

**UFRRJ**

**INSTITUTO DE AGRONOMIA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO E AGRONOMIA**

**CIÊNCIA DO SOLO**

**DISSERTAÇÃO**

**Ciclagem de Nitrogênio em Pastagens Tropicais  
Consorciadas com Leguminosa Forrageira ou  
Fertilizadas com Nitrogênio**

**João Guedes Borré**

**2023**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA  
CIÊNCIA DO SOLO**

**CICLAGEM DE N EM PASTAGENS TROPICAIS CONSORCIADAS  
COM LEGUMINOSA FORRAGEIRA OU FERTILIZADA COM N**

**JOÃO GUEDES BORRÉ**

*Sob a Orientação do Professor*  
**Segundo Sacramento Urquiaga Caballero**

*e Coorientação do Pesquisador*  
**Bruno Grossi Costa Homem**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, Área de Concentração em Manejo do Solo e Qualidade Ambiental.

Seropédica, RJ  
Setembro de 2023

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada  
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B737c      Borré, João Guedes, 1995-  
Ciclagem de N em pastagens tropicais consorciadas com leguminosa forrageira  
ou fertilizada com N/João Guedes Borré. – Seropédica, 2023.  
47 f.: il.

Orientador: Segundo Sacramento Urquiaga Caballero.  
Tese (Doutorado). -- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro,  
Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo, 2023.

1. Ciclagem de nutrientes. 2. Adubação nitrogenada. 3. Consórcio. 4. Liteira. 5.  
Excretas de animais. I. Caballero, Segundo Sacramento Urquiaga, 1967-, orient.  
II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Agronomia - Ciência do Solo.  
III. Título.

**O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de  
Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.**

É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte.



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA  
(CIÊNCIAS DO SOLO)**



**HOMOLOGAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO Nº 13 / 2024 - CPGACS (12.28.00.00.00.27)**

**Nº do Protocolo: 23083.060996/2023-30**

**Seropédica-RJ, 12 de setembro de 2023.**

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – CIÊNCIA DO SOLO**

**JOÃO GUEDES BORRÉ**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, Área de Concentração em Biologia do Solo.

TESE APROVADA EM 12/09/2023.

Segundo Sacramento Urquiaga Caballero. Dr. Embrapa Agrobiologia  
(Orientador)

Adelson Paulo de Araújo. Dr. UFRRJ  
Daniel Rume Casagrande. Dr. UFLA

*(Assinado digitalmente em 14/09/2023 11:24)*  
ADELSON PAULO DE ARAUJO  
*PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR*  
DATS (11.39.00.35)  
Matrícula: 1104775

*(Assinado digitalmente em 08/11/2023 13:25)*  
SEGUNDO SACRAMENTO URQUIAGA CABALLERO  
*ASSINANTE EXTERNO*  
CPF: 058.898.198-28

*(Assinado digitalmente em 12/09/2023 20:09)*  
DANIEL RUME CASAGRANDE  
*ASSINANTE EXTERNO*  
CPF: 310.228.088-93

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **66**, ano: **2023**, tipo: **HOMOLOGAÇÃO DE TESE DE MESTRADO**, data de emissão: **12/09/2023** e o código de verificação: **5c055991d8**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a minha Mãe, Inês Braune Guedes Borré, que com força e coragem sozinha enfrentou grandes desafios para me proporcionar uma criação e educação dignas. Ao meu Padrinho, Admário Braune Guedes por ter estado ao meu lado em momentos difíceis, atuando como um dos maiores incentivadores ao meu progresso pessoal e profissional. Agradeço ao meu pai, Carlos Eduardo Ribeiro Borré, por instigar meu gosto pela leitura e pelos estudos.

Agradeço ao meu orientador Segundo Urquiaga pela confiança, ensinamentos e apoio prestados. Aos pesquisadores Bruno Alves e Robert M. Boddey pelas conversas e disponibilidade ao longo do estudo. Ao meu co-orientador, Bruno Homem pela troca de conhecimento e suporte na elaboração do experimento. Em especial ao Israel Oliveira Ramalho e Rafael Cassador pelas vivências e contribuições na parte prática e intelectual do estudo. Meus singelos agradecimentos ao Dr. Robert Macedo pelos ensinamentos, conversas e experiências trocadas, sua coragem e determinação em construir uma área experimental do princípio ao fim são características admiráveis em um professor. Ao Anderson, que sempre com determinação atuou na manutenção da área experimental. Aos alunos Wesley Souza e Stallone Soares pelo auxílio nas coletas. A todos os alunos que passaram pelo Laboratório de Ciclagem de Nutrientes em Pastagens Tropicais e contribuíram para o experimento.

A todos os funcionários da UFRRJ e Embrapa Agrobiologia que contribuíram para esse trabalho. Em especial ao Dr. Renato Moutinho e Dra. Eliane Carollo e Roberto Gregio do Laboratório de Isótopos Estáveis John Day. A Dra. Andreia Loviane do Laboratório de Cromatografia Gasosa, ao Eder, Ednelson, Altiberto e Selmo do Laboratório de Química Agrícola e ao técnico de campo Alderi.

A Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) que me proporcionou inúmeras vivências e me permitiu adquirir o título de Engenheiro Agrônomo.

Ao programa de Pós Graduação em Agronomia – Ciência do Solo (PPGA-CS).

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), pela concessão da bolsa, que possibilitou meu ingresso no mestrado.

Ao Procisur, Fontagro e MIP Nova Zelandia, cujos recursos aportados por meio do projeto "Intensificación sostenible de sistemas ganaderos con leguminosas: Plataforma de Cooperación Latinoamericana y del Caribe" contribuíram para a execução desta dissertação.

## RESUMO

BORRÉ, João Guedes. **Ciclagem de N em pastagens tropicais consorciadas com leguminosa forrageira ou fertilizada com N.** 2023. 47f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.

O declínio da produtividade de pastagens é um processo recorrente nas regiões tropicais. O caráter extensivo da criação animal a pasto aliado à reposição escassa de nitrogênio (N), favorecem o processo de degradação de pastagens. A integração de leguminosas, com sistema eficiente em fixação biológica de N<sub>2</sub> (FBN), nas pastagens de gramíneas é uma alternativa promissora para recuperação de pastagens degradadas. Esse estudo teve como objetivo comparar a ciclagem de N em pastagens de *Urochloa spp.* consorciadas com leguminosa ou fertilizadas com N. O experimento foi conduzido na área experimental do Instituto de Zootecnia da Universidade Federal Rural Rio de Janeiro no município de Seropédica, durante dois anos (2021 e 2022) divididos em duas estações, Águas e Seca. O delineamento utilizado foi em blocos ao caso com três tratamentos e quatro repetições, cada parcela correspondente a um piquete de 1 ha. Os tratamentos foram: *Urochloa brizantha* cv Marandu fertilizada com 138 kg de N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (N-fert); *Urochloa brizantha* cv Marandu com *Macrotyloma axillare* cv. Java (Consórcio); *Urochloa brizantha* cv Marandu não fertilizada com N (Controle). Os animais foram mantidos sob lotação contínua com taxa de lotação variável e a oferta de forragem foi adotada como critério de manejo do pastejo. A presença da leguminosa favoreceu o estoque de N total na massa de forragem, sendo que no Consórcio o N estocado na biomassa foi similar ao do pasto fertilizado. O manejo do N não afetou a liteira existente (LE) e o estoque de N na LE. No N-Fert foi constatada maior taxa de deposição de liteira (LD;  $p = 0,0003$ ), contudo a proporção de N ciclado pela LD foi 33,5 e 45,8% maior no Consórcio em relação ao N-Fert e Controle, respectivamente ( $p < 0,0001$ ). Tanto a LE como LD na base de Matéria Orgânica apresentaram maiores valores na Seca, em vista da maior taxa de senescência da parte aérea da planta. O N aplicado no sistema não atuou como fator determinante na decomposição da liteira. Fatores ambientais como temperatura e precipitação aumentaram a velocidade de decomposição da liteira no período das Águas. A contribuição da FBN seguiu o mesmo padrão de comportamento que a massa de leguminosa ao longo do experimento, indicando valores superiores nas Águas em relação a Seca. Valores semelhantes referentes a ingestão e excreção de N, por animal, foram encontrados entre tratamentos. A maior excreção de N por área foi observada no N-Fert ( $p = 0,010$ ), provavelmente pelo aumento na lotação animal. Em geral, foi constatado um balanço positivo de N no sistema solo-planta-animal nos tratamentos N-Fert e Consórcio, sendo 106 e 132 kg N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, respectivamente. De maneira contrária, as pastagens sem fertilização nitrogenada evidenciaram balanço negativo de N de -27 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Esses resultados sugerem que o *input* através da fertilização nitrogenada ou do consórcio com *Macrotyloma* no pasto exercem grande influência na manutenção das reservas de N no solo.

**Palavras-chave:** Ciclagem de nutrientes. Adubação nitrogenada. Consórcio. Liteira. Excretas de animais.

## ABSTRACT

BORRÉ, João Guedes. **Nitrogen cycling in tropical pastures mixed with forage legume or fertilized with nitrogen.** 2023. 47p. Dissertation (Master in Agronomy, Soil Science). Instituto de Agronomia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.

The decline in pasture productivity is an increasingly recurrent process in tropical regions. The extensive nature of animal husbandry on pasture, combined with scarce N replacement, favors the process of pasture degradation. In the current scenario, this phenomenon corresponds to the main limiting factor of Brazilian livestock production. The integration of legumes in pastures is the most promising alternative for recovering degraded pastures (RPD). By fixing atmospheric N<sub>2</sub>, these plants increase the input of N into the pasture, inhibiting the degradation process. This study aimed to compare N cycling in pastures of *Urochloa* spp. intercropped with legumes or fertilized with N. The experiment was carried out during two years divided into two seasons, Águas and Seca. The design used was a case-by-case block design with three treatments and four replications. The treatments were: *Urochloa brizantha* cv Marandu fertilized with 138 kg of N ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> (N-fert); *Urochloa brizantha* cv Marandu with *Macrotyloma axillare* cv. Java (Consortium); *Urochloa brizantha* cv Marandu not fertilized with N (Control). The animals were kept under continuous stocking with a variable stocking rate and forage supply (FO) was adopted as a grazing management criterion. The presence of the legume favored the stock of total N in the forage mass (MF, kg N ha<sup>-1</sup>), and in the Consortium it became equivalent to the N stored in the biomass of the fertilized pasture. N management did not affect existing litter (LE,) and N stock in LE (kg N ha<sup>-1</sup>). In N-Fert, a higher rate of litter deposition was observed (LD, kg ha day<sup>-1</sup>; p = 0.0003), however the proportion of N cycled by LD was 33.5 and 45.8% higher in Consortium compared to to N-Fert and Control, respectively (p < .0001). Both LE and LD on the basis of MO showed higher values in the Dry, in view of the higher rate of senescence in the aerial part of the plant. The N applied in the system did not act as a determining factor in litter decomposition. Environmental factors such as temperature and precipitation favored the rate of decomposition in the rainy season (p = 0.009). The contribution of Biological Nitrogen Fixation (BNF) followed the same behavior pattern as the legume mass throughout the experiment, indicating higher values in the Waters compared to the Dry, respectively. Similar values referring to N intake and excretion, per animal, were found between treatments. The highest N excretion per area (kg ha<sup>-1</sup> season<sup>-1</sup>) was observed in N-Fert (p = 0.010), probably due to the increase in animal stocking. In general, a positive N balance was observed in the soil-plant-animal system in the N-Fert and Consortium treatments, with 106 and 132 kg N ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>, respectively. Conversely, pastures without nitrogen fertilization showed a negative N balance of -27 kg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>. These results suggest that the input through nitrogen fertilization or intercropping with *Macrotyloma* in the pasture has a great influence on the maintenance of N reserves in the soil.

**Keywords:** Nutrient cycling. Nitrogen fertilization. Consortium. Litter. animal excreta.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Dados mensais de pluviosidade (mm) e temperatura (°C) de Seropédica-RJ, durante o período experimental. ....	10
<b>Figura 2.</b> Massa de gramínea, leguminosa e composição botânica em pastagens de capim-marandu fertilizadas com N ou não, ou consorciadas com <i>Macrotyloma axillare</i> cv. Java ao longo das estações do ano avaliadas no experimento. As barras de erros representam o erro padrão da média. ....	17
<b>Figura 3.</b> Abundância natural de $^{15}\text{N}$ da parte aérea de plantas referência e do <i>Macrotyloma axillare</i> cv. Java no decorrer de dois anos de experimento. As barras de erros representam o erro padrão da média. ....	23
<b>Figura 4.</b> Diagrama de ciclo anual do N em pastagens de capim-marandu fertilizadas com 138 kg N ha $\text{ano}^{-1}$ em lotação contínua. ....	28
<b>Figura 5.</b> Diagrama de ciclo anual do N em pastagens de capim-marandu em consorcio com <i>Macrotyloma Axillare</i> cv. Java em lotação contínua. ....	29
<b>Figura 6.</b> Diagrama de ciclo anual do N em pastagens de capim-marandu sem fertilização nitrogenada em lotação contínua. ....	30

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Caracterização química do solo realizada no início do período experimental. ....	11
<b>Tabela 2.</b> Características da massa de forragem (MF) e estoque de N na massa em pastagens de capim-marandu adubadas ou não com 138 kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> de N ou em consórcio com <i>Macrotyloma axillare</i> cv. Java em relação as estações do ano durante dois anos experimentais.....	18
<b>Tabela 3.</b> Dinâmica da liteira existente (LE) em pastagens de capim-marandu adubadas ou não com 138 kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> de N ou em consórcio com <i>Macrotyloma axillare</i> cv. Java ao longo das estações do ano, durante dois anos experimentais. ....	20
<b>Tabela 4.</b> Dinâmica da deposição de liteira, taxa de decomposição (valor k) e quantidade de N ciclado pelas pastagens de capim-marandu fertilizadas ou não com 138 kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> de N ou em consórcio com <i>Macrotyloma axillare</i> cv. Java ao longo das estações do ano, durante dois anos experimentais.....	22
<b>Tabela 5.</b> Aspectos relacionados à leguminosa em pastagens de capim-marandu em consórcio com <i>Macrotyloma</i> ao longo das estações do ano, durante dois anos experimentais.....	24
<b>Tabela 6.</b> Consumo de matéria seca (CMS) e nitrogênio (N) pelos animais em pastagens de capim-marandu fertilizadas ou não com 138 kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> ou em consórcio com <i>Macrotyloma axillare</i> cv. Java ao longo das estações do ano, durante dois anos experimentais.....	25
<b>Tabela 7.</b> Excreção de N quanto ao tipo de excreta animal pelos animais em pastagens de capim-marandu fertilizadas ou não com 138 kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> ou em consórcio com <i>Macrotyloma axillare</i> cv. Java ao longo das estações do ano, durante dois anos experimentais.....	26

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	3
2.1 A Pecuária Brasileira .....	3
2.2 Entrada de N em Pastagens.....	3
2.3 Persistência das Leguminosas.....	6
2.4 Dinâmica de Deposição e Decomposição da Liteira e Ciclagem via Excretas.....	7
2.5 Fixação Biológica de Nitrogênio .....	8
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	10
3.1 Descrição da Área .....	10
3.2 Determinações .....	12
3.2.1 Massa de forragem .....	12
3.2.2 Dinâmica de ciclagem via liteira.....	12
3.2.3 Consumo de forragem.....	13
3.2.4 Fixação biológica de nitrogênio (FBN) .....	14
3.2.5 Excreção de N pelos animais .....	15
3.2.6 Balanço de N no sistema .....	15
3.3 Análises Estatísticas.....	16
4. RESULTADOS .....	17
4.1 Massa de Forragem .....	17
4.2 Liteira Existente .....	19
4.3 Liteira Depositada, Taxa de Decomposição e Tempo de Meia-Vida .....	21
4.4 Nitrogênio Derivado da Atmosfera e Contribuição da FBN .....	23
4.5 Consumo de Forragem e N pelo Animal .....	24
4.6 Excreção de Nitrogênio .....	24
4.7 Ciclagem e Balanço Total do N .....	27
5. DISCUSSÃO .....	31
5.1 Como o Input de N Via Adubação ou FBN Afeta a Estrutura do Dossel e o Estoque de N na Massa de Forragem? .....	31
5.2 Como o Input de N Via Adubação ou FBN Afeta a Dinâmica de Ciclagem Via Liteira? .....	32
5.3 Potencial de FBN pela <i>Macrotyloma</i> .....	34
5.4 Como o Input de N Via Adubação ou FBN Afeta o Consumo e a Excreção de N?.....	35
6. CONCLUSÕES .....	38
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	39

## 1. INTRODUÇÃO

A pecuária brasileira em sua grande maioria é caracterizada por baixos índices zootécnicos, apresentando lotação animal média de aproximadamente 1 unidade animal por hectare (1 UA, equivale a um animal de 450 kg de peso corporal) (MARTHA; ALVES; CONTINI, 2012). O histórico de implantação de pastagens no Brasil decorreu, predominantemente, com o uso de gramíneas de origem africana, principalmente do gênero *Brachiaria spp*, em áreas marginais, com baixa fertilidade e raramente fertilizadas com nitrogênio (N) (JANK et al., 2014). A falta de reposição de nutrientes na pastagem causa um desbalanceamento nas rotas de transferência do N entre componentes do sistema solo-planta-animal (BODDEY et al., 2004). Nesse cenário, a principal via de disponibilização de nutrientes ocorre pela mineralização da matéria orgânica do solo (MOS), reduzindo gradativamente a fertilidade natural desses locais (APOLINÁRIO et al., 2014a).

Existem diversos motivos que desencadeiam o declínio da produção animal a pasto, no qual podem estar relacionados a fenômenos naturais ou de ação antrópica. Secas prolongadas, erosão eólica e pluvial, ocorrência de geadas, elevadas taxas de lotação, falta de reposição de nutrientes via adubação, excesso de queimadas, ataque de pragas e doenças e a escolha equivocada da espécie forrageira, são alguns exemplos (ZHOU; LI; YUE, 2020). Desse modo, o principal entrave para o aumento da eficiência de produção em sistemas a pasto no Brasil está associado ao processo de degradação de pastagens. O Brasil possui aproximadamente 160 milhões de hectares ocupados por pastagens, todavia cerca de 55% desse território encontra-se em algum grau de degradação (LAPIG, 2022a).

Diante do aumento da demanda de produtos de origem animal pelo incremento crescente da população mundial, surge a necessidade da intensificação dos sistemas agropecuários, tendo como prioridade a recuperação de pastagens degradadas (RPD; MUIR; PITMAN; FOSTER, 2011). Técnicas rotineiras de RPD em monocultura de gramíneas comumente envolvem o uso da fertilização nitrogenada, que está diretamente associada ao aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEEs) (BERNARDINO DE CARVALHO; DE ZEN, 2017). Com isso, o desenvolvimento de estratégias sustentáveis para reposição de nutrientes no solo é fundamental para redução dos impactos ambientais relacionados às técnicas normalmente utilizadas (BARCELLOS et al., 2005).

Além disso, a reposição de nutrientes pelo uso de fertilizantes nitrogenados em pastagens é dificilmente exercida com êxito, principalmente em regiões tropicais. Por possuir alta mobilidade no solo, o N está suscetível a diversas reações que podem levar à sua perda. Desse modo, a eficiência da aplicação do fertilizante no sistema muitas vezes é baixa, tornando o manejo desse elemento mais complexo em relação aos demais nutrientes (VENDRAMINI; DUBEUX JÚNIOR; SILVEIRA, 2014). Além disso, a baixa utilização de fertilizantes nitrogenados nas pastagens brasileiras está majoritariamente associada ao elevado preço desses produtos no mercado agropecuário (DUBEUX et al., 2007). Assim, os fertilizantes nitrogenados podem gerar diversos impactos ambientais na fase industrial e na utilização agrícola. Uma das alternativas para reduzir as emissões de GEEs e aumentar a eficiência do uso do N é a combinação de leguminosas forrageiras com gramíneas em pastagens.

Diversos são os benefícios associados à introdução de leguminosas em pastagens. Através da fixação do N<sub>2</sub> atmosférico (FBN), essas plantas são capazes de aumentar o *input* de N no solo. A mineralização do material depositado associada a rotas que transcorrem em subsuperfície possibilitam a transferência do N da leguminosa para a gramínea (THILAKARATHNA et al., 2016). Além de um notável incremento de proteína na dieta dos animais, metabólitos secundários presente nas leguminosas, tais como saponinas e taninos, podem atuar no metabolismo do N no animal, reduzindo a quantidade de N excretado na urina,

e consequentemente, diminuindo as emissões de óxido nitroso das excretas ( $N_2O$ ) (MUELLER-HARVEY et al., 2019). Além disso, aspectos qualitativos do material senescente depositado pelas leguminosas contribuem para o aumento da população e diversidade de microrganismos no solo, favorecendo a decomposição da liteira (SILVA et al., 2012). Contrariamente, gramíneas tropicais em monocultura sem adubação com N depositam material senescente com alta relação C/N e teor de lignina elevado, que limitam a decomposição da liteira e favorecem a imobilização de nutrientes no pasto (APOLINÁRIO et al., 2014b).

Através do pastejo, os animais convertem os nutrientes estocados na parte aérea da pastagem em carcaça e excretas, alterando as rotas e a eficiência com que o N retorna para o solo (HOMEM et al., 2021b). A utilização de excretas como fonte de nutrientes demonstra ineficiência no desenvolvimento vegetativo do pasto, muitas vezes ligado a heterogeneidade de distribuição das mesmas (BODDEY et al., 2004). Além disso, a elevada concentração de formas altamente lábeis de N associados à dinâmica de deposição das excretas, principalmente com deposição de urina, favorecem reações de perda do N no solo (LESSA et al., 2014). Nesse sentido, a deposição de material senescente de tecidos vegetais atua de maneira mais homogênea e leniente, reduzindo reações que levam à perda do N. Com isso, maior eficiência na ciclagem de N em pastagens tropicais é atribuída a deposição de liteira (BODDEY et al., 2020).

O entendimento sobre a dinâmica do N em pastagens com diferentes formas de *input* deste nutriente possibilita o desenvolvimento de técnicas e estratégias de manejo que exerçam maior influência no aproveitamento do N ciclado no sistema (DUBEUX et al., 2007). Nós hipotetizamos que a introdução da leguminosa *Macrotyloma axillare* cv. Java em pastagens de *U. brizhanta* cv. Marandu aumenta o *input* de N na proporção equivalente a 138 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de N na forma mineral.

