (rotação (milho)) que atingiram valores

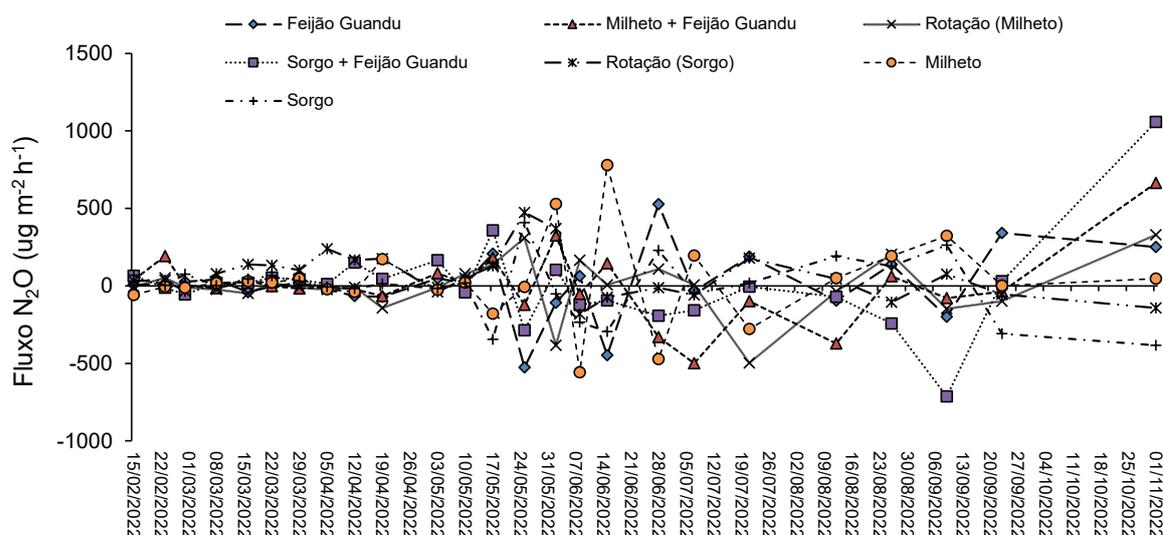
negativos de  $-4.840,6 \text{ ug m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  e  $-3.475,54 \text{ ug m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , respectivamente. Os demais tratamentos apresentaram fluxos basais de emissão nesse período.

Após esse período de picos de emissão os fluxos retornaram as emissões basais com posterior alteração no início de setembro e continuando com esse comportamento até o fim das avaliações. A partir 09/setembro teve início uma elevação das emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  nos tratamentos sorgo consorciado com feijão guandu (sorgo+guandu), milheto consorciado com feijão guandu (milheto+guandu) e o cultivo de feijão guandu solteiro, no entanto, os tratamentos milheto solteiro e sorgo solteiro apresentaram emissões negativas a partir dessa data (consumo).

As emissões de óxido nitroso variam fortemente em resposta a inúmeros fatores, sobretudo as condições ambientais e o manejo agrônômico, como por exemplo, adubação e a ciclagem de N no solo, que contribuem para a produção de  $\text{N}_2\text{O}$ , bem como a formação de amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e a atividade da microbiota do solo (OLIVEIRA et al., 2023).

O nitrogênio aplicado nesse estudo foi realizado de forma parcelada. Em sistemas com aplicação de adubo nitrogenado, sua aplicação de forma parcelada, pode causar um sincronismo na liberação de nutrientes e na absorção pelas plantas, reduzindo assim as perdas de N por lixiviação ou volatilização (ARAÚJO et al., 2022), e redução das emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  para a atmosfera (TIMILSENA et al., 2015).

**Figura 9** - Emissão de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) de fevereiro de 2022 a novembro de 2022 no cultivo de feijão guandu, sorgo e milheto em diferentes sistemas de cultivo. no município de Petrolina sertão de Pernambuco.



