



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA**

**CAIO CESAR CARNEIRO DOS SANTOS**

**SUBSTITUIÇÃO DA SILAGEM DE MILHO POR PALMA FORRAGEIRA  
(*OPUNTIA STRICTA* (HAW) HAW.) MAIS BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR E  
UREIA NA DIETA DE OVINOS**

**RECIFE - PE  
FEVEREIRO DE 2026**

**CAIO CESAR CARNEIRO DOS SANTOS**

**SUBSTITUIÇÃO DA SILAGEM DE MILHO POR PALMA  
FORRAGEIRA (*OPUNTIA STRICTA* (HAW) HAW.) MAIS BAGAÇO DE  
CANA DE AÇÚCAR E UREIA NA DIETA DE OVINOS**

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

Área de Concentração: Zootecnia

Orientador (a) : Prof. Dr. Marcelo de Andrade Ferreira

Coorientador (a): Prof. Dr. João Paulo Ismério dos Santos Monnerat

Coorientador (a): Prof. Dr. Francisco Fernando Ramos de Carvalho

**RECIFE - PE  
FEVEREIRO DE 2026**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação Sistema  
Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a)  
autor(a)

S237s Santos, Caio Cesar Carneiro dos.  
Substituição da silagem de milho por palma  
forrageira (*Opuntia stricta* (Haw) Haw.) mais bagaço  
de cana de açúcar e ureia na dieta de ovinos / Caio  
Cesar Carneiro dos Santos. – Recife, 2026.  
79 f.; il.

Orientador(a): Marcelo de Andrade Ferreira.  
Co-orientador(a): João Paulo Ismério dos Santos  
Monnerat.  
Co-orientador(a): Francisco Fernando Ramos de  
Carvalho.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de  
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em  
Zootecnia, Recife, BR-PE, 20226.

Inclui referências.

1. Consumo. 2. Cactos . 3. Fibras na nutrição  
animal. 4. Forragem 5. Regiões áridas. I. Ferreira,  
Marcelo de Andrade, orient. II. Monnerat, João  
Paulo Ismério dos Santos, coorient. III. Carvalho,  
Francisco Fernando Ramos de, coorient. IV. Título

CDD 636



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA**

**SUBSTITUIÇÃO DA SILAGEM DE MILHO POR PALMA  
FORRAGEIRA (*OPUNTIA STRICTA* (HAW) HAW.) MAIS BAGAÇO DE  
CANA DE AÇÚCAR E UREIA NA DIETA DE OVINOS**

Tese elaborada por

CAIO CESAR CARNEIRO DOS SANTOS

Aprovado.../.../....

BANCA EXAMINADORA

---

Prof.º Dr. Marcelo de Andrade Ferreira

Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

---

Prof.º Drª. Luciana Felizardo Pereira Soares

Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

---

Prof.ª Drª. Stela Antas Urbano

Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN

---

Prof. Dr. Valdson José da Silva

Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

---

Drª. Juana Catarina Cariri Chagas

University of Agricultural Sciences – SLU

*Dedico,*

*A minha esposa, Raissa Camila da Silva, que me apoia em todos os momentos e que me faz o homem mais feliz e sortudo do mundo. A minha filha, Ayla Carvalho dos Santos Martins, a maior alegria do papai, que me faz ainda mais feliz. A minha mãe, Celia Regina Martins, que sempre esteve comigo, e sempre me incentivou a dar meu melhor. Por vocês dedico toda minha vida, com todo amor.*