Desse modo, o estudo tem por objetivo avaliar os efeitos do *input* de N via *Macrotyloma axillare* cv. Java em pastagens formadas por *U. brizhanta* cv. Marandu ou fertilizadas com 139 kg de N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> sob a ciclagem de N via liteira e excretas, consumo de N e balanço de N no sistema solo-planta-animal sob lotação contínua.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 A Pecuária Brasileira**

A pecuária de corte ocorre nas mais variadas regiões do Brasil, desempenhando um papel relevante na economia do país (BERNARDINO DE CARVALHO; DE ZEN, 2017). Essa atividade no ano de 2020 representou cerca de 10% da contribuição total para o PIB do agronegócio nacional, reafirmando assim sua importância para o país (ABIEC, 2021).

O Brasil é composto por uma vasta extensão territorial, com clima adequado para o crescimento de forrageiras tropicais (BARCELLOS et al., 2005). Dessa maneira, a pecuária de corte foi desenvolvida majoritariamente com o gado criado a pasto. Muitas vezes, os pastos foram formados após a derrubada e queima de mata nativa e semeadura da forrageira sob as cinzas dos resíduos florestais (DIAS-FILHO, 2014). A fertilidade alta dessas áreas após a queima, devido principalmente as cinzas depositadas no solo após o desmatamento, criava uma falsa ideia de que pastagens poderiam ser mantidas produtivas por longo período sem a reposição de nutrientes e o emprego de insumos. Nesse sentido, tornou-se cada vez mais frequente o declínio da produtividade dessas áreas, desencadeando um processo de degradação de pastagens. Na atualidade, em torno de 55% das pastagens brasileiras encontram-se em algum estágio de degradação (LAPIG, 2022a). A redução da disponibilidade de nutrientes no solo ao longo do tempo afeta negativamente o vigor das forrageiras cultivadas. Dessa maneira, espécies invasoras menos exigentes em fertilidade de solo prevalecem na área. Com o avanço da degradação, áreas compactadas e com solo exposto são cada vez mais frequentes, chegando a processos mais avançados de degradação, como erosões. Com isso, a capacidade de suporte das pastagens é reduzida, prejudicando a produtividade (DIAS-FILHO, 2005). Nesse sentido, a pecuária brasileira é afetada negativamente, sendo caracterizada por baixos índices zootécnicos, principalmente quando comparados ao potencial produtivo que o país poderia alcançar (CEZAR et al., 2005).

Pastagens degradadas comprometem a produtividade forrageira e consequentemente o acúmulo de carbono (C) no solo (DE FIGUEIREDO et al., 2017). Desse modo, a produtividade animal é caracterizada por uma baixa eficiência, favorecendo a emissão de gases do efeito estufa, uma vez que menor unidade de produto é gerado por área. Nessa ótica, a degradação de pastagens é o principal fator limitante da produtividade da pecuária no Brasil. A recuperação de pastagens degradadas (RPD) atua como a principal estratégia para aumentar a produtividade da pecuária brasileira sem aumentar o território ocupado por pastagens (ASSIS et al., 2020). Intensificando a produção em áreas já existentes, a pressão para conversão de áreas de mata nativa em pastagens é reduzida. Além disso, a RPD possui a capacidade de converter sistemas potencialmente poluidores em agentes mitigadores de GEE. Pastagens produtivas promovem maior sequestro de C atenuando o aquecimento resultante do efeito estufa (CARDOSO et al., 2016).

### **2.2 Entrada de N em Pastagens**

A técnica mais comum e utilizada para aumentar o ritmo de crescimento de plantas forrageiras consiste no uso de adubos nitrogenados (FAGUNDES et al., 2006; SOLLENBERGER; NEWMAN; VENDRAMINI, 2015). Os adubos nitrogenados sintéticos são, sem dúvida, a forma de *input* de N mais frequentemente utilizada por pecuaristas em sistemas de produção intensivo. O N exerce funções fundamentais para a manutenção do metabolismo das plantas, sendo o elemento requerido em maior quantidade para o crescimento vegetal (TAIZ; ZEIGER, 2006). Entretanto, esses fertilizantes além de onerosos, são também uma fonte de moléculas que contribuem para o efeito estufa. A dinâmica do N na natureza

favorece a perda de grande parte do nutriente aplicado, o que reduz consideravelmente seu aproveitamento pelas espécies vegetais. Além disso, em regiões tropicais, com clima caracterizado por altas temperaturas e precipitações, rotas de perda desse elemento começam a ser favorecidas (CANTARELLA et al., 2008).

A produção de amônia ( $\text{NH}_3$ ) e emissão de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) do solo são alguns exemplos de perdas de N. O  $\text{N}_2\text{O}$  possui poder de aquecimento global 273 vezes mais que o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), tornando-se um protagonista no favorecimento do efeito estufa no planeta (VENDRAMINI et al., 2007; IPCC, 2019). Outro ponto importante de se destacar é que o processo Haber-Bosch para produção de fertilizantes nitrogenados libera em média 0,58 mol de  $\text{CO}_2$  para cada mol de N produzido, e quando somado com o transporte e aplicação desses adubos, esse valor chega a 1,4 mol de  $\text{CO}_2$  liberados para atmosfera. Isso significa que, para cada 100 kg  $\text{ha}^{-1}$  de N aplicado, 450 kg de  $\text{CO}_2 \text{ ha}^{-1}$  são liberados para atmosfera (ROBERTSON; GRACE, 2004). Além disso, a lixiviação do nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), principalmente em solos arenosos, pode ser fonte de contaminação do lençol freático e inviabilizar o uso dos recursos hídricos em toda uma região. Dessa maneira, estudos que visam desenvolver alternativas sustentáveis que substituam ou reduzam o uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos em pastagens são de extrema importância para redução de impactos ambientais.

A associação de gramíneas com leguminosas forrageiras é considerada uma das opções mais viáveis e sustentáveis para o aumento do *input* de N em sistemas de pastagens (GOMES et al., 2020). As leguminosas intensificam a ciclagem de N e aumentam o valor nutritivo da forragem ofertada (HOMEM et al., 2020c). Os tecidos vegetais de leguminosas possuem maior quantidade de proteína bruta (PB), no qual tem potencial de melhora do valor nutritivo da forragem colhida pelos animais (BARCELLOS, 2006). Particularmente, o maior valor nutritivo das leguminosas é relevante na estação seca, em que baixas precipitações e temperaturas afetam negativamente o desenvolvimento das gramíneas tropicais. Nesta estação, a renovação de componentes morfológicos da planta é comprometida, acarretando no acúmulo de material senescente no dossel. Essa situação eleva o teor de fibra da forragem, reduzindo a digestibilidade, e consequentemente, prejudicando o desempenho animal (BARCELLOS, 2008).

No que tange a ciclagem de N no sistema, as leguminosas quando associadas com bactérias presentes nos nódulos das raízes possuem a capacidade de converter o  $\text{N}_2$  atmosférico em  $\text{NH}_3^+$ , possibilitando a assimilação desse elemento (CADISCH; SYLVESTER-BRADLEY; NÖSBERGER, 1989). Através da senescência de componentes da parte aérea e das raízes, o N fixado na planta retorna para o solo. Microrganismos serão responsáveis por mineralizar esse material, permitindo que nutrientes sejam disponibilizados para as plantas (CHAPMAN et al., 2013; KOHMANN et al., 2018). Espécies vegetais que realizam a FBN intensificam a ciclagem do N ao sistema produtivo, principalmente em solos com baixa fertilidade (MUIR; PITMAN; FOSTER, 2011). Com isso, a capacidade de suporte de uma pastagem aumentará ao longo do ano, fazendo das leguminosas forrageiras uma alternativa promissora para redução do uso da adubação nitrogenada (CASAGRANDE, 2014).

A dinâmica com que o N é fornecido para o solo pelas leguminosas é diferente quando comparado com os fertilizantes nitrogenados. O adubo nitrogenado mais comumente utilizado no país é a ureia, no qual através da reação de hidrólise no solo, grande quantidade do N contido no grânulo do fertilizante é liberada rapidamente (BARTELEGA, 2018). Essa particularidade facilita perdas por volatilização de amônia, lixiviação de  $\text{NO}_3^-$  e desnitrificação causada por microrganismos do solo (CANTARELLA et al., 2008). Diante disso, é recomendado que a aplicação de N em pastagens seja feita de maneira escalonada (SALES et al. 2020). Por outro lado, as leguminosas fornecem N de maneira constante e de forma mais leniente durante sua permanência na área. Embora não proporcionem a mesma taxa de crescimento vegetal que os fertilizantes aplicados em altas doses, a melhora do valor nutritivo da forragem ofertada e

redução de gastos com insumos são inegáveis (HOMEM et al., 2020c). Essa situação, particularmente, é corroborada em experimentos que permitem a comparação de pastagens consorciadas com monoculturas de gramíneas adubadas ou não com N.

Em lotação rotativa, pastagens formadas por amendoim glabrata (*Arachis glabrata Benth*) consorciada com grama batatais (*Paspalum notatum Flügge*) proporcionaram aumento de aproximadamente 20 kg de N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> ciclado através da liteira. A deposição de tecidos ricos em N da leguminosa no sistema aumentou em 10% a taxa de decomposição da liteira nas pastagens consorciadas (KOHMANN et al., 2018). Isso ocorre basicamente por um aumento expressivo na diversidade e população de microrganismos, intensificando a decomposição do material (CHAPMAN et al., 2013). A formação de uma liteira mais rica em N intensifica a quantidade e a velocidade com que esse elemento retorna para o solo.

A participação da leguminosa na dieta animal surge como uma alternativa para aumento da produtividade animal em áreas com reduzido uso de insumos. Em experimento realizado num local de transição entre Mata Atlântica e Cerrados, foi avaliado o capim-marandu em consórcio com o amendoim forrageiro (*Arachis pintoi* cv. BRS Mandobi), ou em monocultura adubado ou não com 150 kg de N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (HOMEM et al., 2021c). Avaliações relacionadas ao consumo de forragem e desempenho animal foram realizadas durante 2,5 anos. Foi observado maior massa de forragem nos tratamentos que obtiveram *input* de N, seja através do consórcio ou do fertilizante mineral. Esse efeito foi marcante no verão e na primavera quando havia maior participação da leguminosa no dossel. O consumo de matéria orgânica (MO) foi similar para os diferentes tipos de pastagens, porém a quantidade de PB ingerida pelos animais aumentou, seja com a fertilização nitrogenada ou a presença do amendoim forrageiro. Além disso, redução dos níveis de fibras em detergente neutro (FDN) e melhora da digestibilidade da forragem foram encontrados com *input* de N. A maximização da produção animal está diretamente relacionada com o consumo de forragens nutritivas e com a digestibilidade do material ingerido (CHAPMAN et al., 2013). Dessa maneira, foi constatado também um aumento no ganho médio diário (GMD) e na produtividade animal por área nos tratamentos com *input* de N.

Na estação experimental do extremo sul da Bahia da CEPLAC, localizada sob o bioma Mata Atlântica, durante nove anos foi realizado um experimento sob lotação rotativa, comparando pastagens consorciadas e adubadas com N. Nas pastagens formadas pelo capim-marandu e o amendoim forrageiro (*Arachis pintoi* cv. Belomonte), na estação chuvosa do ano, a massa de forragem foi superior em relação ao capim-marandu fertilizado com 120 kg de N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Dessa maneira, em condições climáticas favoráveis ao desenvolvimento vegetal, o N fixado pelas leguminosas parece ter sido ligeiramente superior à dose do fertilizante aplicado. O aumento da oferta de forragem impactou diretamente na quantidade de animais que a pastagem suportou. Foi notório um aumento na taxa de lotação e no ganho de peso animal por área na pastagem consorciada quando comparada ao capim-marandu fertilizado com 120 kg de N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

O interesse nos efeitos benéficos que as leguminosas proporcionam no ambiente de pastagens vem sendo cada vez maior. Nos últimos anos, reuniões das Nações Unidas como a COP26 foram realizadas com o intuito de firmar acordos entre países para redução das emissões de GEE. O plano de Agricultura de Baixo Carbono (ABC) foi lançado no ano de 2010 após o acordo realizado pelo Brasil na COP15 em 2009. Na reunião foram discutidas estratégias para conservação dos recursos naturais do planeta. Desse modo, elaboraram-se metas para os países participantes relacionadas com a preservação de recursos naturais do planeta, com destaque para biodiversidade, e a mitigação das mudanças climáticas. O aumento do *input* de N no sistema através da FBN realizada pelas leguminosas juntamente com a recuperação de pastagens degradadas (RPD) são alguns dos projetos que possibilitam atingir as metas estabelecidas.

## 2.3 Persistência das Leguminosas

Para que as leguminosas proporcionem todos seus benefícios, o consórcio deve ser efetivamente estabelecido. Na escolha da leguminosa forrageira deve-se levar em consideração fatores que regulam sua persistência e participação na composição botânica do dossel. A resiliência, resistência e manejo são os principais aspectos que definem a capacidade da população de leguminosas persistirem quando combinadas com gramíneas (BODDEY et al., 2020). Torna-se necessário compreender que a arquitetura do dossel das pastagens consorciadas irá variar conforme a interferência de fatores bióticos (pragas e doenças) e abióticos (fogo, alagamento, seca prolongada, deficiência nutricional, etc.). Por isso, o objetivo almejado não deve ser a estabilidade desse dossel, mas sim a capacidade de recuperação e adaptação dessas plantas frente a condições adversas (CASAGRANDE, 2014). Em pastagens tropicais, a proporção estimada de leguminosa na massa de forragem para a caracterização de um dossel harmônico está entre 20 e 45% (THOMAS, 1992). O grau de compatibilidade de consórcios irá variar de acordo com a plasticidade das espécies envolvidas, sendo influenciada por fatores como: mecanismo de propagação, mecanismos de escape ao pastejo, longevidade das plantas, resistência ao pastejo e manejo do pastejo (BLACK et al., 2009). Por muito tempo, acreditou-se que leguminosas herbáceas de crescimento semi-ereto e volúvel seriam as únicas capazes de estabelecer um dossel harmônico com gramíneas tropicais. Suas características morfológicas favorecem a competição por luminosidade (MARASCHIN; MOTT, 1989). Posteriormente, verificou-se que leguminosas de crescimento estolonífero são superiores na persistência de consórcios (FISHER, 1996). O mecanismo de propagação possui grande influência na manutenção da população das espécies na pastagem, conferindo diferentes níveis de tolerância ao pastejo.

Plantas dos gêneros *Stylosanthes*, *Calopogonium*, *Pueraria*, *Centrosema* e *Neonotonia* possuem crescimento semi-ereto e volúvel, sendo essas leguminosas formadoras de coroa (BODDEY et al., 2020). A longevidade dessas espécies é de, em média, 3 a 4 anos, o que explica o sucesso de estabelecimento do consórcio nos primeiros anos de formação com intenso declínio de persistência posteriormente (ANDRADE et al., 2004). O meristema apical dessas plantas fica mais exposto por estar localizado em uma altura favorável à ação do pastejo pelos animais. Quando o meristema apical é removido, a planta é impedida de continuar seu desenvolvimento e senesce por inteiro. Dessa maneira, essas plantas mostram dificuldades em completar o ciclo reprodutivo para produzirem sementes e se propagarem (FAVERJON et al., 2017). Além disso, sementes depositadas no solo possuem uma taxa de germinação baixa, e mesmo quando germinadas, as plântulas dificilmente conseguem se desenvolver por uma baixa capacidade de competição pela luminosidade (CASAGRANDE, 2014).

Leguminosas forrageiras de propagação clonal podem apresentar hábito de crescimento estolonífero ou rizomatoso. Plantas do gênero *Arachis* e *Grona* se propagam vegetativamente, caracterizando um alto potencial de combinação com gramíneas tropicais (HOMEM et al., 2019). Assim, cada nó é capaz de emitir novas raízes e ramos secundários, dando origem a novos indivíduos. Dessa maneira, não é necessário completar o ciclo reprodutivo para propagação, elevando seu nível de persistência na área (ANDRADE; ASSIS; FERREIRA, 2015). No caso da retirada do meristema apical pelo pastejo, o desenvolvimento do indivíduo não será totalmente prejudicado, conferindo alta capacidade de voltar a sua condição original, ou seja, alta resiliência (CASAGRANDE, 2014). Uma interessante característica de algumas cultivares com esse hábito de crescimento é a emissão de novas ramificações e redução da área foliar quando condicionadas a um pastejo intenso. Esse efeito aumenta a interceptação luminosa das folhas, elevando a taxa fotossintética e a produção de biomassa, o que indica alta adaptação dessas plantas estoloníferas a condições adversas, definida como plasticidade (BLACK et al., 2009).

## 2.4 Dinâmica de Deposição e Decomposição da Liteira e Ciclagem via Excretas

De maneira geral, os nutrientes retornam ao solo em maior proporção pelo processo de deposição e decomposição da liteira e pelas excretas dos animais. A liteira é a rota de ciclagem mais relevante para manutenção da produtividade das pastagens (REZENDE et al., 1999). Características como quantidade e qualidade da liteira depositada na superfície do solo influenciam diretamente nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (DUBEUX et al., 2006). A dinâmica da deposição de tecidos senescentes em pastagens é regulada, majoritariamente, por fatores ambientais, fornecimento de nutrientes e manejo do pastejo (KOHMANN et al., 2019). Vale ressaltar que a liteira existente (LE) proporciona diversas características benéficas para o solo, como o favorecimento da retenção de água, controle da temperatura, redução da erosão, manutenção da microbiota e da fertilidade do solo (BODDEY, 1996).

As forrageiras em um ambiente de pastagem retiram nutrientes do solo que possibilitam seu desenvolvimento. Os animais consomem a parte aérea dessas plantas para suprir sua demanda nutricional e a maior parte dos nutrientes será excretada via fezes e urina. Uma fração desse material não selecionada ou remanescente após o pastejo irá senescer e será depositado na superfície do solo. Essas duas vias de ciclagem de nutrientes possuem atributos próprios que definem a sua eficiência (BODDEY, 2004). A senescência dos tecidos vegetais ocorre de maneira mais lenta e homogênea (DUBEUX et al., 2006). Os nutrientes contidos na liteira não estão disponíveis em primeiro momento, assim microrganismos precisam mineralizar esse material, possibilitando a disponibilização desses elementos no solo (CHAPMAN et al., 2013).

A fração não aproveitada dos nutrientes pelo animal é depositado no solo em forma de fezes e urina. As excretas animais disponibilizam nutrientes mais rapidamente no solo, tornando maior a probabilidade de perda por volatilização ou lixiviação devido ao fato que as excretas são depositadas em alta concentração em pequenas áreas (HAYNES; WILLIAMS, 1993). Em geral, a maioria das excretas são depositadas próximos a bebedouros ou em áreas de malhador dos animais. Nesses locais, pelo intenso pisoteio, o meristema apical das forrageiras é severamente danificado, prejudicando o crescimento das plantas. Dessa maneira, grande parte dos nutrientes fornecidos através das excretas animais não serão aproveitados pela pastagem (HAYNES; WILLIAMS, 1993).

A disponibilidade de nutriente ou mineralização da liteira dependerá da quantidade, composição química e taxa de decomposição do material depositado. A qualidade da liteira é influenciada pela composição botânica do pasto, estágio de desenvolvimento da planta, fertilidade do solo e uso de adubos (DUBEUX; SOLLENBERGER, 2020). O C e o N estão presentes em componentes estruturais das plantas, alguns com maior propensão à degradação (lábeis) e outros de caráter recalcitrante. A relação dessas moléculas influenciará diretamente na taxa de decomposição, que por sua vez, determinará a velocidade que os nutrientes retornarão ao sistema (COTRUFO et al., 2015). Um dos indicadores mais usados para determinação da qualidade da liteira é a relação C/N, que quando superior a 30 ocorre uma tendência de imobilização de nutrientes, enquanto abaixo desse valor a mineralização e disponibilidade será favorecida (DUBEUX; SOLLENBERGER, 2020). Em pastagens formadas por monocultura de gramíneas C<sub>4</sub>, essa relação C/N no material depositado é alta, sendo mais difícil de ser decomposto. A presença de moléculas recalcitrantes como lignina, celulose e hemicelulose, aliadas a elevadas relações C/N, contribuem significativamente para imobilização de N do solo, podendo ser um dos principais motivos para degradação de pastagens (ROBBINS; BUSHELL; MCKEON, 1989).

A qualidade da liteira pode ser determinada por uma série de análises como: C total, N total, fósforo (P), N insolúvel em detergente ácido (NIDA), lignina e polifenóis (THOMAS; ASAOKAWA, 1993). A relação C/N é mais comumente usada para caracterização da qualidade

do material. Contudo, essa análise não é suficiente para explicar a decomposição por um longo período de tempo, sendo preciso avaliar outras relações como lignina/N e lignina/NIDA (APOLINÁRIO et al., 2013). A relação C/N mostra a quantidade de carbono e nitrogênio total contidos na liteira, mas não a proporção das frações lábeis e recalcitrante desses elementos (BERG; MCCLAGHERTY, 2007). A lignina é um polímero extremamente amplo, com muitas ramificações e anéis aromáticos. Assim, a lignina é predominantemente localizada na parede celular das células vegetais, onde forma uma matriz ligada covalentemente a hemiceluloses e celuloses (KRISHNA e MOHAN; 2017). Essa estrutura e configuração fornece caráter recalcitrante para molécula, dificultando sua degradação (HAMMEL, 1997). Até os dias de hoje, as únicas rotas de degradação de lignina conhecidas são realizadas por fungos. Nessa ótica, é importante a quantificação dessa molécula no material orgânico para análise da velocidade de decomposição e imobilização de nutrientes (VENDRAMINI et al., 2007). Algumas técnicas de manejo podem ser utilizadas para estimular a mineralização de N, como a introdução de leguminosas ou aplicação de adubos nitrogenados (DUBEUX; SOLLENBERGER, 2020).

## 2.5 Fixação Biológica de Nitrogênio

A Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) é um recurso natural de grande importância para agropecuária (HERRIDGE et al., 2022). A quantificação do N<sub>2</sub> fixado possibilita um entendimento mais amplo do ciclo global do N, contribuindo para o desenvolvimento de práticas de manejo mais ecológicas e eficientes que visam aumentar a produtividade de alimentos em escala global (IANNETTA et al., 2016). Com a crescente demanda de proteína animal no planeta, é notório uma necessidade de intensificação dos sistemas produtivos.