#### 4.3.5 Fluxos de CH<sub>4</sub>

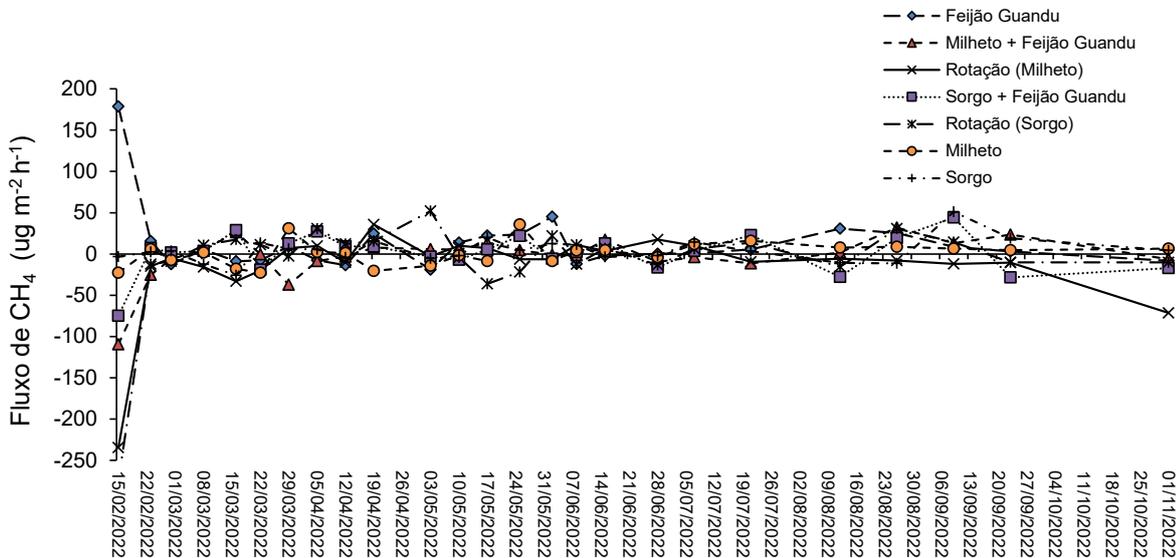
Os fluxos de CH<sub>4</sub> apresentaram picos de emissão no início da implantação do experimento (15/02/2022) (Figura10), sendo observado o maior pico de emissão positivos para o cultivo de feijão guandu solteiro com emissão de 178 ug m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>, além da emissão positiva, picos negativos foram obtidos nessa mesma data de avaliação, sendo observados nos tratamentos cultivado com milho cultivado em rotação, milho e guandu consorciados, sorgo cultivado em rotação, e o sorgo e guandu consorciados. Para descrição dos tratamentos sorgo solteiro e milho solteiro observou-se fluxos basais no período inicial de avaliação do experimento (15/03/2022).

Alterações nos fluxos de emissão de CH<sub>4</sub> foram observadas a partir de 21/07/2022 com elevação do fluxo de CH<sub>4</sub> principalmente no tratamento feijão guandu solteiro, apresentando elevação da emissão de metano e posterior queda do fluxo após 12/08/2022 chegando a apresentar fluxos negativos em 01/11/2022. Fluxos negativos também foram observados nos tratamentos sorgo e feijão guandu consorciados (sorgo + feijão guandu), milho em rotação (rotação (milho)), e sorgo em rotação (rotação (sorgo)) na avaliação de 01/11/2022.

Essa elevação na emissão de CH<sub>4</sub> em algumas desses períodos podem indicar uma elevação na decomposição da matéria orgânica que fornece substrato metanogênico para a produção de CH<sub>4</sub> (Qian et al., 2020). shang et al. (2021)

relataram aumento da emissão de CH<sub>4</sub> com a substituição do N sintético por fonte orgânica, aumentando o sequestro de carbono e estimulou a emissão de CH<sub>4</sub>.

**Figura 10** - Emissão de óxido nitroso (CH<sub>4</sub>) de fevereiro de 2022 a novembro de 2022 no cultivo de feijão guandu, sorgo e milho em diferentes sistemas de cultivo. no município de Petrolina sertão de Pernambuco.



#### 4.3.6 Fluxos de CO<sub>2</sub>

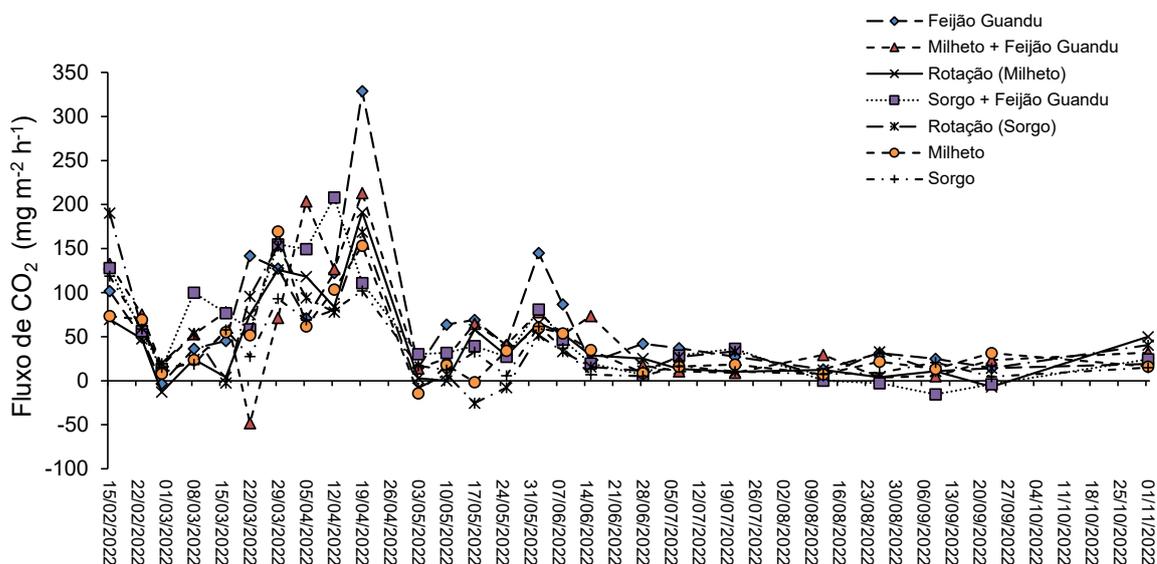
Os fluxos de CO<sub>2</sub> foram predominantemente positivos durante todo o período de avaliação, com exceção do fluxo do sorgo cultivado em rotação no período de 17/05/2022 a 25/05/2022 e o fluxo do tratamento sorgo e feijão guandu consorciados durante o período 12/08/2022 a 09/09/2022.