## Resumo

O objetivo deste estudo foi avaliar como a substituição da silagem de milho por palma forrageira (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw), bagaço de cana de açúcar e ureia afeta o consumo de matéria seca, matéria seca potencialmente digestível (MSpd), a digestibilidade, pH ruminal, eficiência de utilização de compostos nitrogenados, síntese de proteína microbiana, o comportamento ingestivo e a atividade ruminal em ovinos, mantendo-se os níveis de fibra em detergente neutro (FDN) constantes. Cinco níveis de substituição (0, 25, 50, 75 e 100%) foram testados utilizando cinco ovinos machos da raça Santa Inês fistulados e canulados no rúmen (peso corporal de  $37,5 \pm 5,57$  kg), em delineamento em quadrado latino  $5 \times 5$ . Como resultado, o consumo de matéria seca (MS), FDN corrigida para cinzas e proteínas (FDNcp) e o consumo de nutrientes digestíveis totais (NDT) diminuíram linearmente com o nível de substituição, enquanto o consumo de FDN indigestível (FDNi) aumentou linearmente. Já a digestibilidade aparente da MS, da matéria orgânica (MO) e da FDN da dieta também apresentou declínio linear. Observou-se um aumento linear no pool ruminal de FDNi e no tempo de retenção da FDNcp (Tr). Por outro lado, o pool ruminal de FDN potencialmente digestível (FDNpd), bem como as taxas de passagem (kp) e degradação (kd) da FDNcp, diminuíram. Por outro lado, a substituição da silagem de milho pela combinação de palma, bagaço de cana de açúcar e ureia não afetou a eficiência alimentar para MS e FDNcp; entretanto, a eficiência de ruminação para MS e FDNcp diminuiu. Já o pH ruminal não foi afetado pela substituição ( $6,2 \pm 0,04$ ). O nitrogênio amoniacal ruminal (NAR) aumentou linearmente de acordo com os níveis de substituição (15,10–19,08 mg/dL), com interação entre os níveis e o tempo da coleta, apresentando picos de NAR mais elevados à medida que o nível de substituição aumentava (19,00–27,12 mg/dL). Por outro lado, o consumo de nitrogênio, o nitrogênio fecal, o nitrogênio retido (g/dia e em porcentagem do consumo) e a síntese de proteína microbiana diminuíram com o aumento dos níveis de substituição. Em contraste, o nitrogênio urinário em porcentagem do consumo e o nitrogênio ureico sanguíneo aumentaram linearmente. Os resultados deste estudo sugerem que manter a FDN fixada em 45% da MS em dietas com a substituição crescente de silagem de milho por palma OEM e bagaço de cana de açúcar mais ureia pode não ser uma abordagem viável. Essa limitação decorre principalmente da necessidade de incluir quantidades progressivamente maiores de bagaço de cana de açúcar para atingir o nível de FDN desejado, o que aumenta substancialmente a proporção de FDNi na fração fibrosa da dieta, afetando negativamente a ingestão de NDT pelos animais. Dessa forma, conclui-se que a combinação de palma forrageira, bagaço de cana de açúcar e ureia não substituiu adequadamente a silagem de milho, pois reduziu as taxas de passagem e degradação da FDNcp no rúmen, aumentando o tempo de retenção e, conseqüentemente, reduzindo o consumo de nutrientes. Além disso, diminuiu a eficiência da utilização de compostos nitrogenados e limita a síntese de proteína microbiana no rúmen. Recomenda-se considerar não apenas o teor total de FDN na formulação de dietas para ovinos, mas também os níveis de FDNi e FDNpd ou MSpd.