Inicialmente por limitações metodológicas, foram encontradas dificuldades em quantificar o *input* de N via FBN, principalmente em ecossistemas naturais. Parte dessa situação pode ser atribuída à dificuldade do entendimento da relação entre os organismos fixadores e as variáveis ambientais como: umidade do solo, disponibilidade de nutrientes, competitividade entre espécies vegetais, sazonalidade, precipitações, temperatura, teor de carbono e acúmulo de N (BODDEY et al., 2000).

Ao longo dos anos, diversas técnicas foram elaboradas para mensuração da FBN em sistemas distintos de produção. Não existe um método ideal para mensuração desse processo, em vista que todas metodologias desenvolvidas possuem suas limitações e inconsistências (VALLES DE LA MORA et al., 2003). Por isso, torna-se interessante a combinação dos procedimentos para quantificação mais assertiva e confiável do N<sub>2</sub> fixado. Vale ressaltar a necessidade de uma análise prévia dos aspectos inerentes a cada espécie vegetal ou sistema produtivo a ser avaliado.

Em geral, as metodologias são divididas em três abordagens. A avaliação da fixação de N<sub>2</sub> pode ser obtida através da diferença no acúmulo líquido de N no sistema solo-planta. Ou por intermédio da quantificação das proporções do N contido na planta, no qual pode ser derivado do N disponível do solo ou da fixação do N<sub>2</sub>. A mensuração da atividade da enzima nitrogenase, também pode ser um bom indicador da manifestação e intensidade em que esse processo ocorre (UNKOVICH et al., 2005).

A fixação de N<sub>2</sub> em sistemas agrícolas ou pecuários (*in situ*) vem sendo mais amplamente determinada por técnicas associadas ao isótopo <sup>15</sup>N (UNKOVICH et al., 1994). Na natureza existem majoritariamente dois isótopos estáveis, o <sup>15</sup>N e o <sup>14</sup>N, sendo o segundo presente em maior quantidade. A abundância isotópica do <sup>15</sup>N é expressa em porcentagem (atom% <sup>15</sup>N) e ocorre de maneira constante na atmosfera na forma de N<sub>2</sub> com proporção de 0,3663 átomos % de <sup>15</sup>N. As variações da abundância de <sup>15</sup>N na natureza são quantificadas em unidades de δ, expressas em partes por milhar (%). Valores mais elevados de δ<sup>15</sup>N são

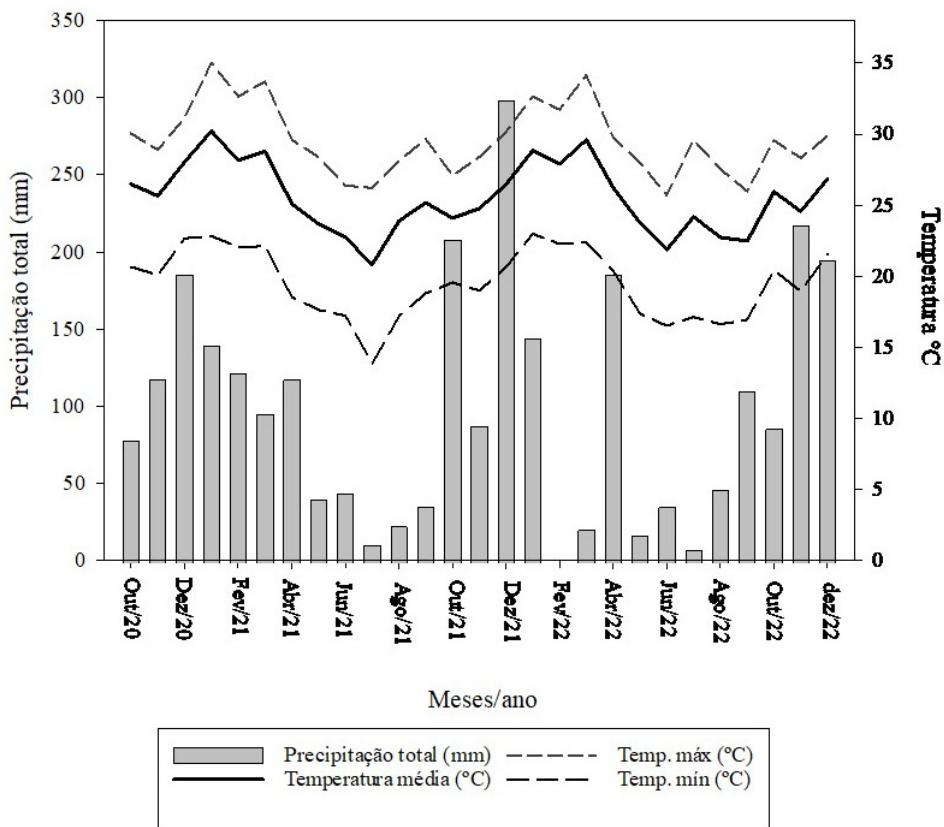
encontrados no solo, em decorrência dos processos de transformações e perda do N em processos como volatilização de NH<sub>3</sub>, desnitrificação, lixiviação, erosão e escoamento (BODDEY; KNOWLES, 1987). O princípio para utilização dos métodos isotópicos consiste na diferença da concentração de <sup>15</sup>N na atmosfera em comparação com o enriquecimento desse isótopo no N disponível no solo para as plantas.

As variações climáticas aliadas a características inerentes a cada tipo de solo parecem influenciar na marcação isotópica, evidenciando a complexidade das reações que envolvem o NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e o NH<sub>4</sub><sup>+</sup> disponíveis no ambiente. Desse modo, é necessário analisar o valor de δ<sup>15</sup>N no solo ou de plantas não-fixadoras (referência) que utilizam o solo como fonte única de N. Vale ressaltar que cada reação de transformação do N, no interior da planta, gera discriminação isotópica, resultando na diluição da abundância do <sup>15</sup>N, principalmente em partes mais distantes dos órgãos fixadores (nódulos). Por isso é fundamental utilizar a técnica do “valor B” para correção da diferença na concentração isotópica entre a parte aérea e as raízes da planta fixadora (BODDEY et al., 2000). Dessa maneira, torna-se possível calcular a proporção de N derivado do ar (Ndd% ) com maior confiabilidade. É recomendado que o critério de seleção utilizado na escolha de plantas referência seja atribuído à similaridade entre a área de solo explorada pelo sistema radicular de plantas fixadoras e não-fixadoras, principalmente em profundidade. As variações ambientais devido a sazonalidade influenciam no ciclo do N no ambiente e no metabolismo do N nas espécies vegetais, podendo diminuir a acurácia do método. Outro ponto é a necessidade de usar um espectrômetro de massa, o que torna as análises mais onerosas.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Descrição da Área

O estudo foi conduzido na área experimental do Departamento de Nutrição Animal e Pastagens (DNAP) do Instituto de Zootecnia (IZ) da Universidade Federal Rural Rio de Janeiro (UFRRJ) no município de Seropédica — RJ ( $22^{\circ}47'S$   $43^{\circ}41'10''O$ ) com altitude de 33 msnm. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Aw, caracterizado por estação chuvosa no verão, de novembro a abril, e nítida estação seca no inverno, de maio a outubro. A temperatura média anual é de  $24,5^{\circ}\text{C}$  e a precipitação média histórica anual é de 1.213 mm, com o período de seca nos meses de junho, julho e agosto, e excedentes hídricos em dezembro, janeiro e fevereiro (CRUZ, 2005). Desse modo, o experimento foi conduzido por dois anos nas estações Águas e Seca, durante os anos de 2021 e 2022. O período das Águas compreendeu o intervalo entre os meses de outubro a maio, e o período da seca foi representado entre os meses de junho e setembro. Os dados meteorológicos foram obtidos na estação experimental de Itaguaí/Pesagro, na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária que se localiza a 2,94 km da área experimental (Figura 1).



**Figura 1.** Dados mensais de pluviosidade (mm) e temperatura (°C) de Seropédica-RJ, durante o período experimental.

O solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo com transição para Planossolo (SANTOS et al., 2013) e o relevo é suave ondulado. A vegetação predominante na área era de gramíneas de baixo valor nutritivo, do gênero *Sporolobus*, com incidência de queimadas anuais. A análise da fertilidade do solo realizada no início do experimento está

descrita na Tabela 1. As análises de solo seguiram procedimentos padrão da Embrapa (CLAESSEN et al., 1997).

**Tabela 1.** Caracterização química do solo realizada no início do período experimental.

Profundidade	Al	Ca	H+Al	Mg	K	P	C	N	pH
		cmol dm <sup>-3</sup>		mg L <sup>-1</sup>			%		
0-20 cm	0,04	1,53	2,27	0,61	31,43	6,15	0,65	0,06	5,64
20-40 cm	0,34	0,77	2,78	0,27	13,29	3,70	0,44	0,04	5,14

A área experimental foi dividida em quatro blocos, no qual cada bloco foi dividido em três piquetes de aproximadamente um hectare. Em cada bloco, os três tratamentos foram distribuídos aleatoriamente:

- 1- *Urochloa brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) R.D. Webster cv Marandu fertilizada com 138 kg de N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (N-Fert).
- 2- *U. brizantha* cv Marandu consorciada com *Macrotyloma axillare* (E. Mey.) Verdc. cv. Java (Consórcio).
- 3- *U. brizantha* cv Marandu não fertilizada com N (Controle).

Em 2015, para estabelecimento da pastagem na área experimental, foram efetuadas arações e gradagens. O calcário dolomítico foi aplicado na dose de 1,5 Mg ha<sup>-1</sup> incorporado com revolvimento de solo para correção da acidez e neutralização do alumínio tóxico. Posteriormente 75 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de fosfato monoamônico foi aplicado para manutenção da fertilidade juntamente com 5,0 kg de sementes puras viáveis do capim-marandu com o auxílio de uma plantadora do tipo PHS3 (Tatu Marchesan, Matão, SP) acoplada no trator. Em 2020, nos piquetes consorciados, a semeadura do *M. axillare* foi realizada a lanço juntamente com a semente do capim-marandu na quantidade de 5 kg de sementes ha<sup>-1</sup>. Devido à baixa persistência dessa leguminosa no sistema, foi necessário realizar sobressemeadura realizada na época das Águas de 2021, além do fornecimento de sementes de *macrotyloma* misturadas no sal dos animais para ingestão e propagação por endozoocoria.

Em setembro de 2020, mais uma calagem na dose de 1 Mg ha<sup>-1</sup> em superfície foi realizada em todos os piquetes, e no mês de novembro do mesmo ano foram aplicados 34 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de super simples, junto com 60 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O na forma de cloreto de potássio. Anualmente, no tratamento N-Fert foi realizada a adubação nitrogenada de 138 kg ha<sup>-1</sup> de N, na forma de ureia e parceladas em duas doses, uma no início e outra no final do período das Águas. Anualmente, capinas manuais foram realizadas para controle de plantas espontâneas na área experimental.

Em maio de 2020 os animais foram introduzidos na área experimental para adequação ao manejo e mantidos nos piquetes sob lotação contínua com taxa de lotação variável durante o período experimental. Para cada ano, um lote de novilhos da raça Nelore foi utilizado. Os animais do primeiro ano utilizados foram animais com peso vivo médio inicial de aproximadamente 358 ( $\pm 8,5$ ) kg de peso corporal. Esse lote foi mantido na área de 06/06/2020 até 08/05/2022, com peso vivo médio no abate de aproximadamente 588 ( $\pm 10,7$ ) kg animal<sup>-1</sup>. Em maio de 2022, um segundo lote foi introduzido no experimento com peso vivo médio de aproximadamente 198 ( $\pm 7,5$ ) kg animal<sup>-1</sup>. A oferta de forragem verde (OF) foi adotada como critério de manejo do pastejo. A taxa de lotação animal foi regulada mensalmente para ajuste com a meta de OF almejada próxima a 3 kg de forragem verde kg peso corporal<sup>-1</sup> para cada tratamento. Os dados de pesagem dos animais e nas coletas de massa de forragem (MF) mensais possibilitaram o cálculo da OF. Dois animais traçadores foram utilizados por piquete. Quando

necessário para ajustar a OF, animais *put and take* foram adicionados ou removidos dos pastos (ALLEN et al., 2011). Água e suplementação animal foram fornecidas aos animais *ad libitum*.

### 3.2 Determinações

#### 3.2.1 Massa de forragem

As coletas para quantificação da massa de forragem nos diferentes tratamentos foram feitas com intervalo de 28 dias. Em cada piquete foram distribuídas seis molduras quadriculares, com área de 1 m<sup>2</sup> (1 x 1 m), e todo material contido dentro da moldura foi cortado a uma altura de 15 cm por intermédio de cutelos. Posteriormente, as amostras foram levadas para o laboratório, no qual foi feita a separação manual de componentes botânicos e morfológicos: massa de leguminosa (MLeg), massa de material verde da gramínea (MVGram) e material morto da gramínea (MMGram). A massa de forragem (MF) foi considerada como a soma das massas de gramínea e leguminosa, de acordo com o tratamento. A massa de gramínea (MGram) foi obtida pela soma da MVGram e MGram. A massa de forragem verde foi a soma da massa de gramínea e a de leguminosa sem a massa de material morto. Após a separação do material, subamostras foram retiradas, pesadas e levadas para estufa por 72 h a 65 °C. Em seguida, as amostras foram moídas no moinho de facas tipo Willey (Tecator, Herndon, VA) em peneiras de 2 mm. Mais uma moagem das amostras foi feita no moinho de rolos semelhante ao descrito por Arnold e Schepers (2004), para redução do tamanho de partícula da subamostra, permitindo a quantificação do N e C total no analisador elementar C-H-N (AOAC, 2000). O estoque de N na massa de forragem foi estimado utilizando a concentração de N na gramínea e leguminosa multiplicado pela massa seca dos respectivos componentes. O estoque total de N foi a soma dos estoques de N na gramínea e na leguminosa, de acordo com o tratamento. Os resultados foram apresentados como média por estação.

#### 3.2.2 Dinâmica de ciclagem via liteira

As avaliações de liteira se iniciaram em novembro de 2019 e foram avaliadas por dois anos. A taxa de decomposição foi estimada através da coleta da liteira existente e depositada (BRUCE; EBERSOHN, 1982). A cada 28 dias, foram marcados aleatoriamente seis pontos em cada piquete por intermédio de molduras retangulares de 0,5 m<sup>2</sup> (1 x 0,5 m). A coleta de toda liteira existente (LE) na superfície do solo em uma área de 0,5 m<sup>2</sup> foi realizada. Liteira foi considerada o material morto desprendido da planta na superfície do solo (Allen et al., 2011). Após 14 dias, nos mesmos pontos foi coletado todo o material depositado, chamada liteira depositada (LD). Em laboratório, as amostras frescas foram pesadas em balança de precisão. Das seis amostras de cada piquete, retirou-se subamostras que permaneceram na estufa por 72 h a 65 °C. Depois de secas, as subamostras foram pesadas para correção da umidade. Em seguida, foram feitas duas amostras compostas de cada piquete para serem moídas no moinho tipo Willey (Tecator, Herndon, VA) em peneiras de 2 mm. Após a secagem, a matéria seca (MS) de cada amostra foi determinada por secagem em estufa a 105 °C por 16 h (method 934.01; AOAC 2000). Para correção da contaminação de solo na liteira, foi realizada a determinação do teor de cinzas das amostras, através do processo de incineração em forno tipo Muffle por 4 h a 600 °C (method 942.05; AOAC, 2000) e todos os resultados foram expressos na base de matéria orgânica (MO). Os valores de LE e LD foram usados para cálculo da taxa de decomposição (“valor k”). As razões de nutrientes foram obtidas pela divisão das concentrações dos nutrientes e expressos na base de MO (g kg<sup>-1</sup> de MO). A LE e LD foram utilizadas para calcular a taxa de decomposição e foi usada a equação (Equação 1) descrita em Rezende et al. (1999):

$$k = \{\ln(LE_0 + LD_{14}) - \ln(LE_{28})\}/t \quad (1)$$

Onde,  $LE_0$  é a quantidade de liteira existente coletada no início do ciclo,  $LD_{14}$  é a quantidade de liteira depositada após 14 dias,  $LE_{28}$  é a quantidade de liteira existente no final do ciclo e  $t$  é o tempo de duração do ciclo (28 dias). A taxa de meia vida ( $t^{1/2}$ ) foi calculada de acordo com a equação (Equação 2) descrita em Rezende et al. (1999):

$$t^{1/2} = \ln(2)/k \quad (2)$$

Onde  $k$  é a taxa de decomposição ( $\text{g g}^{-1} \text{d}^{-1}$ ). A taxa de desaparecimento da liteira foi calculada pela equação (Equação 3) de Rezende et al., 1999:

$$\text{Desaparecimento da liteira} = (LE_0 + LD_{14}) - LE_{28} \quad (3)$$

Após a moagem das amostras no moinho de rolos semelhante ao descrito por Arnold e Schepers (2004), foi feita a determinação da concentração de C e N total da liteira através do analisador elementar C-H-N (AOAC 2000). No tratamento Consórcio, a proporção de gramínea e leguminosa contida na liteira foi estimada através da razão isotópica do  $C^{12}$  e  $C^{13}$  pela equação (Equação 4):

$$\% \text{leguminosa} = \frac{100 (\delta^{13}\text{C}_G - \delta^{13}\text{C}_{Le})}{(\delta^{13}\text{C}_G - \delta^{13}\text{C}_L)} \quad (4)$$

Em que %leguminosa é a proporção de C proveniente da leguminosa na liteira,  $\delta^{13}\text{C}_G$  é o valor da abundância do  $\delta^{13}\text{C}$  no material senescente da gramínea (-13,53%),  $\delta^{13}\text{C}_L$  é o valor da abundância do  $\delta^{13}\text{C}$  no material senescente da leguminosa (-28,37%) e  $\delta^{13}\text{C}_{Le}$  é o valor da abundância do  $\delta^{13}\text{C}$  na liteira do tratamento Consórcio.

Para as análises de  $\delta^{13}\text{C}$  nas amostras do tratamento Consórcio, as subamostras foram moídas a uma granulometria mais fina no moinho de rolos, possibilitando a análise de C total e abundância de  $\delta^{13}\text{C}$  usando o espectrômetro de massa de fluxo contínuo no Laboratório de Isótopos Estáveis “John Day” da Embrapa Agrobiologia.

### 3.2.3 Consumo de forragem

Amostras de pastejo simulado foram coletadas durante a avaliação do consumo de forragem pelos animais. Foram feitas três amostragens em dias consecutivos por estação em cada piquete, para quantificação do valor nutritivo da forragem (VRIES, 1995). A coleta das amostras foi realizada manualmente simulando o comportamento animal por um avaliador previamente treinado. No tratamento consorciado, foi feita a separação manual dos componentes botânicos das amostras coletadas. Posteriormente, as amostras foram levadas para estufa por 72 h a 65 °C.

O consumo de forragem foi estimado pela produção fecal e pela fibra em detergente neutro indigestível (FDNi). Os animais foram levados para o curral durante 10 dias consecutivos. A produção fecal foi estimada pela metodologia do dióxido de titânio ( $TiO_2$ ) como marcador externo (TITGEMEYER et al., 2001). Durante 10 dias, foi fornecido 10 g de  $TiO_2$  para cada animal. Foi necessário um período de adaptação de seis dias para que a quantidade do marcador excretada nas fezes seja constante. Posteriormente, amostras de fezes foram coletadas durante três dias diretamente no reto, sempre no mesmo horário. Posteriormente, as amostras de fezes foram secas em estufa de circulação forçada por 72 h a 65 °C, moídas no moinho de Willey de facas em peneiras de 2 e 1 mm. Em laboratório, a

concentração de TiO<sub>2</sub> nas amostras de fezes foi determinada pelo espectrofômetro de calorimetria (TITGEMEYER et al., 2001).

As amostras de fezes e pastejo simulado foram incubadas no rúmim de animais fistulados por 288 h, para determinação do FDNi (HUHTANEN et al. 1994). Para estas análises empregou-se animais submetidos a dietas composta por capim-marandu e amendoim forrageiro (*Arachis pintoi* cv. BRS Mandobi) para o tratamento Consórcio ou somente capim-marandu em monocultura para os demais tratamentos. A produção fecal foi utilizada para calcular a quantidade de FDNi excretado nas fezes; dessa maneira, foi possível obter o consumo de FDNi. Depois disso, o FDNi contido nas amostras de pastejo simulado foi usada para estimar o consumo de forragem.

No tratamento Consórcio, a proporção de gramínea e leguminosa no consumo de forragem foi estimada pela razão isotópica do <sup>12</sup>C e <sup>13</sup>C pela equação (Equação 5):

$$\% \text{leguminosa} = \frac{100 (\delta^{13}\text{C}_G - \delta^{13}\text{C}_F)}{(\delta^{13}\text{C}_G - \delta^{13}\text{C}_L)} \quad (5)$$

Onde a %leguminosa é a proporção de carbono derivado da leguminosa no FDNi residual das amostras de fezes (LOPES DE SÁ, 2017),  $\delta^{13}\text{C}_G$  é o valor da abundância natural de <sup>13</sup>C do FDNi residual nas amostras de pastejo simulado de gramínea (-14,54‰),  $\delta^{13}\text{C}_L$  é o valor da abundância <sup>13</sup>C do FDNi residual nas amostras de pastejo simulado da leguminosa (-26,91‰), e  $\delta^{13}\text{C}_F$  o valor da abundância de <sup>13</sup>C no FDNi residual das amostras de fezes.

A determinação do  $\delta^{13}\text{C}$  foi feita como descrito na metodologia aplicada na literatura. Para avaliação do  $\delta^{13}\text{C}$ , alíquotas contendo entre 200 a 400 µg C foram analisadas utilizando o espectrômetro de massa automático de fluxo contínuo (Finnigan MAT, Bremen, Germany), no laboratório John Day da Embrapa Agrobiologia.

A concentração de nitrogênio nas amostras coletadas no pastejo simulado foi determinada pelo analisador elementar C-H-N (AOAC, 2000). Esse valor foi usado para quantificar a ingestão total de N proveniente da forragem. O consumo de N (kg ha<sup>-1</sup>) foi obtido pela multiplicação do consumo diário de N pelos animais pela taxa de lotação em animais ha<sup>-1</sup> de cada tratamento.

### 3.2.4 Fixação biológica de nitrogênio (FBN)

A quantificação do N proveniente da fixação biológica (FBN) foi feita, por estação, utilizando o método de abundância natural do <sup>15</sup>N. Essa técnica é baseada no conhecimento de que o solo é levemente enriquecido com <sup>15</sup>N em relação à atmosfera. Dessa maneira, plantas fixadoras do N<sub>2</sub> atmosférico possuem menor abundância de <sup>15</sup>N do que plantas dependentes do N disponível no solo. Plantas não fixadoras de N<sub>2</sub> possuem uma marcação muito parecida com a do solo, ou seja, são levemente enriquecidas com <sup>15</sup>N.