Durante a avaliação do fluxo de CO<sub>2</sub> diversos picos de emissão foram observados, sendo os principais observados em dois períodos, o primeiro sendo observado no período de 12/04/2022 a 03/05/2022, com o maior valor de emissão de CO<sub>2</sub> observado no cultivo do feijão guandu com emissão de 324,62 ug m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>. O segundo período de elevação das emissões de CO<sub>2</sub> foi observado ao final do período experimental 31/05/2022, com elevação mais proeminente do feijão guandu, entretanto todos os tratamentos apresentaram emissões de CO<sub>2</sub> elevada (Figura 11).

Essa oscilação das emissões de CO<sub>2</sub> com picos mais elevados até o início de junho/2022 coincide com o período com maior precipitação do ano em estudo. Isso corrobora com os resultados de Cardoso et al. (2017) onde foi verificado níveis mais elevados de emissão de CO<sub>2</sub> durante a estação chuvosa de verão, nesse período com

maior pluviosidade pode ter favorecido a respiração dos microrganismos das raízes e do solo.

**Figura 11** - Emissão de óxido nitroso ( $\text{CO}_2$ ) de fevereiro de 2022 a novembro de 2022 no cultivo de feijão guandu, sorgo e milho em diferentes sistemas de cultivo. no município de Petrolina sertão de Pernambuco.



#### 4.3.7 Atributos do Solo

O carbono total não apresentou diferença estatística entre os tratamentos em nenhuma das profundidades avaliadas, assim como também não foi verificada diferença estatística entre as médias de carbono entre as profundidades em todos os tratamentos. O carbono total apresentou oscilação de 0,293% a 0,639% na profundidade 0-10 cm, 0,188% a 0,530% na profundidade 10-20 cm e 0,198% a 0,485% na profundidade 20-40 cm.

Oliveira Filho et al. (2020) não verificaram diferença entre os sistemas agrícolas em estudo, no entanto, eles diferiram do Cerrado nativo, que apresentou valores mais altos de carbono orgânico devido à grande quantidade de material orgânico em decomposição.

A relação C/N não apresentou diferença estatística entre as médias dos tratamentos em nenhuma das profundidades, comportamento também observado nas médias entre as profundidades em cada tratamento (Tabela 15). O nitrogênio total no solo não apresentou diferença estatística entre as médias dos tratamentos em nenhuma das profundidades (Tabela 16). Assim como o nitrogênio total o estoque de

nitrogênio e o estoque de carbono não apresentou diferença estatística entre os tratamentos em nenhuma das profundidades avaliadas.

A adubação e a ciclagem de N no solo são os principais fatores que contribuem para a produção de O<sub>2</sub>, bem como a formação de amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) e nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e a atividade da microbiota do solo (OLIVEIRA et al., 2023). No entanto, o fornecimento de nitrogênio para as gramíneas foi baseado no exportado nos ciclos anteriores e na análise de solo, assim essa quantidade pode não ter favorecido os processos supracitados.

Esses resultados podem ser associados aos baixos teores de silte e argila presentes no solo, que resultam em menor proteção física da matéria orgânica pelos agregados do solo (DUVAL et al., 2018), além disso, ocorre menor proteção química devido à baixa associação dos grupos funcionais da matéria orgânica com coloides do solo (JENSEN et al., 2019), tornando a matéria orgânica do solo mais acessível à ação de microrganismos e facilitando sua decomposição (OLIVEIRA et al., 2016).

Medeiros, Soares e Maia (2022) em estudo do estoque de carbono no solo sob sistemas convencionais no semiárido brasileiro verificaram maior estoque de carbono em áreas de vegetação nativa em comparação com sistemas de produção agrícolas convencionais, sendo esse resultado atribuído ao preparo convencional do solo, responsável pela fragmentação dos agregados, o que altera sua estrutura e resulta na exposição e oxidação da matéria orgânica.

A densidade do solo oscilou entre os valores de 1,21 g cm<sup>-3</sup> a 1,54 g cm<sup>-3</sup> na profundidade de 0-10 cm de profundidade, na profundidade de 10-20 cm a oscilação ficou entre os valores de 1,59 g cm<sup>-3</sup> a 1,72 g cm<sup>-3</sup>, por fim na profundidade de 20-40 cm as médias de densidade do solo oscilaram entre os valores de 1,55 g cm<sup>-3</sup> e 1,82 g cm<sup>-3</sup>. Jayaraman et al. (2022) verificaram diferença significativa na densidade do solo (Vertissolo argiloso) em diferentes profundidades durante 7 ciclos de cultivo independente do sistema de preparo do solo, encontrando menores valores de densidade do solo na camada de 0-5 cm de profundidade, com elevação conforme aumento da profundidade da camada. Esse resultado difere dos encontrados no presente estudo, entretanto, é importante destacar que o solo ao qual os estudos foram desenvolvidos eram diferentes.

**Tabela 11** - Teores de carbono e relação C/N em solos cultivados com milho, sorgo e feijão guandu submetidos a diferentes sistemas de cultivo (média  $\pm$  erro padrão da média) em Petrolina Pernambuco.