**Palavras-chave:** Consumo; Cactáceas; Fibra; Fontes de forragem; Nitrogênio não proteico; Semiárido; Subproduto.

## **Abstract**

The objective of this study was to see how replacing corn silage with cactus cladodes (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw), sugarcane bagasse, and urea affect dry matter intake, potentially digestible dry matter (pdDM), digestibility, ruminal pH, efficiency of nitrogen compound utilization, microbial protein synthesis eating behavior, and rumen activity in sheep, while keeping the neutral detergent fiber (NDF) levels the same. Five replacement levels (0, 25, 50, 75, and 100%) were tested using five Santa Inês sheep males fitted with rumen fistulas (body weight  $37.5 \pm 5.57$  kg), in a  $5 \times 5$  Latin square design. Dry matter (DM) intake, NDF corrected for ash and protein (NDFap) intake, and total digestible nutrients (TDN) intake decreased linearly with the replacement level, while intake of undigestible NDF (iNDF) increased linearly. Apparent digestibility of diet DM, organic matter (OM), and NDF also showed a linear decline. There was a linear increase in the ruminal pool of iNDF and the retention time of NDFap (Rt). Conversely, the ruminal pool of potentially degradable NDF (pdNDF), as well as NDFap passage (kp) and degradation (kd) rates, decreased. Replacement of corn silage with the mixture cactus, sugarcane bagasse and urea did not affect feeding efficiency for DM and NDFap; however, rumination efficiency for both DM and NDFap declined. Ruminal pH was not affected by the replacement ( $6.2 \pm 0.04$ ). Ruminal ammonia nitrogen (RAN) increased linearly according to the substitution levels (15.10–19.08 mg/dL), with an interaction between levels and collection time, showing higher RAN peaks as the replacement level increased (19.00–27.12 mg/dL). Conversely, nitrogen intake, fecal nitrogen, retained nitrogen (g/day and as a percentage of intake), and microbial protein synthesis decreased with increasing substitution levels. In contrast, urinary nitrogen as a percentage of intake and blood urea nitrogen increased linearly. The findings of this study suggest that maintaining NDF fixed at 45% of dietary dry matter in diets with increasing replacement of corn silage by OEM cladodes and sugarcane bagasse supplemented with urea may not be a feasible approach. This limitation stems primarily from the need to include progressively larger amounts of sugarcane bagasse to achieve the desired NDF level, which substantially raises the proportion of iNDF in the fiber fraction and negatively affects the animals' intake of TDN. It is concluded that the combination of cactus cladodes, sugarcane bagasse, and urea had not adequately replaced corn silage, as it reduced the passage rates and degradation of NDFap in the rumen, increasing retention time and consequently reducing nutrient consumption, in addition to decreasing the efficiency of nitrogen compound utilization, it limits microbial protein synthesis in the rumen. It is recommended to consider not only total NDF content when formulating diets for sheep but also the levels of iNDF and pdNDF or pdDM.

**Keywords:** By-product; Cactaceae; Fiber; Intake; Non protein nitrogen; Roughage sources; Semiarid.

## LISTA DE TABELAS

### REVISAO DE LITERATURA

---

TABELA 1. Composição química dos diferentes gêneros de palma forrageira.....07

### **CAPÍTULO 1. Fibra em detergente neutro como fator limitante na substituição da silagem de milho por palma forrageira (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw) mais bagaço de cana de açúcar e ureia.**

---

TABELA 1. Composição química dos ingredientes utilizados nas dietas experimentais.....33

TABELA 2. Proporções dos ingredientes e composição química das dietas experimentais.....34

TABELA 3. Valores médios de consumo de nutrientes em ovinos.....37

TABELA 4. Valores médios da digestibilidade aparente total dos nutrientes.....37

TABELA 5. Valores médios do conteúdo ruminal, cinética da digestão e tempo de retenção das frações de fibra em dietas de ovinos.....38

TABELA 6. Valores médios do comportamento ingestivo de ovinos.....38

### **CAPÍTULO 2. A substituição de silagem de milho por palma forrageira (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw) mais bagaço de cana de açúcar e ureia reduz a eficiência de utilização de compostos nitrogenados e a síntese de proteína microbiana no rúmen.**

---

TABELA 1. Composição química dos ingredientes utilizados nas dietas experimentais.....55

TABELA 2. Proporções dos ingredientes e composição química das dietas experimentais.....55

TABELA 3. Valores médios de ingestão de matéria seca e nutrientes digestíveis em ovinos.....59

TABELA 4. Fluido ruminal, balanço de nitrogênio, nitrogênio ureico sanguíneo (NUS), síntese de proteína microbiana e eficiência no rúmen.....60

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### **CAPÍTULO 1. Fibra em detergente neutro como fator limitante na substituição da silagem de milho por palma forrageira (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw) mais bagaço de cana de açúcar e ureia.**

---

**GRÁFICO 1.** Proporção de fibra em detergente neutro potencialmente digestível (FDNpd) e fibra em detergente neutro indigestível (FDNi) na fibra em detergente neutro corrigida para cinzas e proteína (FDNcp) (g/kg MS) e digestibilidade total da FDNcp (g/dia) de acordo com os níveis de substituição da silagem de milho por palma forrageira (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw) mais bagaço de cana de açúcar e ureia na dieta de ovinos (0, 25, 50, 75 e 100%). As barras de erro indicam o desvio padrão da média.....40

**GRÁFICO 2.** Relação entre o pool ruminal de fibra em detergente neutro potencialmente digestível (FDNpd) e indigestível (FDNi) (g) e as taxas fracionárias de passagem (kp, % h<sup>-1</sup>) e degradação (kd, % h<sup>-1</sup>) de FDNcp de acordo com os níveis de substituição da silagem de milho por palma forrageira (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw) mais bagaço de cana de açúcar e ureia na dieta de ovinos (0, 25, 50, 75 e 100%). As barras de erro indicam o desvio padrão da média.....42