A abundância de <sup>15</sup>N das amostras foi determinada como descrito na metodologia da abundância <sup>13</sup>C da literatura. As amostras enviadas para análise continham em torno de 30 a 50 µg de N. De acordo com a metodologia do valor "B", o N derivado da atmosfera (Ndfa) foi determinado através da equação (Equação 6):

$$\% \text{Ndfa} = \frac{\delta^{15}\text{N referência} - \delta^{15}\text{N leguminosa}}{\delta^{15}\text{N referência} - \text{Valor "B"} } \quad (6)$$

O *Macrotyloma* foi a leguminosa avaliada. As espécies não fixadoras utilizadas (plantas referência) foram coletadas mensalmente nos piquetes consorciados. As espécies avaliadas foram *Panicum maximum*, *Sporobolus indicus*, *Sida glaziovii*, *Waltheria indica* e *Solanum palinacanthum*. As amostras foram levadas para estufa por 72 h a 65 °C até atingirem peso

constante. Posteriormente, as plantas referências foram moídas no moinho tipo Willey e depois passavam no moinho de rolos. O valor de abundância de  $^{15}\text{N}$  da planta totalmente dependente da FBN é conhecido como valor B, e o valor B usado neste experimento foi de -1,83, determinado por UNKOVICH (2008).

A quantidade de N fixado na parte aérea do *Macrotyloma* ( $\text{kg de N ha}^{-1}$ ) foi calculado pela equação (Equação 7):

$$\text{Nfixado} = \text{Nacumulado} \times \% \text{Ndfa} \quad (7)$$

Onde o Nfixado é a quantidade de Nfixado pelo *Macrotyloma* ( $\text{kg de N ha}^{-1}$  estação $^{-1}$ ), N acumulado é a quantidade de N contido na liteira proveniente da leguminosa, somado com a quantidade de N derivado da leguminosa ingerido pelos animais ( $\text{kg N ha}^{-1}$  estação $^{-1}$ ) e adicionado a mudança de estoque de N na massa de forragem da leguminosa, e o %Ndfa é a proporção de N derivado da atmosfera contido na biomassa aérea da leguminosa.

### 3.2.5 Excreção de N pelos animais

A quantidade de N contida nas fezes ( $\text{g N d}^{-1}$ ) foi calculada multiplicando a concentração de N nas fezes pela produção fecal. O volume de urina produzido pelos animais foi estimado através de amostras (spots) de urina, que foram coletados no momento da coleta de fezes. Uma alíquota de 12 mL de urina foi retirada de cada amostra, e adicionado 48 mL de uma solução de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) a 0,02 N (CHEN e GOMES 1992). Foi feita uma amostra composta das coletas dos três dias de avaliação, que foi armazenada em frasco de plástico a -20 °C. A concentração de creatinina na urina foi determinada através de um kit comercial (Creatinine K, Labtest, Lagoa Santa, Brazil). A concentração de creatinina nas amostras é usada como marcador para o cálculo do volume de urina produzido, assumindo-se que os animais excretam uma quantidade padrão de creatinina todos os dias (SILVA et al. 2012). O volume urinário foi determinado seguindo a seguinte equação (Equação 8):

$$VU = (0.0345 \times \text{PCV}^{0,9491}) \div \text{CC}_U \quad (8)$$

Onde, VU ( $\text{L d}^{-1}$ ) é o volume de urina produzido diariamente, PCV ( $\text{kg}$ ) é o peso de corpo vazio dos animais e CC<sub>U</sub> ( $\text{g L}^{-1}$ ) é a concentração de creatinina da urina.

A quantidade de N excretado na urina ( $\text{g de N d}^{-1}$ ) foi determinada pela multiplicação da concentração de N (método 920.87; AOAC 2000) e o volume de urina produzido. A quantidade de N nas fezes e na urina ( $\text{kg ha}^{-1}$  estação $^{-1}$ ) foi calculada multiplicando o total de N médio excretado diariamente por cada animal pela taxa de lotação referente a cada tratamento. O N retido em cada animal foi obtido através da diferença entre o N ingerido e o N excretado na forma de fezes e urina.

### 3.2.6 Balanço de N no sistema

O balanço de N foi estimado pela quantificação das vias de entrada e saída do N no sistema. Foi avaliada a quantidade de N reposto através da liteira e das excretas dos animais. O N utilizado para produção de forragem foi estimado através da soma do N depositado na liteira, mais o total de N ingerido pelos animais, mais a mudança da quantidade de N estocado na massa forragem entre o início e o final das avaliações. A saída do N do sistema ocorreu pela retenção de N nos animais e por processos de perda como lixiviação e volatilização. O N utilizado para ganho de carcaça animal foi calculado por diferença entre a quantidade de N ingerido e o total de N excretado. Foram utilizados valores de 5% e 50% de perda de N para fezes e urina,

respectivamente (BODDEY et al., 2004). O N disponibilizado no sistema, por intermédio das fezes e urina, foi calculado pela diferença entre o total de N excretado pelos animais e as perdas de N nas excretas. O N estocado no animal foi calculado multiplicando o peso corporal por 0,025 (SCHOLEFIELD et al., 1991). A Eficiência de Utilização do Nitrogênio (EFN) pelos animais foi calculada através da relação entre o N convertido em carcaça animal ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ ) e o N consumido ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ ) (DETMANN et al., 2014).

O *input* de N provenientes de chuva, por partículas em suspensão na atmosfera e as perdas por lixiviação, denitrificação e volatilização de amônia (N *outputs*) não foram quantificadas (BODDEY et al., 2004).

### 3.3 Análises Estatísticas

O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados com três tratamentos (N-fert, Consórcio e Controle) distribuídos em quatro blocos com medidas repetidas ao longo das estações do ano. Os dados foram analisados pelo procedimento “MIXED” do software SAS 9.4 (SAS instituto Cary, NC). Os efeitos das variáveis tipo de pasto e estações do ano foram consideradas fixos e o efeito do bloco e ano foram considerados aleatório. O critério de Akaike foi utilizado para a seleção da estrutura de (co)variância com melhor ajuste aos dados. Todos os componentes da variância foram estimados pela função “LSMEANS” do SAS e as comparações foram realizadas utilizando o teste de Fisher’s *protected least significant difference* (LSD) a 10% de significância. Quando os dados não atenderam os pressupostos de normalidade, a transformação logarítmica foi aplicada. O modelo estatístico utilizado foi:

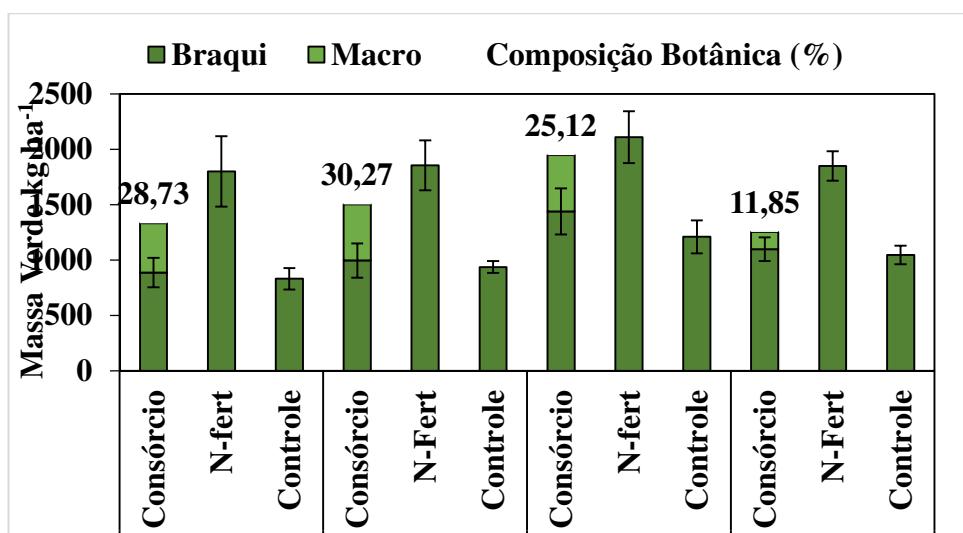
$$y_{ijkz} = \mu + TP_i + BL_j + \gamma_{ij} + A_z + T_k + (TP*T)_{ik} + \varepsilon_{ijkz}$$

Em que  $y_{ijkz}$  = valor observado no  $BL_j$  referente ao  $TP_i$  do  $T_k$ ;  $\mu$  = média das observações amostradas;  $BL_j$  = efeito aleatório associado aos blocos $j$ ,  $j = 1, 2, 3, 4$ ;  $TP_i$  = efeito fixo associado aos tipos de pasto,  $i = 1, 2, 3$ ;  $\gamma_{ij}$  = erro referente aos blocos ( $BL_j$ ) e tratamentos ( $TP_i$ );  $A_z$  = efeito aleatório associado ao ano,  $z = 1, 2$ ;  $T_k$  = efeito fixo associado as estações do ano,  $k = 1, 2$ ;  $(TP*T)_{ik}$  = efeito fixo associado a interação entre  $TP_i$  e  $T_k$ ;  $\varepsilon_{ijkz}$  = erro associado aos  $BL_j$ ,  $TP_i$ ,  $A_z$ ,  $T_k$ .

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Massa de Forragem

A massa de forragem (MF), a massa de gramínea (MG) e a massa de forragem verde (MV) apresentaram diferença significativa entre os tipos de pastagens ( $p < 0,001$ ). Em todas as variáveis, o tratamento N-fert obteve maior massa comparado ao Consórcio e Controle (Tabela 2). Em relação às estações do ano, a MF e a MG tiveram valores maiores na Seca em relação as Águas ( $p = 0,003$  e  $p = 0,001$ , respectivamente). Na pastagem consorciada, a massa de leguminosa (MLeg) variou de 480 a 331 kg de MS  $\text{ha}^{-1}$  para os períodos das Águas e da Seca, respectivamente (Tabela 1). A composição botânica na pastagem mostrou proporção de leguminosa no pasto consorciado em média de 23,9 % (Tabela 2). Observou-se maior presença do *Macrotyloma* nas Águas, corroborando o padrão de variabilidade sazonal exibido pela massa de leguminosa (Figura 2).



**Figura 2.** Massa de gramínea, leguminosa e composição botânica em pastagens de capim-marandu fertilizadas com N ou não, ou consorciadas com *Macrotyloma axillare* cv. Java ao longo das estações do ano avaliadas no experimento. As barras de erros representam o erro padrão da média.

O teor de N na MG mostrou diferença significativa entre os tipos de pastagem ( $p = 0,008$ ). O Consórcio obteve maior concentração de N na MG de 22,2 e 17,1% em relação ao N-fert e o Controle, respectivamente. Essa variável apresentou valores superiores no período das Águas em comparação com a Seca ( $p = 0,014$ ; Tabela 2).

O estoque de N na MF foi menor no tratamento Controle, em que nenhuma fonte de N foi aplicada ( $p = 0,001$ ; Tabela 2). Não houve diferença entre estações para esse componente analisado ( $p = 0,704$ ). A quantidade de N estocada na MG foi superior no tratamento N-fert ( $p < 0,001$ ), assumindo valores 31,3 e 36,3% maiores que as pastagens com leguminosa ou sem introdução de N, respectivamente. Essa variável mostrou o mesmo padrão de comportamento que a MF total ao longo do ano, ou seja, sem diferença entre os períodos avaliados ( $p = 0,397$ ; Tabela 2). O N estocado na MVGram foi maior no N-Fert em comparação ao Consórcio e Controle ( $p < 0,001$ ). Observou-se acréscimo do N na MV no período de maior pluviosidade ( $p = 0,060$ ). Quanto ao N estocado na ML, a média geral foi de 6,21 kg de N  $\text{ha}^{-1}$ , variando de 8,13 a 4,29 kg de N  $\text{ha}^{-1}$  no período do verão e inverno, respectivamente. O teor de N no *Macrotyloma* foi de 1,72 e 1,31% na estação das Águas e Seca, respectivamente (Tabela 2).

**Tabela 2.** Características da massa de forragem (MF) e estoque de N na massa em pastagens de capim-marandu adubadas ou não com 138 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de N ou em consórcio com *Macrotyloma axillare* cv. Java em relação as estações do ano durante dois anos experimentais.

Variáveis	Tipos de pastagem (TP)			Estação do ano (EA)		EPM	Valor-p		
	N-fert	Consórcio	Controle	Águas	Seca		TP	EA	TP*EA
<b>MF, kg MS ha<sup>-1</sup></b>	4103a	2822b	2433b	2825b	3352a	511	<0,001	0,003	0,691
<b>MG, kg MS ha<sup>-1</sup></b>	4103a	2416b	2433b	2726b	3241a	511	<0,001	0,001	0,632
<b>MVGram, kg MS ha<sup>-1</sup></b>	1903a	1105b	1006b	1379	1297	171	<0,001	0,376	0,916
<b>MLeg, kg MS ha<sup>-1</sup></b>		405,3		479,9	330,8				
<b>CB, %</b>		23,99		26,93	21,06				
<b>N na MG, %</b>	0,54b	0,69a	0,57b	0,64a	0,56b	0,05	0,010	0,014	0,18
<b>N na MLeg, %</b>		1,52		1,72	1,31				
<b>MF N, kg ha<sup>-1</sup></b>	21,79a	21,17a	13,86b	19,20	18,68	2,6	0,010	0,705	0,334
<b>MVGram N, kg ha<sup>-1</sup></b>	15,14a	10,03b	9,04b	12,17a	10,64b	1,63	<0,001	0,060	0,283
<b>MG N, kg ha<sup>-1</sup></b>	21,78a	14,96b	13,86b	16,49	17,24	2,59	<0,001	0,397	0,546
<b>Leg N, kg ha<sup>-1</sup></b>		6,21		8,13	4,29				

Notas: As médias dispostas com letras diferentes indicam efeito significativo ( $p<0,10$ ) pelo teste de LSD; Erro padrão da média (EPM); Tipo de pastagem (TP); Estações do ano (EA); Interção entre tipo de pastagem e estações do ano (TP\*EA); Massa de Forragem (MF); Massa de Gramínea (MG); Massa Verde Gramínea (MVGram); Massa de Leguminosa (MLeg); Composição Botânica (CB); Nitrogênio (N).

## 4.2 Liteira Existente

Durante as avaliações do experimento, não foram observadas diferenças significativas no aporte de liteira existente (LE) quanto aos tipos de pastagem; contudo, as estações do ano avaliadas apresentaram efeito significativo ( $p < 0,001$ ; Tabela 3). Durante o período da Seca, a LE foi 26,74% maior do que nas Águas. A LE proveniente da gramínea no Consórcio assumiu valores 21,43 e 18,7% inferiores em relação às pastagens em monocultura (N-fert e Controle, respectivamente;  $p = 0,001$ ). A sazonalidade também interferiu na quantidade de LE oriunda de gramínea ( $p < 0,001$ ), seguindo o mesmo padrão de variação ao longo do tempo que a LE total (Tabela 3).

A abundância do  $\delta^{13}\text{C}$  na LE do tratamento Consórcio foi de aproximadamente -15,50‰. A proporção de leguminosa na LE foi em média de 13,27%, o que corresponde a 388 kg ha<sup>-1</sup> de MO de LE (Tabela 3). A quantidade de leguminosa contida na LE foi afetada pelos fatores climáticos, sendo superior na estação Seca. Contudo, o valor mais elevado referente à proporção de leguminosa na liteira foi de 14,02% na estação Águas, condizendo com o valor mais negativo de  $\delta^{13}\text{C}$  (-15,61‰) desta estação (Tabela 3).

O teor de N, C e a relação C/N na LE diferiu quanto aos tipos de pastagens adotadas ( $p = 0,031$ ,  $p < 0,001$  e  $p = 0,047$ , respectivamente; Tabela 3). As concentrações de C e N apresentaram o mesmo padrão de variação entre tratamentos, evidenciando valores superiores nas pastagens consorciadas e fertilizadas com N. Já a relação C/N foi menor para os tratamentos N-fert e Consórcio. As estações do ano não evidenciaram efeito significativo para o teor de N e relação C/N (Tabela 3). Contudo, a concentração de C na LE foi maior no período Seco do ano ( $p = 0,075$ ; Tabela 3).

O estoque de N na LE (kg ha<sup>-1</sup> estação<sup>-1</sup>) não diferiu ao tipo de pastagem avaliada ( $p = 0,204$ ). Entretanto, os períodos avaliados apresentaram efeito significativo ( $p < 0,001$ ), com maior aporte de N na LE observado no período de estiagem, sendo 29,09% maior que na época chuvosa.

**Tabela 3.** Dinâmica da liteira existente (LE) em pastagens de capim-marandu adubadas ou não com 138 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de N ou em consórcio com *Macrotyloma axillare* cv. Java ao longo das estações do ano, durante dois anos experimentais.

Variáveis	Tipos de pastagens (TP)			Estação do ano (EA)		EPM		Valor-p	
	N-fert	Consórcio	Controle	Águas	Seca	TP	EA	TP*EA	
<b>LE, kg ha<sup>-1</sup> MO</b>	3658	3262	3535	2944b	4019a	469	0,204	<0,001	0,382
<b>LE Gram, kg ha<sup>-1</sup> MO</b>	3658a	2874b	3535a	2841b	3870a	480	0,001	<0,001	0,480
<b>LE Leg, kg ha<sup>-1</sup> MO</b>		388,33		330,44	446,22				
<b>LE, δ<sup>13</sup>C</b>		-15,50		-15,61	-15,39				
<b>LE Leg, %</b>		13,27		14,02	12,51				
<b>LE N, %</b>	0,61a	0,66a	0,54b	0,59	0,62	0,06	0,001	0,128	0,230
<b>LE C, %</b>	30,85a	31,12a	29,46b	29,46b	31,55a	5,06	<0,001	0,075	0,929
<b>LE C/N</b>	50,50b	48,59b	55,12a	51,21	51,59	5,39	0,047	0,840	0,296
<b>LE N, kg ha<sup>-1</sup></b>	22,71	21,44	19,11	17,50b	24,68a	3,92	0,204	<0,001	0,156

Notas: As médias dispostas com letras diferentes indicam efeito significativo ( $p<0,10$ ) pelo teste de LSD; Erro padrão da média (EPM); Matéria orgânica (MO); Tipo de pastagem (TP); Estações do ano (EA); Interação entre tipo de pastagem e estações do ano (TP\*EA); Liteira existente (LE); Gramínea (Gram); Leguminosa (Leg); Nitrogênio (N); Carbono (C).

### **4.3 Liteira Depositada, Taxa de Decomposição e Tempo de Meia-Vida**

A taxa de deposição de liteira (LD) foi superior para os piquetes fertilizados com N (N-Fert;  $p = 0,003$ ; Tabela 4). Nesse tratamento, a taxa de deposição de tecidos senescentes foi de 10,4 e 9,3% maior em relação ao Controle e Consórcio, respectivamente. Além disso, a deposição de liteira foi 27,7% maior no período da Seca em relação às Águas ( $p < 0,001$ ). O tratamento Consórcio apresentou menor proporção de LD derivada da gramínea ( $p < 0,001$ ), sendo 18,0 e 8,4% inferior em relação ao N-fert e Controle (Tabela 4). A LD de gramínea teve comportamento similar a LD total ao longo do tempo, evidenciando maiores valores na Seca ( $p < 0,001$ ; Tabela 4).

A abundância do  $^{13}\text{C}$  na LD ( $\delta^{13}\text{C}$ ) do tratamento Consórcio foi de -15,42‰, assumindo valores mais negativos na época chuvosa em que maior proporção da leguminosa na LD total foi constatada. Contudo, a massa de LD da leguminosa apresentou valores de 10,43 kg MO  $\text{ha}^{-1} \text{dia}^{-1}$  no período das Águas e 13,42 kg MO  $\text{ha}^{-1} \text{dia}^{-1}$  no período da Seca, evidenciando maior quantidade de massa de LD de leguminosa no período de precipitações reduzidas (Tabela 4). Nesse tratamento, a proporção de leguminosa na LD foi em média de 12,68%, o que corresponde a uma taxa de deposição de 11,92 kg  $\text{ha}^{-1} \text{dia}^{-1}$  (Tabela 4). O valor  $\delta^{13}\text{C}$  no material morto (MM) da leguminosa e gramínea evidenciaram grande discrepância entre si, como esperado, sendo -28,37‰ e -13,61‰, respectivamente (dados não apresentados).

A concentração de N no MM da gramínea foi superior para os tratamentos que tiveram *input* de N, sendo eles o N-Fert e Consórcio ( $p = 0,070$ ; Tabela 4). O teor de C no MM de gramínea não teve diferença entre os tipos de pastagens ( $p = 0,384$ ). Quanto à relação C/N, os tipos de pastagem que não receberam N indicaram maiores valores ( $p = 0,016$ ), seguido pelo tratamento N-fert e menores valores para o tratamento Consórcio. As concentrações de N, C e a relação C/N no MM de gramínea não tiveram grandes variações ao longo do experimento, apresentando valores muito próximos entre estações (Tabela 4). A média geral do teor de N, C e a relação C/N do MM de leguminosa foi de 1,79%, 40,03% e 22,80, respectivamente, não havendo variações quanto à sazonalidade (Tabela 4). O aporte de N ciclado proveniente da gramínea foi maior para as pastagens fertilizadas, quando comparadas às parcelas sem fertilização nitrogenada ( $p = 0,060$ ), sendo que o Consórcio não diferiu dos demais tratamentos. A quantidade de N depositado no solo oriundo da leguminosa por estação foi de 35,8 kg  $\text{ha}^{-1}$ , variando entre 42,9 a 28,8 kg  $\text{ha}^{-1}$  na época das Águas e Seca, respectivamente (Tabela 4). Para o retorno total de N ciclado na LD, deve-se considerar a proporção do N oriundo da gramínea e leguminosa. Desse modo, o Consórcio demonstrou maior quantidade de N ciclado pela LD, sendo 45,8 e 33,5% maior que o Controle e N-fert, respectivamente (Tabela 4). Portanto, a introdução da leguminosa promoveu um incremento na ciclagem de N pela LD em média de 37,4%.

A taxa de decomposição (valor k) e o tempo de meia-vida não tiveram diferença entre tratamentos ( $p = 0,970$  e  $p = 0,640$ , respectivamente; Tabela 4). Entretanto, foi observado efeito significativo entre estações do ano, para as duas variáveis analisadas. A velocidade de degradação da liteira, como esperado, foi 14,4% maior no período das Águas em comparação a Seca ( $p = 0,009$ ). O tempo necessário para massa de liteira perder metade do seu peso foi 21,3% maior na estação Seca ( $p = 0,001$ ; Tabela 4).