Sistema de cultivo/espécie		Carbono (%)			Relação C/N		
		0-10 cm	10-20 cm	20-40 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-40 cm
solteiro	Milheto	0,386 $\pm$ 0,11 Aa	0,188 $\pm$ 0,01 Aa	0,198 $\pm$ 0,02 Aa	9,594 $\pm$ 2,47 Aa	8,098 $\pm$ 1,13 Aa	8,283 $\pm$ 0,61 Aa
	Guando	0,578 $\pm$ 0,12 Aa	0,406 $\pm$ 0,04 Aa	0,315 $\pm$ 0,07 Aa	10,263 $\pm$ 1,16 Aa	10,004 $\pm$ 0,92 Aa	8,451 $\pm$ 1,09 Aa
	Sorgo	0,428 $\pm$ 0,08 Aa	0,295 $\pm$ 0,07 Aa	0,226 $\pm$ 0,10 Aa	8,787 $\pm$ 1,26 Aa	8,49 $\pm$ 1,62 Aa	6,697 $\pm$ 2,35 Aa
Consoiciado	Milheto	0,293 $\pm$ 0,04 Aa	0,235 $\pm$ 0,01 Aa	0,199 $\pm$ 0,008 Aa	7,293 $\pm$ 0,65 Aa	7,262 $\pm$ 0,95 Aa	6,734 $\pm$ 0,42 Aa
	Guandu	0,379 $\pm$ 0,02 Aa	0,29 $\pm$ 0,001 Aa	0,285 $\pm$ 0,09 Aa	8,144 $\pm$ 0,11 Aa	8,193 $\pm$ 0,68 Aa	7,539 $\pm$ 0,33 Aa
Consoiciado	Sorgo	0,479 $\pm$ 0,16 Aa	0,316 $\pm$ 0,05 Aa	0,220 $\pm$ 0,08 Aa	8,474 $\pm$ 0,57 Aa	7,571 $\pm$ 0,40 Aa	5,979 $\pm$ 1,00 Aa
	Guandu	0,375 $\pm$ 0,007 Aa	0,286 $\pm$ 0,05 Aa	0,228 $\pm$ 0,07 Aa	7,822 $\pm$ 0,31 Aa	7,656 $\pm$ 0,34 Aa	6,771 $\pm$ 0,22 Aa
Rotacionado com guandu	Milheto	0,399 $\pm$ 0,15 Aa	0,288 $\pm$ 0,06 Aa	0,288 $\pm$ 0,04 Aa	9,098 $\pm$ 1,47 Aa	8,535 $\pm$ 1,16 Aa	7,444 $\pm$ 1,62 Aa
	Sorgo	0,482 $\pm$ 0,11 Aa	0,281 $\pm$ 0,04 Aa	0,257 $\pm$ 0,002 Aa	8,917 $\pm$ 2,05 Aa	7,525 $\pm$ 1,57 Aa	7,355 $\pm$ 0,65 Aa
Mata nativa	Caatinga	0,639 $\pm$ 0,19 Aa	0,530 $\pm$ 0,32 Aa	0,485 $\pm$ 0,42 Aa	10,618 $\pm$ 136 Aa	10,730 $\pm$ 3,63 Aa	9,671 $\pm$ 2,70 Aa

Letras maiúsculas comparam médias entre as profundidades para o mesmo tratamento. Letras minúsculas comparam médias entre os tratamentos dentro de uma mesma profundidade. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

**Tabela 12** - Densidade do solo e nitrogênio em solo cultivado com milho, sorgo e feijão guandu submetidos a diferentes sistemas de cultivo (média  $\pm$  erro padrão da média) em Petrolina Pernambuco.

Sistema de cultivo/espécie		Densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ )			Nitrogênio (%)		
		0-10 cm	10-20 cm	20-40cm	0-10 cm	10-20 cm	20-40 cm
solteiro	Milheto	1,46 $\pm$ 0,08 Aa	1,68 $\pm$ 0,04 Aa	1,74 $\pm$ 0,01 Aa	0,040 $\pm$ 0,001 Aa	0,024 $\pm$ 0,005 Aa	0,024 $\pm$ 0,004 Aa
	Guando	1,21 $\pm$ 0,33 Aa	1,62 $\pm$ 0,12 Aa	1,71 $\pm$ 0,07 Aa	0,056 $\pm$ 0,006 Aa	0,041 $\pm$ 0,001 Aa	0,037 $\pm$ 0,004 Aa
	Sorgo	1,52 $\pm$ 0,10 Aa	1,59 $\pm$ 0,02 Aa	1,72 $\pm$ 0,01 Aa	0,049 $\pm$ 0,002 Aa	0,036 $\pm$ 0,001 Aa	0,033 $\pm$ 0,004 Aa
Consortiado	Milheto	1,50 $\pm$ 0,07 Aa	1,65 $\pm$ 0,08 Aa	1,82 $\pm$ 0,02 Aa	0,041 $\pm$ 0,009 Aa	0,033 $\pm$ 0,002 Aa	0,030 $\pm$ 0,001 Aa
	Guandu	1,46 $\pm$ 0,01 Aa	1,58 $\pm$ 0,08 Aa	1,71 $\pm$ 0,02 Aa	0,047 $\pm$ 0,004 Aa	0,036 $\pm$ 0,003 Aa	0,038 $\pm$ 0,011 Aa
Consortiado	Sorgo	1,46 $\pm$ 0,05 Aa	1,69 $\pm$ 0,11 Aa	1,55 $\pm$ 0,10 Aa	0,056 $\pm$ 0,016 Aa	0,042 $\pm$ 0,01 Aa	0,036 $\pm$ 0,008 Aa
	Guandu	1,50 $\pm$ 0,14 Aa	1,65 $\pm$ 0,01 Aa	1,72 $\pm$ 0,01 Aa	0,048 $\pm$ 0,003 Aa	0,038 $\pm$ 0,009 Aa	0,034 $\pm$ 0,011 Aa
Rotacionado com guandu	Milheto	1,54 $\pm$ 0,03 Aa	1,72 $\pm$ 0,03 Aa	1,71 $\pm$ 0,08 Aa	0,043 $\pm$ 0,01 Aa	0,034 $\pm$ 0,004 Aa	0,039 $\pm$ 0,003 Aa
	Sorgo	1,47 $\pm$ 0,07 Aa	1,68 $\pm$ 0,17 Aa	1,68 $\pm$ 0,01 Aa	0,054 $\pm$ 0,001 Aa	0,038 $\pm$ 0,002 Aa	0,035 $\pm$ 0,003 Aa
Mata nativa	Caatinga	1,46 $\pm$ 0,009 Aa	1,61 $\pm$ 0,05 Aa	1,58 $\pm$ 0,18 Aa	0,060 $\pm$ 0,011 Aa	0,047 $\pm$ 0,014 Aa	0,046 $\pm$ 0,03 Aa