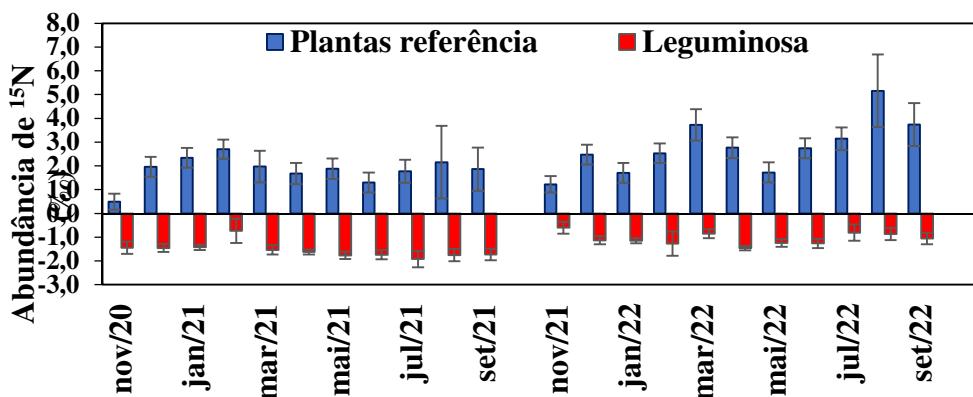
**Tabela 4.** Dinâmica da deposição de liteira, taxa de decomposição (valor k) e quantidade de N ciclado pelas pastagens de capim-marandu fertilizadas ou não com 138 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de N ou em consórcio com *Macrotyloma axillare* cv. Java ao longo das estações do ano, durante dois anos experimentais.

Variáveis	Tipos de pastagem (TP)			Estação do ano (EA)		EPM		Valor-p	
	N-fert	Consórcio	Controle	Águas	Seca	TP	EA	TP*EA	
<b>LD, kg ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> MO</b>	108,3a	100,7b	97,0b	84,9b	117,5a	11,7	0,003	<0,001	0,430
<b>LD Gram, kg ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> MO</b>	108,3a	88,8c	97,0b	82,1b	114,0a	11,9	<0,001	<0,001	0,430
<b>LD Leg, kg ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> MO</b>		11,9		10,4	13,4				
<b>LD, δ<sup>13</sup>C</b>		-15,42		-15,56	-15,29				
<b>N MM Gram, %</b>	0,34a	0,35a	0,30b	0,34	0,35	0,02	0,070	0,200	0,380
<b>C MM Gram, %</b>	38,0	37,4	37,5	37,6	37,7	0,62	0,384	0,855	0,975
<b>C/N MM Gram,</b>	115,7ab	106,8b	128,3a	115,7	107,6	11,0	0,016	0,140	0,875
<b>N MM Leg, %</b>		1,79		1,79	1,79				
<b>C MM Leg, %</b>		40,0		40,0	40,0				
<b>C/N MM Leg,</b>		22,8		20,8	20,8				
<b>Leg N, kg ha<sup>-1</sup></b>		35,8		42,9	28,8				
<b>Gram N, kg ha<sup>-1</sup></b>	63,6a	59,8ab	51,8b	56,6b	60,3a	5,86	0,060	0,030	0,480
<b>LD N, kg ha<sup>-1</sup></b>	63,6b	95,7a	51,8b	70,8a	69,9b	9,84	0,840	<0,001	0,260
<b>Valor k (g g<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>)</b>	0,0196	0,0203	0,0195	0,0214a	0,0183b	0,0058	0,970	0,009	0,490
<b>Meia-vida (dias)</b>	40,7	40,3	40,8	35,8b	45,5a	10,8	0,640	0,001	0,860

Notas: As médias dispostas com letras diferentes indicam efeito significativo ( $p<0,10$ ) pelo teste de LSD; Erro padrão da média (EPM); Tipo de pastagem (TP); Estações do ano (EA); Interação entre tipo de pastagem e estações do ano (TP\*EA); Liteira depositado (LD); Gramínea (Gram); Leguminosa (Leg); Nitrogênio (N); Carbono (C); Material Morto (MM); Taxa de decomposição (Valor k).

#### 4.4 Nitrogênio Derivado da Atmosfera e Contribuição da FBN

A abundância de  $^{15}\text{N}$  do *Macrotyloma axilare*,  $\delta^{15}\text{N}$  foi em média de  $-1,35 (\pm 0,3)\%$ , variando entre  $-1,32$  e  $-1,38\%$  para Águas e Seca, respectivamente (Tabela 5). Para acessar a abundância natural de  $^{15}\text{N}$  do N disponível no solo, plantas não fixadoras foram coletadas mensalmente nas parcelas consorciadas, ao longo do experimento. O teor de  $\delta^{15}\text{N}$  dessas plantas foi maior que o das espécies fixadoras, indicando significativa contribuição na nutrição nitrogenada da leguminosa. A análise de  $\delta^{15}\text{N}$  das plantas referência foram: *Sida rhombifolia*  $3,09 (\pm 0,87)\%$ , *Conyza bonariensis*  $3,46 (\pm 0,44)\%$ , *Phyllanthus niruri*  $3,74 (\pm 0,1)\%$ , *Solanum sisymbriifolium*  $2,34 (\pm 1,81)\%$ , *Sida acuta*  $1,69 (\pm 0,03)\%$ , *Emilia sonchifolia*  $3,39 (\pm 0,41)\%$ , *Eupatorium maximilianii*  $2,34 (\pm 0,42)\%$  (Figura 3).



**Figura 3.** Abundância natural de  $^{15}\text{N}$  da parte aérea de plantas referência e do *Macrotyloma axillare* cv. Java no decorrer de dois anos de experimento. As barras de erros representam o erro padrão da média.

De maneira geral, o *Macrotyloma axillare* mostrou grande potencial de utilização do  $\text{N}_2$  atmosférico, atingindo médias do Ndda igual a  $82,02\%$  no período das Águas e  $85,44\%$  no período da Seca (Tabela 5). A contribuição da FBN em um sistema produtivo pecuário a pasto pode ser estimada pelo produto do N contido na MS da Produtividade Primária Líquida da Leguminosa (PPLLeg) e o %Ndda. O N na PPLLeg é representado por três componentes: N depositado na liteira derivada da leguminosa durante um ano, diferença no estoque de N na leguminosa entre o começo e o final do ano e a quantidade de N derivado da leguminosa consumido pelos animais ao longo de um ano em um hectare. A média geral do PPLLeg foi de  $45,11 \text{ kg ha}^{-1} \text{ estação}^{-1}$ , assumindo os valores de  $49,21$  e  $41,01 \text{ kg ha}^{-1}$  na estação Águas e Seca, respectivamente (Tabela 5). A concentração de N na leguminosa foi de  $1,72$  e  $1,31\%$  na época das Águas e Seca, respectivamente (Tabela 5). Desse modo, a média geral da FBN no Consórcio foi de  $37,66 \text{ kg ha}^{-1} \text{ estação}^{-1}$ , assumindo valores mais elevados nas Águas (Tabela 5). O consumo de N derivado da leguminosa pelos animais variou de  $18,56$  a  $4,54 \text{ g animal}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  nas Águas e Seca, respectivamente (Tabela 6).

Levando em consideração variações na taxa de lotação e %Ndda entre estações, a quantidade de N proveniente da leguminosa e a contribuição da FBN na forragem ingerida pelos animais foi de  $24,1$  e  $20,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , respectivamente (Figura 4). O N depositado pela liteira da leguminosa e o aporte de N derivado da FBN foram  $71,7$  e  $60,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , respectivamente (Figura 4). Dessa maneira, a FBN promoveu um acréscimo de N no sistema de aproximadamente  $75 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (Figura 4).

**Tabela 5.** Aspectos relacionados à leguminosa em pastagens de capim-marandu em consórcio com *Macrotyloma* ao longo das estações do ano, durante dois anos experimentais.

Variáveis	Águas	Seca	EPM
<b>PPL leg, kg N ha<sup>-1</sup></b>	49,21	41,01	12,46
<b>Concentração de N, leg g kg<sup>-1</sup></b>	1,72	1,31	0,13
<b>FBN, kg ha<sup>-1</sup></b>	40,10	35,23	9,86
$\delta^{15}\text{N}$	-1,32	-1,38	0,19
<b>Ndfa (%)</b>	82,02	85,44	2,38

Notas: Erro padrão da média (EPM); Produtividade Primária Líquida (PPL); Leguminosa (Leg); Nitrogênio (N); Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN); Nitrogênio derivado da atmosfera (Ndfa).

#### 4.5 Consumo de Forragem e N pelo Animal

Não foram observadas diferenças significativas entre os tipos de pastagens quanto ao consumo de MS total (CMS). Em média, os animais ingeriram 7,25 kg de MS animal<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> (Tabela 6). Entretanto, a porção de MS da gramínea consumida pelos animais foi maior nos tratamentos N-Fert e Controle em relação ao Consórcio ( $p = 0,005$ ; Tabela 6). O consumo de MS total e gramínea variaram de maneira semelhante frente às condições climáticas, indicando valores mais elevados no período das Águas ( $p < 0,001$  e  $p < 0,001$ , respectivamente; Tabela 6). No tratamento Consórcio, o maior consumo de MS proveniente da leguminosa ocorreu nas Águas. O *Macrotyloma* representou 12,7% da MS total da dieta animal, o que equivale a 0,87 kg animal dia<sup>-1</sup> de leguminosa ingerida. Os valores referentes ao teor de N do pastejo simulado da gramínea foram maiores no Consórcio ( $p < 0,001$ ), não havendo diferença entre estações do ano. O teor de N do pastejo simulado da leguminosa foi em média 2,79%, sendo 3,08 e 2,51% na estação das Águas e Seca, respectivamente (Tabela 6). O consumo de N total não diferiu entre tratamentos, contudo a ingestão de N derivado da gramínea foi maior para o N-Fert e Controle ( $p = 0,023$ ). A variação sazonal promoveu um incremento no consumo do N total ( $p < 0,001$ ) e no N da gramínea ( $p < 0,001$ ) na estação Águas. Na pastagem consorciada, a proporção de N da leguminosa consumida pelos animais foi de 24,5%, o que representa 23,41 g de N animal<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>. A maior participação do N derivado da leguminosa na dieta animal ocorreu na época de maior pluviosidade (Tabela 6).

#### 4.6 Excreção de Nitrogênio

A excreção de N total por animal, assim como nas fezes e urina, não diferiram quanto o manejo do N empregado (Tabela 7). Contudo, um incremento na deposição de N total e nas fezes foi constatado na estação das Águas ( $p < 0,001$  e  $p < 0,001$ , respectivamente; Tabela 7). Em média, a excreção de N total, nas fezes e urina foi 79,5, 49,5 e 29,8 g animal dia<sup>-1</sup>, respectivamente (Tabela 7).

**Tabela 6.** Consumo de matéria seca (CMS) e nitrogênio (N) pelos animais em pastagens de capim-marandu fertilizadas ou não com 138 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> ou em consórcio com *Macrotyloma axillare* cv. Java ao longo das estações do ano, durante dois anos experimentais.

Variáveis	Tipos de pastagens (TP)			Estação do ano (EA)		EPM		Valor-p	
	N-fert	Consórcio	Controle	Águas	Seca	TP	EA	TP*EA	
<b>CMS total, kg animal dia<sup>-1</sup></b>	7,5	6,8	7,4	8,9a	5,5b	2,1	0,330	<0,001	0,879
<b>CMS Gram, kg animal dia<sup>-1</sup></b>	7,5a	5,9b	7,4a	8,6a	5,3b	1,1	0,005	<0,001	0,819
<b>CMS Leg, kg animal dia<sup>-1</sup></b>		0,87		1,09	0,69	0,35			
<b>Consumo de N, g animal dia<sup>-1</sup></b>	90,4	95,2	90,0	109,9a	73,9b	19,8	0,718	<0,001	0,985
<b>Consumo de N Gram, g animal dia<sup>-1</sup></b>	90,4a	73,0b	90,0a	101,2a	67,4b	15,7	0,023	<0,001	0,788
<b>Consumo de N Leg, g animal dia<sup>-1</sup></b>		23,4		29,5	17,2	9,8			
<b>PS Gram N, %</b>	1,26b	1,36a	1,26b	1,28	1,27	0,09	0,001	0,716	0,916
<b>PS Leg N, %</b>		2,79		3,08	2,51				

Notas: As médias dispostas com letras diferentes indicam efeito significativo ( $p<0,10$ ) pelo teste de LSD; Erro padrão da média (EPM); Tipo de pastagem (TP); Estações do ano (EA); Intereração entre tipo de pastagem e estações do ano (TP\*EA); Consumo de Matéria Seca (CMS); Gramínea (Gram); Leguminosa (Leg); Nitrogênio (N); Pastejo Simulado (PS).

**Tabela 7.** Excreção de N quanto ao tipo de excreta animal pelos animais em pastagens de capim-marandu fertilizadas ou não com 138 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> ou em consorcio com *Macrotyloma axillare* cv. Java ao longo das estações do ano, durante dois anos experimentais.

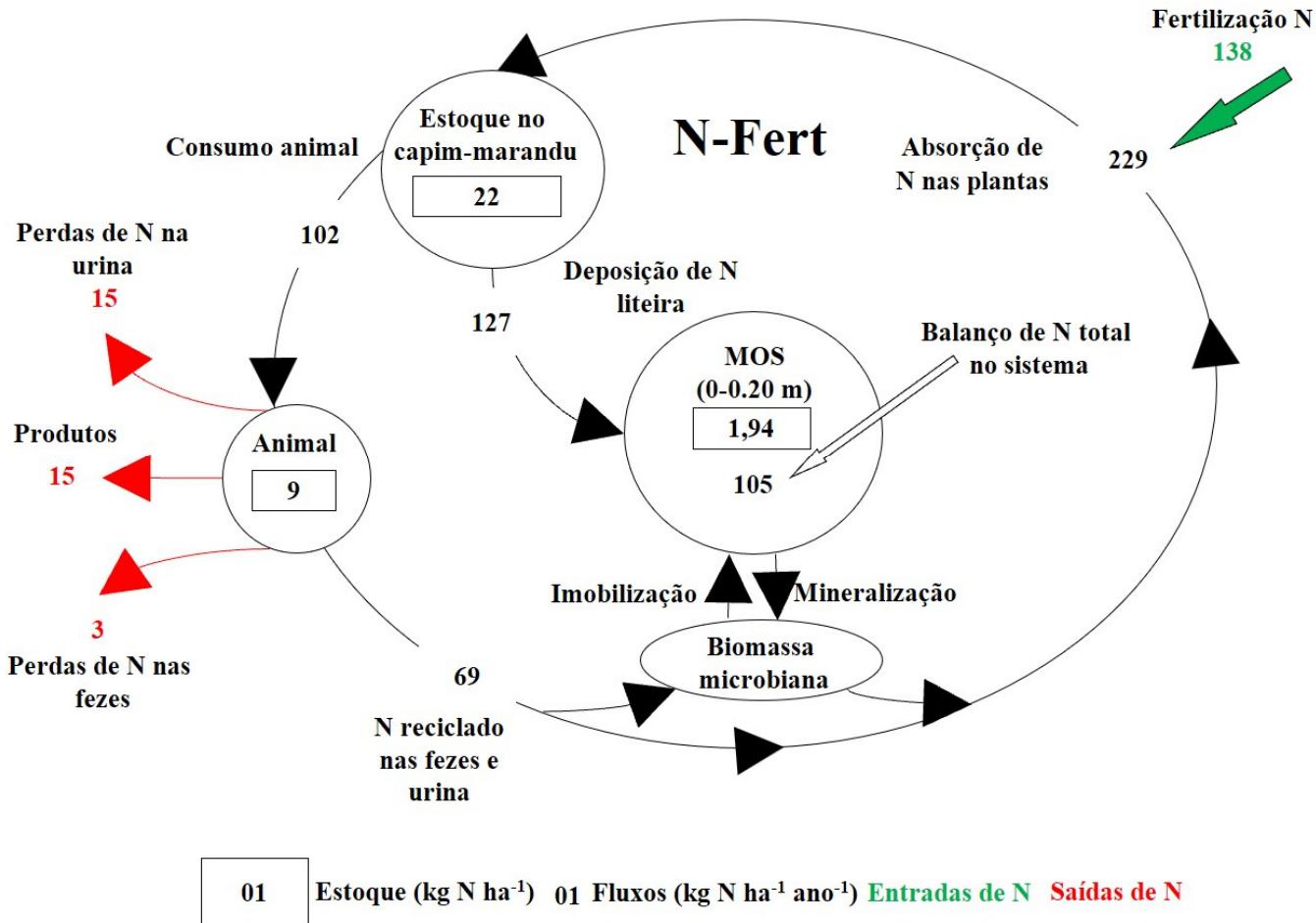
Variáveis	Tipos de pastagens (TP)			Estação do ano (EA)		EPM		Valor-p	
	N-fert	Consórcio	Controle	Águas	Seca	TP	EA	TP*EA	
<b>Excreção total de N, g animal dia<sup>-1</sup></b>	81,3	77,4	79,9	89,1a	69,9b	24,2	0,727	<0,001	0,350
<b>Excreção N das fezes, g animal dia<sup>-1</sup></b>	51,4	47,7	49,2	59,9a	38,9b	13,5	0,570	<0,001	0,470
<b>Excreção N na urina, g animal dia<sup>-1</sup></b>	29,4	29,4	30,5	29,1	30,5	10,9	0,894	0,531	0,917
<b>Taxa de lotação, UA ha<sup>-1</sup></b>	2,92a	2,47b	2,39b	2,81a	2,38b	0,18	0,001	0,013	0,674
<b>Consumo N total, kg ha estação<sup>-1</sup></b>	50,9	52,1	41,8	74,9a	21,8b	13,3	0,230	<0,001	0,913
<b>Consumo N Gram total, kg ha estação<sup>-1</sup></b>	50,9a	40,1b	41,8ab	68,5a	19,9b	10,6	0,050	<0,001	0,860
<b>Consumo N Leg total, kg ha estação<sup>-1</sup></b>		12,0		18,5	4,54	6,47			
<b>Excreção total de N, kg ha estação<sup>-1</sup></b>	43,6a	36,2b	35,6b	56,9a	20,1b	11	0,010	<0,001	0,287
<b>Excreção N das fezes, kg ha estação<sup>-1</sup></b>	28,5a	23,1b	22,6b	38,2a	11,3b	6,87	0,009	<0,001	0,413
<b>Excreção N na urina, kg ha estação<sup>-1</sup></b>	15,1	13,1	13,0	18,5a	8,24b	4,11	0,345	<0,001	0,463

Notas: As médias dispostas com letras diferentes indicam efeito significativo ( $p<0,10$ ) pelo teste de LSD; Erro padrão da média (EPM); Tipo de pastagem (TP); Estações do ano (EA); Interação entre tipo de pastagem e estações do ano (TP\*EA); Gramínea (Gram); Leguminosa (Leg); Nitrogênio (N); Unidade Animal (UA).

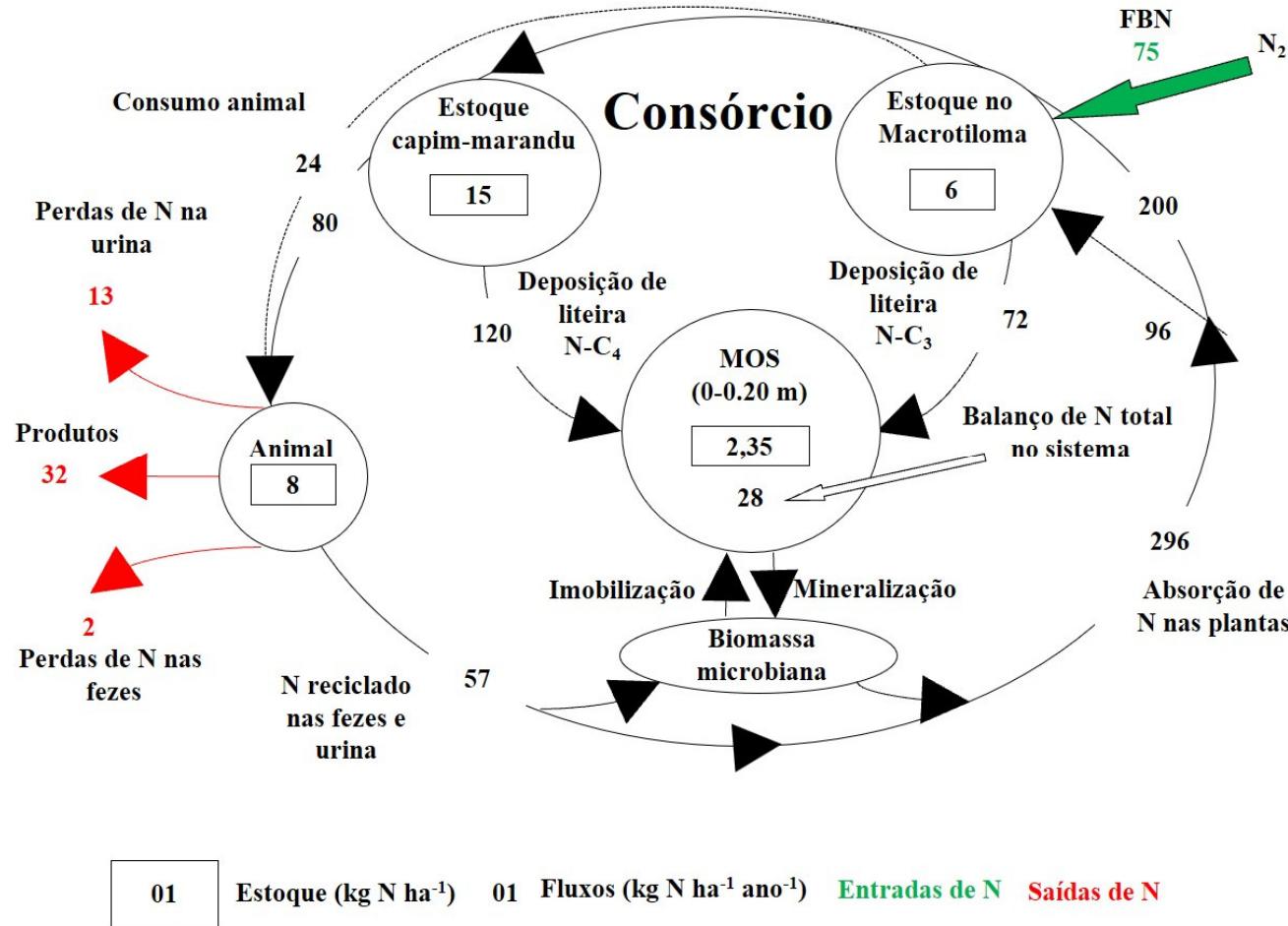
#### **4.7 Ciclagem e Balanço Total do N**

A taxa de lotação mais elevada ocorreu no tipo de pastagem N-fert ( $p = 0,001$ ), com um aumento de 15,41 e 18,15% em relação ao Consórcio e Controle, respectivamente. Os maiores valores sobre a taxa de lotação foram reportados na estação das Águas ( $p = 0,013$ ), sendo 15,30% superior à Seca (Tabela 7). Diferente do consumo de N total, o N consumido da gramínea diferiu entre os tipos de pastagem ( $p = 0,05$ ), com o N-Fert superior ao Consórcio, não apresentando diferença em comparação ao Controle. A ingestão de N total e N da gramínea apresentaram o mesmo padrão de comportamento entre estações, indicando valores superiores nas Águas ( $p < 0,001$  e  $p < 0,001$ , respectivamente; Tabela 7). A excreção, por área, de N total e N das fezes foi maior para o N-Fert ( $p = 0,001$  e  $p = 0,009$ , respectivamente). O retorno do N total, juntamente com o tipo de excretas avaliado, fezes e urina, indicaram maior deposição de N na estação das Águas ( $p < 0,001$ ,  $p < 0,001$  e  $p < 0,001$ , respectivamente; Tabela 7). Na pastagem consorciada, o consumo de N proveniente da leguminosa representou 23,1% do N total ingerido na dieta animal, o que equivale a  $12,0 \text{ kg ha}^{-1}$  estação $^{-1}$ . Os valores do consumo de N da leguminosa observados ao longo do experimento foram de 18,5 e  $4,54 \text{ kg ha}^{-1}$  estação $^{-1}$ , na estação Águas e Seca, respectivamente (Tabela 7).

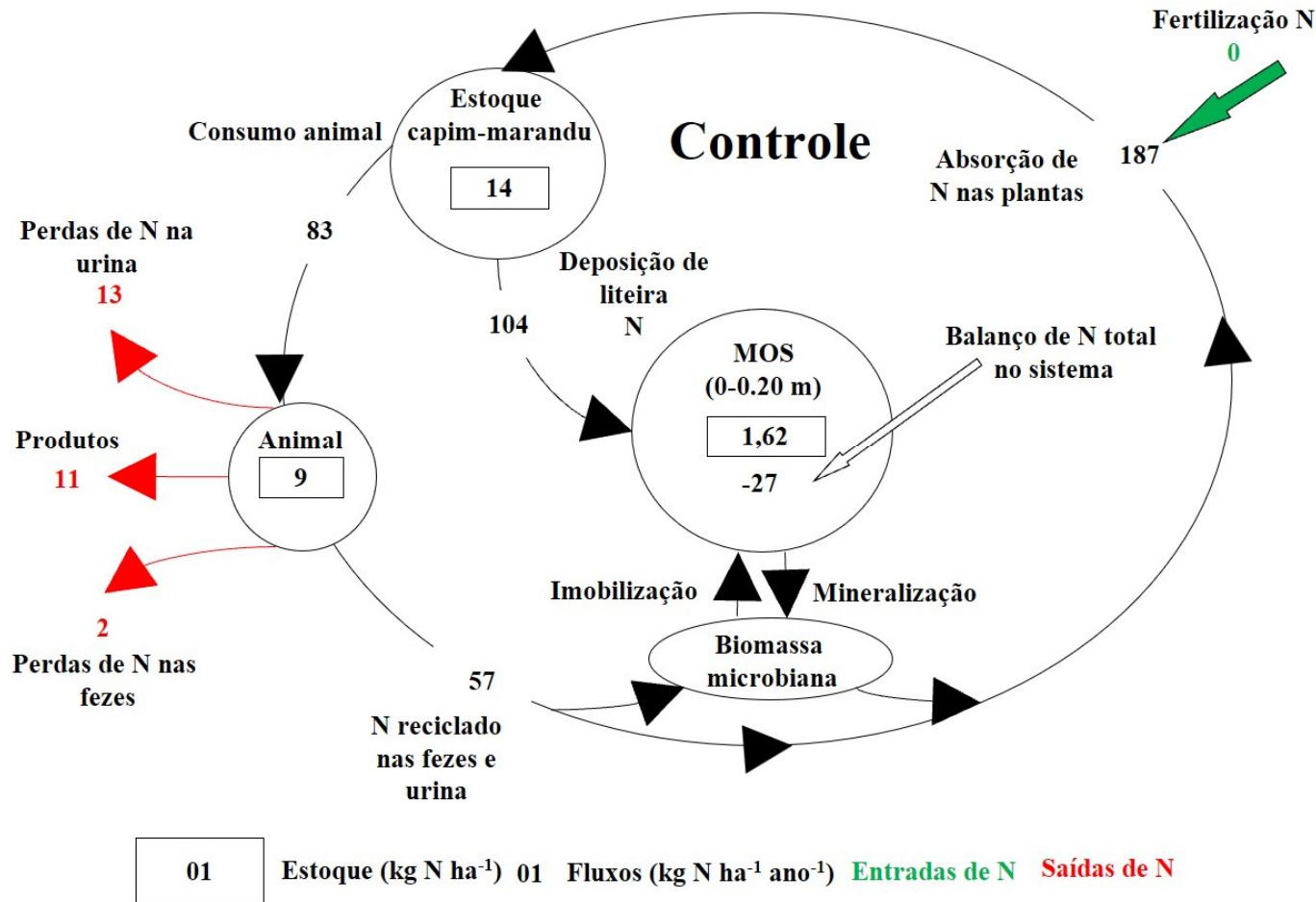
Utilizando dados das Tabelas 1, 3, 4 e 6 foi possível confeccionar diagramas que demonstram os fluxos e compartimentos de N no sistema solo-planta-animal para os tipos de pastagens avaliadas. O *input* de N pelas precipitações pluviais ou pela deposição atmosférica não foi quantificado. As perdas de N no sistema através da lixiviação, denitrificação e volatilização de amônia ( $\text{NH}_3^+$ ), também não foram mensuradas. Nos tratamentos manejados com adição de N, N-Fert e Consórcio, o balanço de N total no sistema foi positivo, representando um aporte de 105 e  $28 \text{ kg N ha ano}^{-1}$ , respectivamente. Entretanto, no tratamento Controle foi notório um balanço negativo de N, que correspondeu a  $-27 \text{ kg N ha ano}^{-1}$ .



**Figura 4.** Diagrama de ciclo anual do N em pastagens de capim-marandu fertilizadas com 138 kg N ha<sup>-1</sup> em lotação contínua.



**Figura 5.** Diagrama de ciclo anual do N em pastagens de capim-marandu em consórcio com *Macrotyloma Axillare* cv. Java em lotação contínua.



**Figura 6.** Diagrama de ciclo anual do N em pastagens de capim-marandu sem fertilização nitrogenada em lotação contínua.

## 5. DISCUSSÃO

### 5.1 Como o Input de N Via Adubação ou FBN Afeta a Estrutura do Dossel e o Estoque de N na Massa de Forragem?

A aplicação do fertilizante nitrogenado promoveu maior massa de forragem (MF) total e consequentemente maior quantidade de N estocado na massa. Esse efeito reafirma a grande influência que esse elemento possui nos processos fisiológicos das plantas, intensificando o crescimento vegetal, especialmente em gramíneas (PAIVA et al., 2015). A demanda de nutrientes por essas plantas é maior que os nutrientes disponibilizados no solo pela mineralização da matéria orgânica (PEREIRA et al., 2015). Por isso, o fornecimento de N exerce grande influência no acúmulo e na oferta de forragem no pasto.

A massa de gramínea (MG) seguiu o mesmo padrão que a MF, evidenciando valores semelhantes entre os tratamentos Consórcio e Controle. Entretanto, o teor de N na MG do Consórcio foi superior à monocultura, mostrando que o N disponibilizado pela leguminosa exerceu maior influência em aspectos relacionados ao valor nutritivo da gramínea em detrimento ao desenvolvimento vegetativo da mesma. O N fixado pode ser transferido da leguminosa para gramínea pela deposição e subsequente mineralização de tecidos vegetais senescentes ou por diferentes mecanismos em subsuperfície (DIAS et al., 2007). Nessa condição em subsuperfície, as principais rotas de transferência de N decorrem da mineralização dos tecidos radiculares senescentes, da exsudação de composto orgânicos ricos em N e da associação com micorrizas (THILAKARATHNA et al., 2016). Desse modo, pequenas frações de N disponibilizadas ao longo do tempo não parecem ter exercido influência significativa no desenvolvimento vegetativo da MG. Embora a adubação nitrogenada esteja associada com o aumento do teor de N na MF (JOHNSON et al., 2001), esse comportamento não foi observado nesse trabalho. Uma possível explicação para isso pode ser a baixa eficiência do fertilizante nitrogenado pós aplicação, em vista de períodos de estiagem subsequentes à aplicação da ureia. Outro ponto envolve o critério de manejo do pastejo empregado no experimento. Pastagens manejadas com maior oferta de forragem (OF) apresentam uma tendência de menor resposta à aplicação de N e redução do valor nutritivo em decorrência da maior idade fisiológica dos perfilhos presentes na mesma (CÂNDIDO et al., 2005).

A MF do tratamento adubado foi 33,4% superior ao Consórcio, contudo, o estoque de N na MF para os dois tipos de pastagens foi semelhante. Essa situação está diretamente relacionada a presença do *Macrotyloma* no tratamento consorciado. Em geral, espécies C<sub>3</sub> possuem menor eficiência no uso do N (EUN) que plantas C<sub>4</sub>. Desse modo, torna-se necessária maior quantidade de enzimas RUBISCO para manutenção de altas taxas fotossintéticas em plantas C<sub>3</sub> (TAIZ e ZEIGER, 2006). Sendo assim, a quantidade de N por área foliar das leguminosas é superior às gramíneas. Isso explica o elevado estoque de N nas pastagens consorciadas, que mesmo com menor MF, apresentaram estoque de N na massa sem diferença para o sistema adubado. A participação da leguminosa no estoque de N do Consórcio foi em média de 29,3%, evidenciando sua importância no acúmulo de N na biomassa das pastagens (Tabela 2).

As variações nas condições climáticas ao longo do experimento causaram modificações na estrutura do dossel do capim-marandu e na presença da leguminosa nas pastagens consorciadas. Os maiores valores de MF e MG observados na Seca estão relacionados com acúmulo de material senescente no dossel forrageiro. A estação da Seca é marcada pela redução na temperatura, pluviosidade e fotoperíodo, impactando negativamente no surgimento de novas folhas e perfilhos, com subsequente redução da produção do pasto (FAGUNDES et al., 2005). Nessa ótica, a renovação dos tecidos vegetais é reduzida, aumentando o intervalo de tempo em

que folhas, colmos e perfilhos senescentes permanecem aderidos à planta (LARA; PEDREIRA, 2011). Além disso, a redução na taxa de lotação no período de baixas pluviosidade, para manutenção da forragem verde ofertada aos animais, também pode ter contribuído para o aumento do acúmulo de material morto aderido na planta. Ainda na estação Seca, foi observada uma redução na proporção de leguminosa na composição botânica (CB) do dossel das pastagens consorciadas (Figura 2). Apesar do *Macrotyloma axillare* cv. Java apresentar alguns mecanismos de tolerância a seca, foi notório menor massa de leguminosa em decorrência das condições climáticas limitantes da estação Seca (MORRIS, 2008).

Para reduzir a superfície de transpiração, leguminosas reduzem a área foliar e estomática, prejudicando as trocas gasosas e consequentemente a fixação do carbono (BLACK et al., 2009). As reduções do desenvolvimento vegetal ocorrem em razão da expansão e divisão celular estarem associadas à pressão de turgor das células, sendo substancialmente reduzido em condições de déficit hídrico (DA SILVA; SBRISSIA; PEREIRA, 2015). Nesse cenário, a senescência de tecidos da leguminosa é favorecida. O clima do local parece exercer influência semelhante no desenvolvimento de gramíneas e leguminosas, promovendo maior acúmulo de massa de forragem no verão. Em geral, leguminosas que se propagam por sementes como a Java persistem no sistema em média por 3 a 4 anos (ANDRADE et al., 2004). As adversidades ambientais atuam como fatores limitantes na germinação de sementes derivadas da leguminosa, conferindo menor persistência do que espécies de propagação clonal (FAVERJON et al., 2017). Ademais, espécies de hábito de crescimento volátil apresentam maior participação em extratos superiores do dossel da pastagem, resultando em maior exposição ao pastejo animal (BODDEY et al., 2020). Desse modo, a composição botânica da pastagem apresentou uma proporção decrescente de *Macrotyloma* ao longo do experimento. Para manutenção desse tipo de leguminosa no dossel da pastagem ao longo do tempo é necessário o uso de estratégias de sobresemeadura, principalmente em épocas de elevadas precipitações.

## 5.2 Como o Input de N Via Adubação ou FBN Afeta a Dinâmica de Ciclagem Via Liteira?

O fornecimento de N via adubação ou pela FBN não exerceu influência no estoque de liteira (LE). A quantidade de liteira na pastagem é o resultado da diferença entre a taxa de deposição e decomposição (DUBEUX et al., 2007). Desse modo, a influência do manejo do N nessas duas variáveis não foi suficiente para que os tratamentos apresentassem diferença entre si quanto à LE. Contudo, a discrepância entre a LE no inverno e no verão mostrou que os fatores climáticos, nesse experimento, desempenharam grande influência no estoque de liteira da pastagem. Com a maior taxa de deposição e menor de decomposição na Seca é natural que a LE no pasto seja superior nessa estação do ano.

Foi notório um aumento expressivo da deposição de liteira como efeito da adubação nitrogenada. A deposição de liteira no pasto está diretamente associada à eficiência de pastejo dos animais e à taxa de senescência dos tecidos vegetais (HOMEM et al., 2021). O N influencia na quebra de dormência de gemas e acelera o fluxo de tecidos na planta. Dessa maneira, o turnover de folhas e perfilhos aumenta, resultando em uma maior taxa de aparecimento e senescência dos mesmos (PAIVA et al., 2012). Assim, o manejador do pastejo precisa aumentar a eficiência de colheita, em resposta ao aumento da velocidade de crescimento da planta. O critério do pastejo baseados em valores elevados de OF limitam a busca por maior eficiência de pastejo ocasionando no aumento da proporção de material morto no dossel das pastagens fertilizadas. Nesse sentido, o período em que os animais pastejam será estendido durante o dia. Procurando condições mais favoráveis ao consumo, os animais percorrem maior área da pastagem, favorecendo o desprendimento de tecidos vegetais senescentes aderidos no dossel (OLIVEIRA NETO et al., 2013). Esses fatores parecem ser a razão para o aumento na deposição de tecidos senescentes nas parcelas fertilizadas. As baixas precipitações e temperatura,

características da estação Seca, favoreceram a taxa de senescência de folhas e perfilhos, contribuindo para maior LD nessa época (FAGUNDES et al., 2006).

Em vista do baixo teor de N da liteira produzida proveniente da gramínea, a quantidade de material depositado, principalmente na monocultura, parece exercer maior influência na ciclagem de N em detrimento à concentração do nutriente na liteira. O teor de N do material senescente da gramínea e leguminosa no Consórcio foi em média 0,41 e 1,72%, respectivamente, evidenciando diferentes potenciais de contribuição para a ciclagem de N via liteira. A quantidade de N ciclado por intermédio da deposição de leguminosa representou 37,4% do total de N que retorna para o solo pela LD no sistema Consórcio. As moléculas orgânicas provenientes da leguminosa apresentam características mais lábeis, sendo rapidamente mineralizadas pelos microrganismos do solo (ALVES et al., 2011). Apesar disso, a maior velocidade de disponibilização do N no solo não foi capaz de aumentar o estoque de N na LE. Com isso, foi constatada uma similaridade entre a quantidade de N contido na liteira das monoculturas de capim-marandu e Consórcio.

Características químicas da LE parecem ter sido modificadas em função do manejo do N. Aspectos qualitativos das leguminosas parecem ter contribuído para o aumento no teor de N juntamente com a redução da concentração de C e da relação C/N na LE. Esse efeito favorecerá a mineralização da liteira e, em seguida, a liberação de N (JARAMILLO et al., 2021). Essas variáveis apresentaram valores e padrão de comportamento análogos ao N-Fert. Desse modo, é observado uma semelhança entre os efeitos da dose de N aplicada e o estabelecimento do Consórcio nas características químicas da liteira. O maior ritmo de crescimento das forrageiras submetidas à adubação nitrogenada reduz a duração de vida da folha da pastagem, levando a deposição de tecidos com menor idade fisiológica (PEREIRA et al., 2015). Particularmente em pastagens sob lotação contínua onde a deposição de tecidos vegetais é leniente, o constante acréscimo de frações vegetais lábeis na liteira remanescente favorecerá a melhora de características qualitativas da LE (KUZYAKOV; FRIEDEL; STAHR, 2000). Outra possível explicação desse fato seria um efeito residual da fertilização nitrogenada sobre a LE. Os efeitos das variações climáticas no estoque de N foram análogos aos descritos no estoque de massa de LE, confirmando a influência que fatores ambientais exercem sobre a manutenção do aporte de liteira e de N no pasto.

Em geral, é observado na natureza diferença do enriquecimento do  $\delta^{13}\text{C}$  entre plantas C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub> em decorrência dos seus diferentes mecanismos fotossintéticos. A abundância do  $\delta^{13}\text{C}$  na LE do tratamento Consórcio foi de aproximadamente -15,50‰, indicando um valor intermediário em comparação com material senescente da leguminosa (-28,37‰) e da gramínea (-13,53‰). O valor mais elevado referente a proporção de leguminosa na liteira foi de -14,02‰ na estação Águas, condizendo com o valor  $\delta^{13}\text{C}$  mais negativo (-15,61‰) das estações. Esses resultados apontam a influência da leguminosa na modificação da marcação isotópica do estoque de liteira. As condições climáticas regulam o crescimento e senescência de tecidos vegetais do *Macrotyloma*. Essa dinâmica parece ter influenciado na marcação isotópica da LD ao longo das estações, uma vez que as altas temperaturas e precipitações no verão parecem ter favorecido o acúmulo de massa da leguminosa no pasto, e no inverno as condições climáticas limitantes estimularam a taxa de senescência. Com isso, a deposição de liteira proveniente da leguminosa na Seca foi 22,2% maior em relação as Águas. Contudo, maior participação de leguminosa na LE e valores mais negativos de  $\delta^{13}\text{C}$  na LE e LD foram observados na estação de maior pluviosidade. Em virtude da quantidade mais elevada de deposição de gramínea na Seca, a participação da leguminosa na massa total da LE e LD foi reduzida. Desse modo, a influência da leguminosa na decomposição e mineralização da massa de liteira ocorreu de maneira mais marcante na época das Águas.

Embora os tratamentos manejados com alguma fonte de N tenham apresentado maior concentração do nutriente no material depositado derivado da gramínea, a magnitude dessa

diferença não foi suficiente para aumentar a taxa de decomposição. Nos piquetes consorciados, a deposição de um material mais enriquecido em N proveniente da leguminosa, também, não exerceu influência sobre a taxa de decomposição. Características físicas e químicas da liteira juntamente com a população de microrganismos no solo afetam diretamente a decomposição (APOLINÁRIO et al., 2014). A alta relação C/N do material depositado neste experimento proveniente da gramínea sugere elevado potencial de imobilização do N na biomassa microbiana (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES; BRITO, 2007). Desse modo, é necessário que os microrganismos absorvam o N disponível no solo para decompôr a massa de liteira (BODDEY et al., 2004), fato esse que pode explicar os maiores teores de N na LE em comparação com o material depositado. A velocidade de decomposição e capacidade de mineralização está diretamente ligada à atividade de decompositores que são estimulados pela liberação gradativa do N na liteira (APOLINÁRIO et al., 2014). Geralmente, gramíneas que apresentam elevado teor de C e relação C/N > 30 possuem compostos mais recalcitrantes como a lignina e polifenóis (GERDES et al., 2000). Os grupos fenólicos dessas moléculas formam ligações estáveis com grupos nitrogenados (amina, amida, amino, entre outras), formando estruturas complexas (ALVES et al., 2011). Essa dinâmica favorece a associação do N à lignina, tornando a liteira mais resistente à atividade dos decompositores (ALVES et al., 2011). Desse modo, a fertilização de N com 138 kg de N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, assim como a presença da leguminosa no Consórcio, não exerceram influência na taxa de decomposição.

Nesse experimento, fatores ambientais como temperatura, pluviosidade e umidade do solo, atuaram com maior intensidade na modificação da taxa de decomposição em comparação com características químicas da liteira (SANCHES et al., 2009). Desse modo, o valor k variou entre estações, evidenciando maior decaimento de massa nas Águas. A temperatura está diretamente relacionada com a atividade microbiana. Experimentos avaliando o decaimento de massa da liteira provenientes de duas espécies, *Calluna vulgaris* e *Pteridium aquilinum*, evidenciaram que a respiração microbiana aumentou exponencialmente conforme a temperatura aumenta (ANDERSON; HETHERINGTON, 1999). Em segunda instância, a disponibilidade de água no solo pode limitar a atividade de fungos e bactérias (KOHMANN et al., 2018). Em geral, a temperatura é considerada o fator ambiental mais influente na decomposição. Contudo, em situações de clima mais quente, a umidade do solo começa a assumir maior importância na manutenção de altas taxas de atividade microbiana (KRISHNA; MOHAN, 2017). Vale ressaltar que existe um efeito sinérgico entre essas duas variáveis, com isso a decomposição é favorecida em situações de altas temperaturas e precipitações (KOHMANN et al., 2019).