Letras maiúsculas comparam médias entre as profundidades para o mesmo tratamento. Letras minúsculas comparam médias entre os tratamentos dentro de uma mesma profundidade. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

**Tabela 13** -Estoque de carbono e nitrogênio em solos cultivados com milho, sorgo e feijão guandu submetidos a diferentes sistemas de cultivo (média  $\pm$  erro padrão da média) em Petrolina Pernambuco.

Sistema de cultivo/espécie		Estoque de N (Mg/ha <sup>1</sup> )			Estoque de C (Mg/ha <sup>1</sup> )			
		0-10 cm	10-20 cm	20-40 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-40 cm	
<b>solteiro</b>	<b>Milheto</b>	0,585 $\pm$ 0,01 Aa	0,395 $\pm$ 0,07 Aa	0,840 $\pm$ 0,15 Aa	5,59 $\pm$ 1,3 Aa	3,15 $\pm$ 0,1 Aa	6,90 $\pm$ 0,7 Aa	
	<b>Guando</b>	0,689 $\pm$ 0,25 Aa	0,660 $\pm$ 0,06 Aa	1,274 $\pm$ 0,20 Aa	7,21 $\pm$ 3,4 Aa	6,63 $\pm$ 1,2 Aa	10,87 $\pm$ 3,1 Aa	
	<b>Sorgo</b>	0,737 $\pm$ 0,01 Aa	0,573 $\pm$ 0,01 Aa	1,142 $\pm$ 0,15 Aa	6,46 $\pm$ 0,7 Aa	4,68 $\pm$ 1,0 Aa	7,83 $\pm$ 3,7 Aa	
<b>Consoiciado</b>	<b>Milheto</b>	0,604 $\pm$ 0,10 Aa	0,538 $\pm$ 0,06 Aa	1,076 $\pm$ 0,01 Aa	4,37 $\pm$ 0,4 Aa	3,87 $\pm$ 0,05 Aa	7,24 $\pm$ 0,4 Aa	
	<b>Guandu</b>	0,681 $\pm$ 0,05 Aa	0,570 $\pm$ 0,07 Aa	1,286 $\pm$ 0,34 Aa	5,53 $\pm$ 0,3 Aa	4,64 $\pm$ 0,2 Aa	9,75 $\pm$ 3,0 Aa	
<b>Consoiciado</b>	<b>Sorgo</b>	0,816 $\pm$ 0,19 Aa	0,718 $\pm$ 0,21 Aa	1,131 $\pm$ 0,34 Aa	6,96 $\pm$ 2,1 Aa	5,38 $\pm$ 1,3 Aa	6,93 $\pm$ 3,1 Aa	
	<b>Guandu</b>	0,726 $\pm$ 0,11 Aa	0,619 $\pm$ 0,14 Aa	1,155 $\pm$ 0,37 Aa	5,66 $\pm$ 0,6 Aa	4,71 $\pm$ 0,8 Aa	7,86 $\pm$ 2,7 Aa	
<b>Rotacionado com guandu</b>	<b>Milheto</b>	0,662 $\pm$ 0,13 Aa	0,577 $\pm$ 0,05 Aa	1,339 $\pm$ 0,16 Aa	6,12 $\pm$ 2,2 Aa	4,95 $\pm$ 1,1 Aa	9,83 $\pm$ 0,9 Aa	Letras
	<b>Sorgo</b>	0,799 $\pm$ 0,04 Aa	0,634 $\pm$ 0,10 Aa	1,181 $\pm$ 0,10 Aa	7,16 $\pm$ 2,0 Aa	4,69 $\pm$ 0,2 Aa	8,65 $\pm$ 0,01 Aa	
<b>Mata nativa</b>	<b>Caatinga</b>	0,870 $\pm$ 0,15 Aa	0,756 $\pm$ 0,20 Aa	0,918 $\pm$ 0,08 Aa	9,33 $\pm$ 2,7 Aa	8,48 $\pm$ 4,9 Aa	8,98 $\pm$ 3,2 Aa	

maiúsculas comparam médias entre as profundidades para o mesmo tratamento. Letras minúsculas comparam médias entre os tratamentos dentro de uma mesma profundidade. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

#### **4.4 Conclusões**

A emissão acumulada de  $\text{CO}_2$  não apresentou diferença entre as espécies em estudo, independente do sistema de cultivo. Entretanto, a emissão acumulada de  $\text{N}_2\text{O}$  e de  $\text{CH}_4$  apresentaram variação em suas emissões.