### 5.3 Potencial de FBN pela *Macrotyloma*

A cultivar Java mostrou grande potencial de fixação do N<sub>2</sub> exibindo valores de Ndd acima de 80%. Essa leguminosa é considerada uma planta promiscua, ou seja, não necessita da inoculação de bactéria específica para assumir altas taxas de fixação de N (MORRIS, 2008b). Em estudo realizado na mesma área experimental por Amaral et al. (2023), foram isoladas dez estirpes de bactérias, a partir de amostras de nódulos e solo rizosférico coletadas nas pastagens do tratamento Consórcio. Estirpes de bactérias nativas fixadoras de N<sub>2</sub> nunca antes catalogadas, promoveram maior desenvolvimento vegetal e acúmulo de N que a estirpe comercial recomendada para inoculação dessa espécie. Desse modo, a alta especificidade da planta hospedeira com as bactérias fixadoras de N do local parece ter favorecido a alta eficiência da fixação de N<sub>2</sub>. Os resultados obtidos neste experimento foram semelhantes com alguns estudos realizados com leguminosas tropicais, que evidenciaram proporção acima de 80% de N derivado da fixação (CADISCH, 1989).

As gramíneas possuem maior capacidade de absorção do N disponível no solo em relação às leguminosas. Quando essas plantas ocupam a mesma área, é notório uma limitação

na absorção do N disponível no solo por parte das leguminosas acarretando maior dependência do processo de fixação do N<sub>2</sub> atmosférico (VIEIRA-VARGAS et al., 1995). Uma vez que a absorção de N pelos vegetais não parece exercer influência no fracionamento isotópico desse elemento, as plantas não-fixadoras refletem a marcação do δ<sup>15</sup>N do N disponível no solo (UNKOVICH, 2008). A diferença nos valores de δ<sup>15</sup>N entre as plantas referência e o *Macrotyloma* evidenciam as diferentes fontes de N que essas plantas utilizam para seu desenvolvimento vegetal (BODDEY et al., 2001; Figura 3). As espécies selecionadas como referência mostraram abundância δ<sup>15</sup>N em média de 2,70 ( $\pm 0,4$ ), sugerindo que o N disponível no solo dispõe de marcação isotópica similar (OKITO, 2004). As leguminosas apresentaram valores de δ<sup>15</sup>N -1,36 ( $\pm 0,4$ ), evidenciando elevada proporção de aproveitamento do N<sub>2</sub> atmosférico. Os valores de δN<sup>15</sup> do *Macrotyloma* mais negativos em relação ao δ<sup>15</sup>N do N disponível do solo indicam uma forte contribuição do processo de FBN (UNKOVICH; PATE, 2000).

A proporção de Ndda entre as estações do ano não apresentou grandes variações, sendo 82,02 e 85,44% para as Águas e Seca, respectivamente. Embora estudos recentes em Lavras – MG com *Arachis pintoi* cv. BRS Mandobi consorciado com capim-marandu tenham verificado reduções na contribuição do N<sub>2</sub> atmosférico em condições de baixa temperaturas e precipitações, os resultados obtidos para a Java não parecem ter sofrido influência das variações climáticas. Contudo, foi observado maior contribuição da FBN na época das Águas em comparação à Seca. Visto que não houve grandes diferenças entre a eficiência simbiótica da fixação de N<sub>2</sub> entre estações do ano, a variação na quantidade de N oriundo da FBN parece estar associada às condições climáticas favoráveis ao desenvolvimento vegetal da leguminosa na época das Águas. A técnica da abundância natural utilizada nesse trabalho não considera a transferência de N da leguminosa para a gramínea. Em subsuperfície, a senescênciade nódulos, tecidos radiculares e produção de exsudados, podem disponibilizar N para a gramínea acompanhante afetando sua marcação isotópica (BODDEY et al., 2000). Estudos conduzidos na Embrapa Agrobiologia avaliando a recuperação do N pelo capim-marandu quando associado a leguminosas como *Centrosema hybrid*, *Galactia striata* e *Desmodium ovalifolium I* verificaram que 30 a 40% do N acumulado pela gramínea ocorre em função da FBN (VIEIRA-VARGAS, 1995). Desse modo, para estimativas mais confiáveis e verossímeis da contribuição de N pela leguminosa, é interessante utilizar diferentes técnicas simultaneamente como a abundância natural e diluição isotópica do δ<sup>15</sup>N.

#### **5.4 Como o Input de N Via Adubação ou FBN Afeta o Consumo e a Excreção de N?**

O consumo de pastagem é determinado pela interação entre a estrutura do dossel da pastagem e aspectos inerentes ao pastejo animal, como volume do bocado, taxa de bocado e tempo de pastejo (CONGIO et al., 2018; POPPI; MCLENNAN, 1995). O consumo de matéria seca (CMS) foi semelhante nos diferentes tipos de pastagem. Em pastagens tropicais, a distribuição dos componentes morfológicos no dossel desempenha maior influência no CMS que o valor nutritivo das forrageiras (CONGIO et al., 2018). Apesar da aplicação do mesmo critério de manejo do pastejo no experimento, os componentes estruturais do pasto variaram entre os diferentes tipos de pastagem. Contudo, a magnitude desse efeito não foi capaz de alterar o CMS dos animais entre tratamentos. De maneira geral, as gramíneas participam da dieta animal em proporção muito superior às leguminosas em dosséis consorciados, indicando seletividade do pastejo animal. Algumas leguminosas tropicais, como a Java, podem apresentar teor de taninos condensados entre 1,5 a 4,6%, podendo influenciar negativamente no consumo de forragem (MUELLER-HARVEY et al., 2019). Nesse sentido, reduzidas taxas de ingestão da leguminosa proporcionam maior potencial de contribuição da FBN à pastagem consorciada e ao sistema de produção (DOS SANTOS et al., 2023).

A produção de forragem não ocorre de maneira uniforme ao longo do ano, a qual afeta diretamente o CMS (ROUQUETTE, 2015). Nesse estudo, não houve diferença quanto à oferta de MV entre estações do ano. Desse modo, a redução no CMS na estação Seca parece ocorrer em função do acúmulo de material senescente na planta, uma vez que não houve diferença no teor de N na MVGram entre as estações. Nesse cenário, a colheita da forragem pelos animais é dificultada em decorrência de uma redução na proporção de folha e aumento da quantidade de material morto no dossel (DA SILVA et al., 2013). Consequentemente, o volume do bocado será diminuído, sendo necessário um incremento na taxa do bocado e tempo de pastejo animal para compensar esse efeito (OLIVEIRA NETO et al., 2013). O consumo animal será afetado negativamente em resposta ao desequilíbrio nesses fatores.

O N consumido por animal é definido pela relação entre a quantidade de forragem ingerida e seu valor nutritivo (HOMEM et al., 2021c). No Consórcio foi notório maior concentração de N no pastejo simulado da gramínea. Ademais, como já mencionado, a leguminosa apresenta maior concentração de N, menor conteúdo de fibra e alta digestibilidade da biomassa (GOMES et al., 2018). Em vista da semelhança do CMS entre os tratamentos, a mudança no valor nutritivo das forrageiras não foi suficiente para alterar o consumo de N por animal. Entretanto, o Consórcio evidenciou o menor consumo de N por animal proveniente da gramínea. Desse modo, a presença da leguminosa contribuiu significativamente para o incremento no consumo N total por animal e por área, equiparando as médias entre tratamentos. Esse efeito mostra que em pastagens consorciadas, a massa de gramínea removida pelo pastejo animal é reduzida; com isso, os efeitos negativos associados ao baixo valor nutritivo das gramíneas exercem menor influência no metabolismo animal. Nesse experimento, a quantidade de leguminosa consumida pelos animais mostrou grande relação com a presença dessa planta no dossel da pastagem. Desse modo, na época das Águas, quando havia maior proporção dessa planta na composição botânica do dossel, a ingestão de leguminosa assumiu valores mais elevados em relação à Seca. Resultados semelhantes foram encontrados em estudo realizados na estação experimental da CEPLAC em Itabela na Bahia, com capim-marandu consorciado com *Arachis Pintoi* cv. Belomonte. O aumento da proporção de leguminosas no dossel da pastagem favoreceu a participação dessa planta na dieta animal. Em consequência, houve um incremento no ganho de peso média diário (PEREIRA et al., 2020).

Uma vez que não foram constatadas grandes variações no N consumido por animal entre os tipos de pastagem, a excreção de N apresentou o mesmo comportamento, não diferindo entre tratamentos. No entanto, a introdução de uma espécie mais enriquecida em proteína bruta como a Java, influencia diretamente no suprimento de N para a microbiota ruminal (ROTZ et al., 2005). A introdução da leguminosa proporcionou um aumento na Eficiência no Uso do Nitrogênio (EUN) nos animais, apresentando valores de 13, 14 e 31% para o Controle, N-Fert e Consórcio, respectivamente (Figuras 4, 5 e 6). Resultados superiores a 30% foram encontrados em animais submetidos a dieta capim marandu em monocultura ou em consórcio com amendoim forrageiro (HOMEM et al., 2021b). A variação na EUN pode estar associada com a qualidade nutritiva da forragem na dieta animal. A esse respeito, a fibra potencialmente digestível das leguminosas apresenta maior resistência à degradação no rúmen, favorecendo o sinergismo com a fonte de carboidrato na dieta (DETMANN et al., 2009). Como consequência, maior síntese de proteína microbiana e menor excreção de N via urina será observada, juntamente com um acréscimo no teor de N recalcitrante nas fezes dos animais (GUIMARÃES et al., 2022). Dessa maneira, o incremento de N proporcionado pelas leguminosas na dieta não aumentou a excreção de N por animal.

Em conjunto com a liteira, as excretas animais correspondem às vias de ciclagem de nutrientes mais importantes no sistema solo-planta-animal (HAYNES; WILLIAMS, 1993). A excreção e o consumo de N seguiram o mesmo padrão de comportamento em resposta às condições ambientais. Características químicas e estruturais do pasto variam em função da

maturidade das forrageiras e condições climáticas. Desse modo, a ingestão de nutrientes pelos animais não será constante ao longo do ano, influenciando a disponibilização de N através das excretas dos animais (GARCIA et al., 2021). Dessa maneira, as condições favoráveis ao desenvolvimento vegetal nas Águas favoreceram o consumo animal, e consequentemente, a excreção de N. O aumento da renovação de tecidos vegetais na época das Águas, associado à maior eficiência de pastejo, favorece o incremento de folhas de idade fisiológica reduzida na dieta animal (BAHMANI et al., 2003). Em resultado, altos níveis de digestibilidade e teor de proteína bruta da forragem consumida são observados, proporcionando maior excreção de N por animal nessa estação (DA SILVA et al., 2013). Vale ressaltar que nesse estudo não foi observado redução no teor de N no pastejo simulado da gramínea entre as estações do ano. Com isso, as alterações associadas ao valor nutritivo do pasto parecem ter ocorrido em função da redução na digestibilidade aparente da MS, MO e FDN (DOS SANTOS et al., 2023). Nesse cenário, animais submetidos a dietas com alto teor de fibras excretam fezes com menor teor de N orgânico e inorgânico e maior relação C/N, contribuindo para menor excreção de N na Seca (VAN VLIET et al., 2007).

A excreção de N por área ( $\text{kg N ha}^{-1} \text{ estação}^{-1}$ ) está diretamente relacionada com a taxa de lotação. Embora o maior número de animais por área no N-Fert não tenha proporcionado um incremento no consumo de N ( $\text{kg N ha}^{-1} \text{ estação}^{-1}$ ), a excreção de N foi maior no pasto fertilizado. A aplicação de N aumentou a taxa de lotação dos piquetes fertilizados, sendo 15,41 e 18,15% maior em relação ao Consórcio e Controle, respectivamente. Como já dito anteriormente, a fertilização nitrogenada acelera o ritmo de crescimento das forrageiras, favorecendo o aumento na taxa de aparecimento e maior densidade de perfilhos no pasto (PAIVA et al., 2012, 2015). Para pastagens manejadas com o mesmo critério de manejo, o incremento no acúmulo de forragem implicará em maior eficiência do pastejo animal acarretando o aumento das taxas de lotação (GOMES et al., 2020). A severidade da remoção de tecidos vegetais pode aumentar a quantidade de N ciclado através das excretas animais em relação à deposição de liteira (BODDEY et al., 2004). Contudo, nesse experimento o aumento da taxa de lotação nas pastagens fertilizadas não foi suficiente para reduzir a ciclagem do N via liteira. O manejo caracterizado por elevada OF favoreceu a senescênci a vegetal, fazendo com que parte significativa do N retornasse através da liteira.

Nas pastagens sem aplicação de N, foi notório o balanço negativo desse elemento. Esse tipo de manejo, a longo prazo, reduz a disponibilidade de N no solo conduzindo o sistema para níveis mais severos de degradação (HOMEM et al., 2021b). De outro modo, o *input* de N, através da fertilização nitrogenada ou pela introdução da leguminosa, favoreceu o aumento no estoque de N no solo (Figuras 5 e 6). Nas pastagens consorciadas esse efeito é atribuído ao incremento na proporção de N ciclado através da liteira depositada. Já no N-Fert, a disponibilização do N no solo através da adubação parece ter conservado o estoque de N no solo. Essas técnicas auxiliam na manutenção da fertilidade do solo e consequentemente na produtividade das pastagens. Desse modo, o incremento de N no sistema é uma alternativa para intensificar a produção da pecuária brasileira e frear o processo de degradação de pastagens (JANK et al., 2014). Nesse experimento, o retorno de N através da liteira foi maior para o Consórcio em relação ao Controle e N-fert, evidenciando o grande potencial que o uso da leguminosa exerce na ciclagem total de N. Em vista da relação direta entre o uso de fertilizantes nitrogenados e o aumento na concentração de GEEs na atmosfera, o uso de pastagens consorciadas representa uma possibilidade mais adequada para recuperação de pastagens e redução de impactos ambientais associados ao aquecimento global (LESSA et al., 2014).

## **6. CONCLUSÕES**

A fertilização nitrogenada em pastagens de capim-marandu favorece a taxa de deposição de liteira, contudo esse efeito não modificou a quantidade de massa de liteira estocada na superfície do solo.

Apesar da deposição de liteira mais rica em N no Consórcio e de uma maior disponibilização de N pela fertilização, as diferentes fontes de N não exerceram influência na taxa de decomposição da liteira.

No Consórcio e no Controle, as excreções de N através da urina e fezes dos animais foram semelhantes, indicando que essa leguminosa pode promover maior ingestão de N pelos animais sem aumentar a quantidade de N excretada pelos animais.

A integração da leguminosa promoveu maior eficiência de uso de N nos animais, em vista de aspectos inerentes a seu valor nutritivo relacionados com o metabolismo do N no animal.

A ausência do ingresso de N ao longo dos anos em pastagens de capim-marandu pode desencadear estágios severos de degradação.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, R. N.; MENEZES, R. S. C.; SALCEDO, I. H.; PEREIRA, W. E. Relação entre qualidade e liberação de N por plantas do semiárido usadas como adubo verde. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 11, p. 1107-1114, nov. 2011.

ANDERSON, J. M.; HETHERINGTON, S. L. Temperature, nitrogen availability and mixture effects on the decomposition of heather [*Calluna vulgaris* (L.) Hull] and bracken [*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn] litters. **Functional Ecology**, v. 13, n. SUPPL. 1, p. 116-124, jun. 1999.

ANDRADE, C. M. S. DE; VALENTIM, J. F.; CARNEIRO, J. D. C.; VAZ, F. A. Crescimento de gramíneas e leguminosas forrageiras tropicais sob sombreamento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 3, p. 263-270, mar. 2004.

ANDRADE, C. M. S.; ASSIS, G. M. L.; FERREIRA, A. S. Eficiência de longo prazo da consociação entre gramíneas e leguminosas em pastagens tropicais. Congresso Brasileiro de Zootecnia 25, **Anais...** p. 1-31, 2015.

ANDRADE, C. M. S.; FERREIRA, A. S.; CASAGRANDE, D. R. Uso de leguminosas em pastagens: potencial para consórcio compatível com gramíneas tropicais e necessidades de manejo de pastejo. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGEM 27, Embrapa Acre-Artigo em anais de congresso (ALICE). 2015, Piracicaba. Sistemas de produção, intensificação e sustentabilidade da produção animal: **Anais...** Piracicaba: Fealq, 2015.

AOAC **Official methods of analysis**, 17th edn. Association of Official Analytical Chemists, Arlington. 2000.

APOLINÁRIO, V. X. O.; DUBEUX, J. C. B.; MELLO, A. C. L.; VENDRAMINI, J. M. B.; LIRA, M. A.; SANTOS, M. V. F.; MUIR, J. P. Litter Decomposition of Signalgrass Grazed with Different Stocking Rates and Nitrogen Fertilizer Levels. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 2, p. 622-627, mar. 2014b.

APOLINÁRIO, V. X. O.; DUBEUX, J. C. B.; MELLO, A. C. L.; VENDRAMINI, J. M. B.; LIRA, M. A.; SANTOS, M. V. F.; MUIR, J. P. Deposition and decomposition of signal grass pasture litter under varying nitrogen fertilizer and stocking rates. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 4, p. 999-1004, 2013.

ASSIS, T. O.; DE AGUIAR, A. P. D.; VON RANDOW, C.; MELO DE PAULA GOMES, D.; KURY, J. N.; OMETTO, J. P. H. B.; NOBRE, C. A. CO<sub>2</sub> emissions from forest degradation in Brazilian Amazon. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 10, 1 out. 2020.

BAHMANI, I.; THOM, E. R.; MATTHEW, C.; HOOPER, R. J.; LEMAIRE, G. Tiller dynamics of perennial ryegrass cultivars derived from different New Zealand ecotypes: effects of cultivar, season, nitrogen fertiliser, and irrigation. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 54, n. 8, p. 803, 2003.

BARCELLOS, A. D. O. **Avaliação agronômica do híbrido interespecífico de Leucaena e sua qualidade em associação com Brachiaria brizantha cv. Marandu**. 2006.

BARCELLOS, A. DE O. A. K. B. R. L. V. G. B. M. J. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 2008.

BARCELLOS, J. O. J.; SUÑÉ, Y. B. P.; CHRISTOFARI, L. FAGUNDES; SEMMELMANN, C. E. N.; BRANDÃO, F. A pecuária de corte no Brasil: uma abordagem sistêmica da produção à diferenciação de produtos. Encontro Cepan 3: Vantagens Competitivas dos Agronegócios no Mercosul, *Anais...* p. 1-27, 2005.

BARTELEGA, L.; CONVENCIONAIS, F. N. **Fertilizantes nitrogenados convencionais, estabilizados, de liberação lenta, controlada e blends para o cafeeiro.** 2018.

BERG, B.; MCCLAUHERTY, C. **Plant Litter.** Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.

BERNARDINO DE CARVALHO, T.; DE ZEN, S. A cadeia de Pecuária de Corte no Brasil: evolução e tendências. **Revista IPecege**, v. 3, n. 1, p. 85-99, 16 fev. 2017.

BLACK, A. D.; LAIDLAW, A. S.; MOOT, D. J.; O'KIELY, P. Comparative growth and management of white and red clovers. **Irish Journal of Agricultural and Food Research**, v. 48, n. 2, p. 149-166, 2009.

KUMBLE, V. **Brachiaria:** biology, agronomy, and improvement. CIAT, 1996.

BODDEY, R. M.; CASAGRANDE, D. R.; HOMEM, B. G. C.; ALVES, B. J. R. Forage legumes in grass pastures in tropical Brazil and likely impacts on greenhouse gas emissions: A review. **Grass and Forage Science**, v. 75, n. 4, p. 357-371, 11 dez. 2020.

BODDEY, R. M.; MACEDO, R.; TARRÉ, R. M.; FERREIRA, E.; DE OLIVEIRA, O. C.; DE, C.; CANTARUTTI, R. B.; PEREIRA, J. M.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. Nitrogen cycling in Brachiaria pastures: The key to understanding the process of pasture decline. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 103, n. 2, p. 389-403, jul. 2004.

BODDEY, R. M. Use of the  $^{15}\text{N}$  natural abundance technique to quantify biological nitrogen fixation by woody perennials. **Nutrient cycling in agroecosystems**, v. 57, p. 235-270, 2000. BRUCE, R. C.; EBERSOHN, J. P. **Litter measurements in two grazed pastures in Southeast Queensland..pdfTropical Grassland**, 1982.

CADISCH, G.; SYLVESTER-BRADLEY, R.; NÖSBERGER, J.  $^{15}\text{N}$ -Based estimation of nitrogen fixation by eight tropical forage-legumes at two levels of P:K supply. **Field Crops Research**, v. 22, n. 3, p. 181-194, nov. 1989.

CÂNDIDO, M. J. D.; ALEXANDRINO, E.; GOMIDE, C. A. DE M.; GOMIDE, J. A.; PEREIRA, W. E. Período de descanso, valor nutritivo e desempenho animal em pastagem de *Panicum maximum* cv. Mombaça sob lotação intermitente. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 34, n. 5, p. 1459-1467, out. 2005.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O.; CONTIN, T. L. M.; DIAS, F. L. F.; ROSSETTO, R.; MARCELINO, R.; COIMBRA, R. B.; QUAGGIO, J. A. Ammonia volatilisation from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 4, p. 397-401, 2008.

CANTARUTTI, R. B.; TARRE, R.; MACEDO, R.; CADISCH, G.; REZENDE, C. D. P.; PEREIRA, J. M.; BRAGA, J. M.; GOMIDE, J. A.; FERREIRA, E.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. **The effect of grazing intensity and the presence of a forage legume on nitrogen dynamics in Brachiaria pastures in the Atlantic forest region of the south of Bahia, Brazil.** p. 257-271, 2002.

CARDOSO, A. S.; BERNDT, A.; LEYTEM, A.; ALVES, B. J. R.; DE CARVALHO, I. DAS N. O.; DE BARROS SOARES, L. H.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Impact of the intensification of beef production in Brazil on greenhouse gas emissions and land use. **Agricultural Systems**, v. 143, p. 86-96, 1 mar. 2016.

CEZAR, I. M.; QUEIROZ, H. P. ; THIAGO, L. R. L. S. ; GARAGORRY, F. L. ; COSTA, F. P. Sistemas de produção de gado de corte no Brasil: uma descrição com ênfase no regime alimentar e no abate. **Documentos 151**. Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2005.

CHAPMAN, S. K.; NEWMAN, G. S.; HART, S. C.; SCHWEITZER, J. A.; KOCH, G. W. Leaf Litter Mixtures Alter Microbial Community Development: Mechanisms for Non-Additive Effects in Litter Decomposition. **PLoS ONE**, v. 8, n. 4, 29 abr. 2013.

COTRUFO, M. F.; SOONG, J. L.; HORTON, A. J.; CAMPBELL, E. E.; HADDIX, M. L.; WALL, D. H.; PARTON, W. J. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. **Nature Geoscience**, v. 8, n. 10, p. 776-779, 2015.

CRUZ, F. A. **Instalação e calibração de lisímetro de pesagem e determinação da evapotranspiração de referência para a região de Seropédica-RJ.** 2005. 56 f. 2005. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

DA SILVA, H. M. S.; DUBEUX, J. C. B.; DOS SANTOS, M. V. F.; DE ANDRADE LIRA, M.; DE ANDRADE LIRA, M.; MUIR, J. P. Signal grass litter decomposition rate increases with inclusion of calopo. **Crop Science**, v. 52, n. 3, p. 1416-1423, maio 2012.

DA SILVA, S. C.; GIMENES, F. M. A.; SARMENTO, D. O. L.; SBRIBSSIA, A. F.; OLIVEIRA, D. E.; HERNADEZ-GARAY, A.; PIRES, A. V. Grazing behaviour, herbage intake and animal performance of beef cattle heifers on marandu palisade grass subjected to intensities of continuous stocking management. **The Journal of Agricultural Science**, v. 151, n. 5, p. 727-739, 15 out. 2013.

DA SILVA, S.; SBRIBSSIA, A.; PEREIRA, L. Ecophysiology of C4 Forage Grasses- Understanding Plant Growth for Optimising Their Use and Management. **Agriculture**, v. 5, n. 3, p. 598-625, 29 jul. 2015.

DE FIGUEIREDO, E. B.; JAYASUNDARA, S.; DE OLIVEIRA BORDONAL, R.; BERCHIELLI, T. T.; REIS, R. A.; WAGNER-RIDDLE, C.; LA SCALA, N. Greenhouse gas balance and carbon footprint of beef cattle in three contrasting pasture-management systems in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 420-431, 20 jan. 2017.

DE VRIES, MF Wallis. Estimating forage intake and quality in grazing cattle: a reconsideration of the hand-plucking method. **Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives**, v. 48, n. 4, p. 370-375, 1995.

DETMANN, E.; PAULINO, M. F.; MANTOVANI, H. C.; FILHO, S. DE C. V.; SAMPAIO, C. B.; DE SOUZA, M. A.; LAZZARINI, I.; DETMANN, K. S. C. Parameterization of ruminal fibre degradation in low-quality tropical forage using Michaelis-Menten kinetics. **Livestock Science**, v. 126, n. 1-3, p. 136-146, jan. 2009.

DIAS, P. F.; SOUTO, S. M.; RESENDE, A. S.; URQUIAGA, S.; ROCHA, G. P.; MOREIRA, J. F.; FRANCO, A. A. Transferência do N fixado por leguminosas arbóreas para o capim Survenola crescido em consórcio. **Ciência Rural**, v. 37, n. 2, p. 352-356, abr. 2007.

DIAS-FILHO, M. B. Diagnóstico das Pastagens no Brasil. **Embrapa Amazônia Oriental**, v. Documentos, p. 21-43, 2014.

DIAS-FILHO, M. B.; ANDRADE, CMS de. Pastagens no ecossistema do trópico úmido. **Simpósio sobre pastagens nos ecossistemas brasileiros**, v. 2, p. 95-104, 2005.

DOS SANTOS, C. A.; MONTEIRO, R. C.; HOMEM, B. G. C.; SALGADO, L. S.; CASAGRANDE, D. R.; PEREIRA, J. M.; DE PAULA REZENDE, C.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Productivity of beef cattle grazing *Brachiaria brizantha* cv. Marandu with and without nitrogen fertilizer application or mixed pastures with the legume *Desmodium ovalifolium*. **Grass and Forage Science**, v. 78, n. 1, p. 147-160, 5 mar. 2023.

DUBEUX, José CB; SOLLENBERGER, Lynn E. Nutrient cycling in grazed pastures. In: **Management strategies for sustainable cattle production in southern pastures**. Academic Press, 2020. p. 59-75.

DUBEUX, J. C. B.; SOLLENBERGER, L. E.; INTERRANTE, S. M.; VENDRAMINI, J. M. B.; STEWART, R. L. Litter decomposition and mineralization in bahiagrass pastures managed at different intensities. **Crop Science**, v. 46, n. 3, p. 1305-1310, 2006.

DUBEUX, J. C. B.; SOLLENBERGER, L. E.; MATHEWS, B. W.; SCHOLBERG, J. M.; SANTOS, H. Q. **Nutrient cycling in warm-climate grasslands** *Crop Science*, maio 2007.

DUBEUX, J. C. B.; SOLLENBERGER, L. E.; VENDRAMINI, J. M. B.; STEWART, R. L.; INTERRANTE, S. M. Litter mass, deposition rate, and chemical composition in bahiagrass pastures managed at different intensities. **Crop Science**, v. 46, n. 3, p. 1299-1304, maio 2006a.

DUBEUX, J. C. B.; STEWART, R. L.; SOLLENBERGER, L. E.; VENDRAMINI, J. M. B.; INTERRANTE, S. M. Spatial heterogeneity of herbage response to management intensity in continuously stocked Pensacola bahiagrass pastures. **Agronomy Journal**, v. 98, n. 6, p. 1453–1459, nov. 2006b.

FAGUNDES, J. L.; FONSECA, D. M. DA; GOMIDE, J. A.; NASCIMENTO JUNIOR, D. DO; VITOR, C. M. T.; MORAIS, R. V. DE; MISTURA, C.; REIS, G. DA C.; MARTUSCELLO, J. A. Acúmulo de forragem em pastos de *Brachiaria decumbens* adubados com nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 4, p. 397-403, abr. 2005.

FAGUNDES, J. L.; FONSECA, D. M. DA; MORAIS, R. V. DE; MISTURA, C.; VITOR, C. M. T.; GOMIDE, J. A.; NASCIMENTO JUNIOR, D. DO; SANTOS, M. E. R.; LAMBERTUCCI, D. M. Avaliação das características estruturais do capim-braquiária em

pastagens adubadas com nitrogênio nas quatro estações do ano. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 35, n. 1, p. 30-37, fev. 2006.

FAVERJON, L.; ESCOBAR-GUTIÉRREZ, A. J.; LITRICO, I.; LOUARN, G. A conserved potential development framework applies to shoots of legume species with contrasting morphogenetic strategies. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, n. March, p. 1-14, 2017.

GAMA-RODRIGUES, A. C. DA; GAMA-RODRIGUES, E. F. DA; BRITO, E. C. DE. Decomposição e liberação de nutrientes de resíduos culturais de plantas de cobertura em argissolo vermelho-amarelo na região noroeste Fluminense (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1421-1428, dez. 2007.

GERDES, L.; WERNER, J. C.; COLOZZA, M. T.; POSSENTI, R. A.; SCHAMMASS, E. A. Avaliação de características de valor nutritivo das gramíneas forrageiras Marandu, Setária e Tanzânia nas estações do ano. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 29, p. 955-963, 2000.

GOMES, F. DE K.; HOMEM, B. G. C.; DE OLIVEIRA, M. D. B. L.; DUBEUX, J. C. B.; BODDEY, R. M.; BERNARDES, T. F.; CASAGRANDE, D. R. Defoliation frequency affects litter responses and nitrogen excretion by heifers in palisadegrass-forage peanut pastures. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 4, p. 3089-3100, 2020.

GUIMARÃES, B. C.; DE KÁSSIA GOMES, F.; HOMEM, B. G. C.; DE LIMA, I. B. G.; SPASIANI, P. P.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; CASAGRANDE, D. R. Emissions of N<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub> from cattle excreta in grass pastures fertilized with N or mixed with a forage legume. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 122, n. 3, p. 325-346, 21 abr. 2022.

HAMMEL, K. E. Fungal degradation of lignin. **Driven by nature: plant litter quality and decomposition**, v. 33, p. 45, 1997.

HAYNES, R. J.; WILLIAMS, P. Huw. Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. **Advances in agronomy**, v. 49, p. 119-199, 1993.

HEAL, O. W. Plant litter quality and decomposition: an historical overview. **Driven by nature, plant litter quality and decomposition**, 1997.

HOMEM, B. G. C.; DE LIMA, I. B. G.; SPASIANI, P. P.; BORGES, L. P. C.; BODDEY, R. M.; DUBEUX, J. C. B.; BERNARDES, T. F.; CASAGRANDE, D. R. Palisadegrass pastures with or without nitrogen or mixed with forage peanut grazed to a similar target canopy height. 2. Effects on animal performance, forage intake and digestion, and nitrogen metabolism. **Grass and Forage Science**, v. 76, n. 3, p. 413-426, 1 set. 2021a.

HOMEM, B. G. C.; DE LIMA, I. B. G.; SPASIANI, P. P.; BORGES, L. P. C.; BODDEY, R. M.; DUBEUX, J. C. B.; BERNARDES, T. F.; CASAGRANDE, D. R. Palisadegrass pastures with or without nitrogen or mixed with forage peanut grazed to a similar target canopy height. 2. Effects on animal performance, forage intake and digestion, and nitrogen metabolism. **Grass and Forage Science**, v. 76, n. 3, p. 413-426, 1 set. 2021b.

HOMEM, B. G. C.; DE LIMA, I. B. G.; SPASIANI, P. P.; GUIMARÃES, B. C.; GUIMARÃES, G. D.; BERNARDES, T. F.; DE P. REZENDE, C.; BODDEY, R. M.; CASAGRANDE, D. R. N-fertiliser application or legume integration enhances N cycling in

tropical pastures. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 121, n. 2-3, p. 167-190, 1 dez. 2021c.

HOMEM, B. G. C.; ROSA, A. D.; FERREIRA, I. M.; CRUVINEL, I. A. F.; LARA, M. A. S.; BERNARDES, T. F.; CASAGRANDE, D. R. Increasing the population of forage peanut in a mixed pasture by controlling the canopy height. **Grass and Forage Science**, v. 74, n. 3, p. 571-575, 2019.

HUHTANEN, P.; KAUSTELL, K.; JAAKKOLA, S. The use of internal markers to predict total digestibility and duodenal flow of nutrients in cattle given six different diets. **Animal Feed Science and Technology**, v. 48, n. 3-4, p. 211-227, 1994.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo agropecuário 2017**. Disponível em: <https://censoagro2017.ibge.gov.br/>. Acesso em: 24/06/2021

JANK, L.; BARRIOS, S. C.; DO VALLE, C. B.; SIMEÃO, R. M.; ALVES, G. F. The value of improved pastures to Brazilian beef production. **Crop and Pasture Science**, v. 65, n. 11, p. 1132, 2014.

JARAMILLO, D. M.; DUBEUX, J. C. B.; SOLLENBERGER, L.; MACKOWIAK, C.; VENDRAMINI, J. M. B.; DILORENZO, N.; QUEIROZ, L. M. D.; SANTOS, E. R. S.; GARCIA, L.; RUIZ-MORENO, M.; VAN SANTEN, E. Litter mass, deposition rate, and decomposition in nitrogen-fertilized or grass-legume grazing systems. **Crop Science**, v. 61, n. 3, p. 2176-2189, 1 maio 2021.

JOHNSON, C. R. Effects of nitrogen fertilization and harvest date on yield, digestibility, fiber, and protein fractions of tropical grasses. **Journal of animal science**, v. 79, n. 9, p. 2439-2448, 2001.

KOHMANN, M. M.; SOLLENBERGER, L. E.; DUBEUX, J. C. B.; SILVEIRA, M. L.; MORENO, L. S. B. Legume proportion in grassland litter affects decomposition dynamics and nutrient mineralization. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 3, p. 1079-1089, 1 maio 2019.

KOHMANN, M. M.; SOLLENBERGER, L. E.; DUBEUX, J. C. B.; SILVEIRA, M. L.; MORENO, L. S. B. Legume proportion in grassland litter affects decomposition dynamics and nutrient mineralization. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 3, p. 1079-1089, 2019.

KOHMANN, M. M.; SOLLENBERGER, L. E.; DUBEUX, J. C. B.; SILVEIRA, M. L.; MORENO, L. S. B.; SILVA, L. S.; ARYAL, P. Nitrogen Fertilization and Proportion of Legume Affect Litter Decomposition and Nutrient Return in Grass Pastures. **Crop Science**, v. 58, n. 5, p. 2138-2148, 2 set. 2018.

KRISHNA, M. P.; MOHAN, M. Litter decomposition in forest ecosystems: a review. **Energy, Ecology and Environment**, v. 2, n. 4, p. 236-249, 2017.

KUZYAKOV, Y.; FRIEDEL, J. K.; STAHR, K. Review of mechanisms and quantification of priming effects. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, n. 11-12, p. 1485-1498, out. 2000.

**LAPIG Dados Mapeamento da Qualidade de Pastagem Brasileira entre 2000 e 2020.** Disponível em:<<https://atlasdaspastagens.ufg.br/assets/hotsite/documents/metodos/pt/Qualidad%20de%20Pastagem.pdf>>. Acesso em 15/10/2023. 2022a.

LARA, M. A. S.; PEDREIRA, C. G. S. Respostas morfogênicas e estruturais de dosséis de espécies de Braquiária à intensidade de desfolhação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 7, p. 760-767, jul. 2011.

LESSA, A. C. R.; MADARI, B. E.; PAREDES, D. S.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S.; JANTALIA, C. P.; ALVES, B. J. R. Bovine urine and dung deposited on Brazilian savannah pastures contribute differently to direct and indirect soil nitrous oxide emissions. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 190, p. 104-111, 1 jun. 2014.

MARASCHIN, G. E.; MOTT, G. O. Resposta de uma complexa mistura de pastagem tropical a diferentes sistemas de pastejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 24, n. 2, p. 221-227, 1989.

MARTHA, G. B.; ALVES, E.; CONTINI, E. Land-saving approaches and beef production growth in Brazil. **Agricultural Systems**, v. 110, p. 173-177, jul. 2012.

MCNAUGHTON, S. J. Grasses and grazers, science and management. **Ecological Applications**, v. 3, n. 1, p. 17-20, 1993.

MINSON, Dennis J. Digestible energy of forage. **Forage in ruminant nutrition**, p. 85-149, 1990.

MORRIS, J. B. *Macrotyloma axillare* and *M. uniflorum*: Descriptor analysis, anthocyanin indexes, and potential uses. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 55, n. 1, p. 5-8, fev. 2008a.

MORRIS, J. B. *Macrotyloma axillare* and *M. uniflorum*: descriptor analysis, anthocyanin indexes, and potential uses. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 55, n. 1, p. 5-8, 21 fev. 2008b.

MUELLER-HARVEY, I.; BEE, G.; DOHME-MEIER, F.; HOSTE, H.; KARONEN, M.; KÖLLIKER, R.; LÜSCHER, A.; NIDERKORN, V.; PELLINKAAN, W. F.; SALMINEN, J. P.; SKØT, L.; SMITH, L. M. J.; THAMSBORG, S. M.; TOTTERDELL, P.; WILKINSON, I.; WILLIAMS, A. R.; AZUHNWI, B. N.; BAERT, N.; BRINKHAUS, A. G.; COPANI, G.; DESRUES, O.; DRAKE, C.; ENGSTRÖM, M.; FRYGANAS, C.; GIRARD, M.; HUYEN, N. T.; KEMPF, K.; MALISCH, C.; MORA-ORTIZ, M.; QUIJADA, J.; RAMSAY, A.; ROPIAK, H. M.; WAGHORN, G. C. Benefits of Condensed Tannins in Forage Legumes Fed to Ruminants: Importance of Structure, Concentration, and Diet Composition. **Crop Science**, v. 59, n. 3, p. 861-885, 1 maio 2019.

MUIR, J. P.; PITMAN, W. D.; FOSTER, J. L. Sustainable, low-input, warm-season, grass-legume grassland mixtures: Mission (nearly) impossible? **Grass and Forage Science**, v. 66, n. 3, p. 301-315, 2011.

OLIVEIRA NETO, R. A. DE; SILVA, J. H. S. DA; ROCHA, M. G. DA; PÖTTER, L.; SICHONANY, M. J. DE O.; BISCAÍNO, L. L.; SANTOS, F. A. DOS; DIFANTE, M. V. B.

Ingestive behavior, performance and forage intake by beef heifers on tropical pasture systems. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 42, n. 8, p. 549-558, ago. 2013.

PAIVA, A. J.; PEREIRA, L. E. T.; DA SILVA, S. C.; DIAS, R. A. P. Identificação de faixas etárias a partir de respostas morfogênicas de capim-marandu manejado sob lotação contínua e fertilizado com nitrogênio. **Ciência Rural Universidade Federal de Santa Maria**, 2015.

PAIVA, A. J.; SILVA, S. C. DA; PEREIRA, L. E. T.; GUARDA, V. D.; PEREIRA, P. DE M.; CAMINHA, F. O. Structural characteristics of tiller age categories of continuously stocked marandu palisade grass swards fertilized with nitrogen. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 41, n. 1, p. 24-29, jan. 2012.

PEREIRA, J. M.; REZENDE, C. DE P.; FERREIRA BORGES, A. M.; HOMEM, B. G. C.; CASAGRANDE, D. R.; MACEDO, T. M.; ALVES, B. J. R.; CABRAL DE SANT'ANNA, S. A.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Production of beef cattle grazing on *Brachiaria brizantha* (*Marandu grass*) - *Arachis pintoi* (forage peanut cv. Belomonte) mixtures exceeded that on grass monocultures fertilized with 120 kg N/ha. **Grass and Forage Science**, v. 75, n. 1, p. 28–36, 1 mar. 2020.

REZENDE, C. D. P.; CANTARUTTI, R. B.; BRAGA, J. M.; GOMIDE, J. A.; PEREIRA, J. M.; FERREIRA, E.; MACEDO, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; CADISCH, G.; GILLER, K. E. Deposição e desaparecimento de serrapilheira em pastagens de Brachiaria no Atlântico região florestal do sul da Bahia, Brasil. p. 99-112, 1999.

ROBBINS, G. B.; BUSHELL, J. J.; MCKEON, G. M. Nitrogen immobilization in decomposing litter contributes to productivity decline in ageing pastures of green panic (*Panicum maximum* var. trichoglume). **The Journal of Agricultural Science**, v. 113, n. 3, p. 401–406, 1989.

ROBERTSON, G. P.; GRACE, P. R. Greenhouse Gas Fluxes in Tropical and Temperate Agriculture: The need for a Full-Cost accounting of Global Warming Potentials. **Environment, Development and Sustainability**, v. 6, n. 1/2, p. 51-63, 2004.

SALES, K. C.; CABRAL, C. E. A.; ABREU, J. G.; BARROS, L. V.; SILVA, F. G.; CABRAL, C. H. A.; SANTOS, A. R. M.; SILVA JUNIOR, C. A.; CAMPOS FILHO, J. B. What is the maximum nitrogen in marandu palisadegrass fertilization? **Grassland Science**, v. 66, n. 3, p. 153–160, 2020.

SANCHES, L.; VALENTINI, C. M. A.; BIUDES, M. S.; NOGUEIRA, J. DE S. Dinâmica sazonal da produção e decomposição de serrapilheira em floresta tropical de transição. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 2, p. 183-189, abr. 2009.

SILVA, H. M. S.; DUBEUX, J. C. B.; DOS SANTOS, M. V. F.; DE ANDRADE LIRA, M.; DE ANDRADE LIRA, M.; MUIR, J. P. Signal grass litter decomposition rate increases with inclusion of calopo. **Crop Science**, v. 52, n. 3, p. 1416-1423, 2012.

SILVA, L. F. C. E; VALADARES FILHO, S. DE C.; CHIZZOTTI, M. L.; ROTTA, P. P.; PRADOS, L. F.; VALADARES, R. F. D.; ZANETTI, D.; BRAGA, J. M. DA S. Creatinine excretion and relationship with body weight of Nellore cattle. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 41, n. 3, p. 807-810, mar. 2012.

SOLLENBERGER, L. E.; DUBEUX, J. C. B. Warm-climate, legume-grass forage mixtures versus grass-only swards: An ecosystem services comparison. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 51, 2022.

SOLLENBERGER, L. E.; NEWMAN, Y. C.; VENDRAMINI, J. M. B. **General Guidelines for Managing Pastures for Dairy** How often should grazed pastures. p. 1-3, 2015.

TAIZ, Lincoln; ZEIGER, Eduardo. **Fisiologia vegetal**. Universitat Jaume I, 2006.

TECHIO PEREIRA, L. E.; PAIVA, A. J.; GUARDA, V. D.; MESQUITA PEREIRA, P. DE; CAMINHA, F. O.; DA SILVA, S. C. Herbage utilisation efficiency of continuously stocked marandu palisade grass subjected to nitrogen fertilisation. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 2, p. 114–123, 2015.

THILAKARATHNA, M. S.; MCELROY, M. S.; CHAPAGAIN, T.; PAPADOPoulos, Y. A.; RAIZADA, M. N. Belowground nitrogen transfer from legumes to non-legumes under managed herbaceous cropping systems. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 36, n. 4, 1 dez. 2016.

THOMAS, R. J. The role of the legume in the nitrogen cycle of productive and sustainable pastures. **Grass and Forage Science**, v. 47, n. 2, p. 133-142, 1992.

THOMAS, R. J.; ASAOKAWA, N. M. Decomposition of leaf litter from tropical forage grasses and legumes. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 25, n. 10, p. 1351-1361, out. 1993.

TITGEMEYER, E. C.; ARMENDARIZ, C. K.; BINDEL, D. J.; GREENWOOD, R. H.; LÖ, C. A. Evaluation of titanium dioxide as a digestibility marker for cattle 1. **J. Anim. Sci**, v. 79, p. 1059–1063, 2001.

UNKOVICH, M. J.; PATE, J. S. An appraisal of recent field measurements of symbiotic N<sub>2</sub> fixation by annual legumes. **Field Crops Research**, v. 65, n. 2-3, p. 211–228, mar. 2000.

VENDRAMINI, J. M. B.; DUBEUX JÚNIOR, J. C. B.; SILVEIRA, M. L. Nutrient cycling in tropical pasture ecosystems. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 9, n. 2, p. 308-315, 30 jun. 2014.

VENDRAMINI, J. M. B.; SILVEIRA, M. L. A.; DUBEUX JR., J. C. B.; SOLLENBERGER, L. E. Environmental impacts and nutrient recycling on pastures grazed by cattle. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 36, n. suppl, p. 139-149, 2007.

VIERA-VARGAS, M. S.; SOUTO, C. M.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Quantification of the contribution of N<sub>2</sub> fixation to tropical forage legumes and transfer to associated grass. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 27, n. 9, p. 1193-1200, set. 1995.

VRIES, M. F. W. DE. Estimating Forage Intake and Quality in Grazing Cattle: A Reconsideration of the Hand-Plucking Method. **Journal of Range Management**, v. 48, n. 4, p. 370, jul. 1995.