O milho cultivado em rotação apresentou uma emissão acumulada de  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$  negativo (consumo).

Os valores de estoque de carbono e de nitrogênio não apresentaram variação nas diferentes camadas, nas diferentes espécies e também nos diferentes sistemas de cultivo.

## Referências Bibliográficas

ARAÚJO, M. D. M.; SOUZA, H. A.; DEON, D. S.; MUNIZ, L. C.; COSTA, J. B.; SOUZA, I. M.; POMPEU, R. C. F. F. Integrated production systems in a Plinthosol: Greenhouse gas emissions and soil quality. **Australian Journal of Crop Science**, 16(2), 184-S2, 2022. <https://search.informit.com/doi/10.3316/informit.644657872027521>

BADAGLIACCA, G.; BENÍTEZ, E.; AMATO, G.; BADALUCCO, L.; GIAMBALVO, D.; LAUDICINA, V. A.; RUISI, P. Long-term no-tillage application increases soil organic carbon, nitrous oxide emissions and faba bean (*Vicia faba* L.) yields under rain-fed Mediterranean conditions. **Science of the Total Environment**, 639, 350-359, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.157>

BELLOC, I.; e MOLINA, J. A. Are greenhouse gas emissions converging in Latin America? Implications for environmental policies. **Economic Analysis and Policy**, v. 77, p.337-356, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2022.11.022>

CAMPANHA, M.M.; DE OLIVEIRA, A.D.; MARRIEL, I.E.; NETO, G.M.M.; MALAQUIAS, J.; LANDAU, E.C.; FILHO-ALBUQUERQUE, M.R.; RIBEIRO, F.P.; CARVALHO, A.M.C. Effect of soil tillage and N fertilization on N<sub>2</sub>O mitigation in maize in the Brazilian Cerrado. **Sci. Total Environ.** 692, 1165–1174, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.315>

CARDOSO, A. D. S.; BRITO, L. D. F.; JANUSCKIEWICZ, E. R.; MORGADO, E. D. S.; BARBERO, R. P.; KOSCHECK, J. F. W.; RUGGIERI, A. C. Impact of grazing intensity and seasons on greenhouse gas emissions in tropical grassland. **Ecosystems**, 20, 845-859, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-0065-0>

CARVALHO, A. M.; OLIVEIRA, W. R. D.; RAMOS, M. L.G.; COSER, T. R.; OLIVEIRA, A. D.; PULROLNIK, K.; SOUZA, K. W.; VILELA, L.; MARCHAO, R. L. Soil N<sub>2</sub>O fluxes in integrated production systems, continuous pasture and Cerrado. **Nutrient Cycl. Agroecosyst.** 107, 1–15, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9823-4>

CRIPPA, M.; SOLAZZO, E.; GUIZZARDI, D.; MONFORTI-FERRARIO, F.; TUBIELLO, F. N.; LEIP, A. J. N. F. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. **Nature Food**, 2(3), 198-209, 2021. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>

DUVAL, M. E.; GALANTINI, J. A.; MARTÍNEZ, J. M.; LIMBOZZI, F. Labile soil organic carbon for assessing soil quality: influence of management practices and edaphic conditions. **Catena**, 171, 316-326, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.07.023>

GALDINO, T. L. G.; SIGNOR, D.; MORAES, S. A. Modification of closed static chambers for collection of greenhouse gases emitted by soil. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 21, p. 1549–1558, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05068-4>

GAO, Z.; ZHAO, J.; WANG, C.; WANG, Y.; SHANG, M.; ZHANG, Z.; CHU, Q. A six-year record of greenhouse gas emissions in different growth stages of summer maize influenced by irrigation and nitrogen management. **Field Crops Research**, v. 290, 108744, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108744>

GUPTA, K.; KUMAR, R.; BARUAH, K. K.; HAZARIKA, S.; KARMAKAR, S.; BORDOLOI, N. Greenhouse gas emission from rice fields: a review from Indian context. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 30551-30572, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13935-1>

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate change 2021: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2021  
JAYARAMAN, S.; SAHU, M.; SINHA, N. K.; MOHANTY, M.; CHAUDHARY, R. S.; YADAV, B.; DALAL, R. C. Conservation agricultural practices impact on soil organic carbon, soil aggregation and greenhouse gas emission in a vertisol. **Agriculture**, 12(7), 1004, 2022. <https://doi.org/10.3390/agriculture12071004>

JENSEN, J. L.; SCHJØNNING, P.; WATTS, C. W.; CHRISTENSEN, B. T.; PELTRE, C.; MUNKHOLM, L. J. Relating soil C and organic matter fractions to soil structural stability. **Geoderma**, 337, 834-843, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.034>

MEDEIROS, A. D. S.; SOARES, A. A. S.; MAIA, S.; FERREIRA, M. SOIL CARBON STOCKS AND COMPARTMENTS OF ORGANIC MATTER UNDER CONVENTIONAL SYSTEMS IN BRAZILIAN SEMI-ARID REGION. **Revista Caatinga**, 35, 697-710, 2022. <https://doi.org/10.1590/1983-21252022v35n321rc>

OLIVEIRA, S. P.; CÂNDIDO, M. J. D.; WEBER, O. B.; XAVIER, F. A. S.; ESCOBAR, M. E. O.; OLIVEIRA, T. S. Conversion of forest into irrigated pasture I. Changes in the chemical and biological properties of the soil. **Catena**, 137, 508-516, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.017>

OLIVEIRA FILHO, E. G. D.; MEDEIROS, J. C.; ROSA, J. D.; SOUZA, H. A.; DEON, D. S.; MADARI, B. E. Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions in Savannah agrosystems. **Australian Journal of Crop Science**, 14(12), 1970-1976, 2020. <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.801199149292133>

OLIVEIRA, A. D. D.; RIBEIRO, F. P.; FERREIRA, E. A. B.; MALAQUIAS, J. V.; GATTO, A.; ZUIM, D. R.; CARVALHO, A. M. D. CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes from planted forests and native Cerrado ecosystems in Brazil. **Scientia Agricola**, v. 78, 2020. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2018-0355>

OLIVEIRA, A. D.; RIBEIRO, F. P.; FIGUEIREDO, C. C.; MULLER, A. G.; MALAQUIAS, J. V.; SANTOS, I. L.; CARVALHO, A. M. Effects of soil management, rotation and sequence of crops on soil nitrous oxide emissions in the Cerrado: A multi-factor assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 348, 119295, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119295>

SHANG, Z.; ABDALLA, M.; XIA, L.; ZHOU, F.; SUN, W.; SMITH, P. Can cropland management practices lower net greenhouse emissions without compromising yield?. **Global Change Biology**, 27(19), 4657-4670, 2021. <https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1111/gcb.15796>

SANTOS, I. L.; OLIVEIRA, A. D.; FIGUEIREDO, C. C.; MALAQUIAS, J. V.; SANTOS, J. D. D. G.; FERREIRA, E. A. B.; CARVALHO, A. M. Soil N<sub>2</sub>O emissions from long-term agroecosystems: Interactive effects of rainfall seasonality and crop rotation in the Brazilian Cerrado. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 233, 111-120, 2016. <https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.agee.2016.08.027>

SIGNOR, D.; CERRI, C.E.P. Nitrous oxide emissions in agricultural soils: a review. **Pesquisa Agropecuária Tropical** v. 43, p. 322-338, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1983-40632013000300014>

SIGNOR, D.; MEDEIROS, T. A. F.; MORAES, S. A. D.; CORRÊA, L. C.; TOMAZI, M.; MOURA, M. S. B. D.; DEON, M. Soil greenhouse gases emissions in a goat production system in the Brazilian semiarid region. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 52, 2022. <https://doi.org/10.1590/1983-40632022v5272371>

SHUMBA, A.; CHIKOWO, R.; CORBEELS, M.; SIX, J.; THIERFELDER, C.; CARDINAEL, R. Long-term tillage, residue management and crop rotation impacts on N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions from two contrasting soils in sub-humid Zimbabwe. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 341, 108207, 2023. <https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.agee.2022.108207>

THANGARAJAN, R.; BOLAN, N. S.; TIAN, G.; NAIDU, R.; KUNHIKRISHNAN, A. Role of organic amendment application on greenhouse gas emission from soil. **Science of the Total Environment**, v. 465, p. 72-96, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.031>

TIMILSENA, Y. P.; ADHIKARI, R.; CASEY, P.; MUSTER, T.; GILL, H.; ADHIKARI, B. Enhanced efficiency fertilizers: a review of formulation and nutrient release patterns. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. 6:1131-1142, 2015. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6812>

WANG, H.; ZHAO, R.; ZHAO, D.; LIU, S.; FU, J.; ZHANG, Y.; DING, H. Microbial-Mediated Emissions of Greenhouse Gas from Farmland Soils: A Review. **Processes**, v. 10, p. 2361, 2022. <https://doi.org/10.3390/pr10112361>

## 5. Considerações Finais

Devido ao exponencial aumento da população mundial, a necessidade de produção de alimentos e energia é cada vez maior, tornando crescente a demanda por fertilizantes nitrogenados, sendo os sintéticos causadores de diversos problemas ambientais, como o aumento do aquecimento global. Desta forma, é cada vez mais urgente o desenvolvimento de tecnologias ecologicamente corretas na produção agrícola, visto que em janeiro de 2024 marcou-se o oitavo mês consecutivo de recordes de temperatura na Terra, segundo anúncio de pesquisadores do observatório europeu Copernicus em 08/fevereiro de 2024.

Nessa pesquisa as informações a respeito da emissão de GEE revelam que a emissão de CO<sub>2</sub> não sofreu alterações em detrimento da espécie e do sistema de cultivo as quais foram submetidas (nas condições edáficas descritas), refutando em parte a hipótese de alterações na emissão de GEE, em particular o CO<sub>2</sub>. Entretanto, a emissão acumulada de N<sub>2</sub>O e de CH<sub>4</sub> apresentaram variação em suas emissões, sendo o cultivo do milho em rotação o sistema que apresentou uma emissão acumulada de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> negativo (consumo).

Em consideração ao aporte de nitrogênio atmosférico, o %N<sub>da</sub> foi mais elevado na cultura do feijão guandu, entretanto essa maior percentagem de fixação não resultou em maior quantidade de nitrogênio e biomassa nos dois anos de cultivo, refutando a hipótese de maior fixação de nitrogênio em cultivos consorciados de sorgo e milho com o feijão guandu do que seu cultivo solteiro.

## Anexo

**Tabela 14** - Datas de coleta de gases em diferentes sistemas de cultivo no município de Petrolina sertão de Pernambuco.

<b>Data</b>	<b>Sistema de cultivo/espécie</b>		<b>Data</b>	<b>Sistema de cultivo/espécie</b>	
15/02/2022	Solteiro	Milheto Feijão Guandu Sorgo	29/03/2022	Solteiro	Milheto Feijão Guandu Sorgo
	Consorcio	Milheto+Guandu Sorgo+Guandu		Consorcio	Milheto+Guandu Sorgo+Guandu
	Rotação	Milheto Sorgo		Rotação	Milheto Sorgo
23/02/2022	Solteiro	Milheto Feijão Guandu Sorgo	05/04/2022	Solteiro	Milheto Feijão Guandu Sorgo
	Consorcio	Milheto+Guandu Sorgo+Guandu		Consorcio	Milheto+Guandu Sorgo+Guandu
	Rotação	Milheto Sorgo		Rotação	Milheto Sorgo
28/02/2022	Solteiro	Milheto Feijão Guandu Sorgo	12/04/2022	Solteiro	Milheto Feijão Guandu Sorgo
	Consorcio	Milheto+Guandu Sorgo+Guandu		Consorcio	Milheto+Guandu Sorgo+Guandu
	Rotação	Milheto Sorgo		Rotação	Milheto Sorgo
08/03/2022	Solteiro	Milheto Feijão Guandu Sorgo	19/04/2022	Solteiro	Milheto Feijão Guandu Sorgo
	Consorcio	Milheto+Guandu Sorgo+Guandu		Consorcio	Milheto+Guandu Sorgo+Guandu
	Rotação	Milheto Sorgo		Rotação	Milheto Sorgo
16/03/2022	Solteiro	Milheto Feijão Guandu Sorgo	03/05/2022	Solteiro	Milheto Feijão Guandu Sorgo
	Consorcio	Milheto+Guandu Sorgo+Guandu		Consorcio	Milheto+Guandu Sorgo+Guandu
	Rotação	Milheto Sorgo		Rotação	Milheto Sorgo
22/03/2022	Solteiro	Milheto Feijão Guandu Sorgo	10/05/2022	Solteiro	Milheto Feijão Guandu Sorgo
	Consorcio	Milheto+Guandu Sorgo+Guandu		Consorcio	Milheto+Guandu Sorgo+Guandu

	Rotação	Milheto Sorgo		Rotação	Milheto Sorgo
17/05/2022	Solteiro	Milheto Feijão Guandu Sorgo	12/08/2022	Solteiro	Milheto Feijão Guandu Sorgo
	Consortorio	Milheto+Guandu Sorgo+Guandu		Consortorio	Milheto+Guandu Sorgo+Guandu
	Rotação	Milheto Sorgo		Rotação	Milheto Sorgo
25/05/2022	Solteiro	Milheto Feijão Guandu Sorgo	26/08/2022	Solteiro	Milheto Feijão Guandu Sorgo
	Consortorio	Milheto+Guandu Sorgo+Guandu		Consortorio	Milheto+Guandu Sorgo+Guandu
	Rotação	Milheto Sorgo		Rotação	Milheto Sorgo
02/06/2022	Solteiro	Milheto Feijão Guandu Sorgo	09/09/2022	Solteiro	Milheto Feijão Guandu Sorgo
	Consortorio	Milheto+Guandu Sorgo+Guandu		Consortorio	Milheto+Guandu Sorgo+Guandu
	Rotação	Milheto Sorgo		Rotação	Milheto Sorgo
15/06/2022	Solteiro	Milheto Feijão Guandu Sorgo	23/09/2022	Solteiro	Milheto Feijão Guandu Sorgo
	Consortorio	Milheto+Guandu Sorgo+Guandu		Consortorio	Milheto+Guandu Sorgo+Guandu
	Rotação	Milheto Sorgo		Rotação	Milheto Sorgo
07/07/2022	Solteiro	Milheto Feijão Guandu Sorgo	01/11/2022	Solteiro	Milheto Feijão Guandu Sorgo
	Consortorio	Milheto+Guandu Sorgo+Guandu		Consortorio	Milheto+Guandu Sorgo+Guandu
	Rotação	Milheto Sorgo		Rotação	Milheto Sorgo
21/07/2022	Solteiro	Milheto Feijão Guandu Sorgo			
	Consortorio	Milheto+Guandu Sorgo+Guandu			
	Rotação	Milheto Sorgo			