**GRÁFICO 3.** Relação entre o pool ruminal de fibra em detergente neutro corrigida para cinzas e proteína (FDNpd, g) e sua fração indigestível (FDNi, g), e o tempo de retenção ruminal (Tr, h) de acordo com os níveis de substituição da silagem de milho por palma forrageira (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw) mais bagaço de cana de açúcar e ureia na dieta de ovinos (0, 25, 50, 75 e 100%). As barras de erro indicam o desvio padrão da média .....42

**GRÁFICO 4.** Relação entre a taxa fracionária de desaparecimento ruminal (ki, % h<sup>-1</sup>) da fibra em detergente neutro potencialmente digestível (FDNpd) e indigestível (FDNi), em função dos níveis de substituição da silagem de milho por palma forrageira (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.), mais bagaço de cana de açúcar e à ureia, na dieta de ovinos (0, 25, 50, 75 e 100%). As barras de erro indicam o desvio-padrão da média.....44

### **CAPÍTULO 2. A substituição de silagem de milho por palma forrageira (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw) mais bagaço de cana de açúcar e ureia reduz a eficiência de utilização de compostos nitrogenados e a síntese de proteína microbiana no rúmen.**

---

**GRÁFICO 1.** Resposta do pH ruminal ao longo do tempo (0–6 h após a alimentação) em ovinos alimentados com dietas contendo diferentes níveis de substituição de silagem de milho por palma forrageira e bagaço de cana de açúcar mais ureia (0, 25, 50, 75 e 100%). As linhas representam as curvas de regressão ajustadas para cada nível de substituição.....60

**GRÁFICO 2.** Concentração de nitrogênio amoniacal ruminal (NAR, mg/dL) ao longo do tempo (0–6 h após a alimentação) em ovinos alimentados com dietas contendo diferentes níveis de substituição de silagem de milho por palma forrageira e bagaço de cana de açúcar mais ureia (0, 25, 50, 75 e 100%). As linhas representam as curvas de regressão ajustadas para cada nível de substituição.....61

**GRÁFICO 3.** Relação entre os valores observados e estimados (usando a equação desenvolvida por Santos et al. (2021)) da síntese de proteína microbiana (SPM, g/dia) em ovinos. A linha contínua representa o ajuste de regressão linear, indicando um alto grau de concordância entre os valores observados e previstos ( $Y = 1,0773x - 1,0572$ ;  $R^2 = 0,9993$ ) .....62

## SUMÁRIO

<b>1.INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
<b>2.REVISAO DE LITERATURA.....</b>	<b>02</b>
2.1 Limitações climáticas e nutricionais dos sistemas de produção de ruminantes no semiárido.....	02
2.2 Particularidades nutricionais e limitações do uso da palma forrageira em dietas de animais ruminantes.....	06
2.3 Bagaço de cana de açúcar como fonte de fibra em dietas de ruminantes no Semiárido.....	10
2.4 Respostas ingestivas, digestivas e ruminais de ruminantes em função do teor e da composição da fibra em detergente neutro da dieta.....	14
<b>3.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>18</b>
<b>CAPÍTULO 1. Fibra em detergente neutro como fator limitante na substituição da silagem de milho por palma forrageira (<i>Opuntia stricta</i> (Haw.) Haw) mais bagaço de cana de açúcar e ureia.</b>	
<b>RESUMO.....</b>	<b>30</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>31</b>
<b>1.INTRODUÇÃO .....</b>	<b>32</b>
<b>2.MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>33</b>
2.1 Animais, manejo e delineamento experimental.....	33
2.2 Ingredientes e formulação de dietas.....	34
2.3 Amostragem e coleta de dados.....	35
2.4 Análise química e cálculos experimentais.....	36
2.5 Métodos estatísticos.....	37
<b>3.RESULTADOS.....</b>	<b>37</b>
<b>4.DISSCUSSÃO.....</b>	<b>39</b>
<b>5.CONCLUSÃO.....</b>	<b>46</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>46</b>
<b>CAPÍTULO 2. A substituição de silagem de milho por palma forrageira (<i>Opuntia stricta</i> (Haw.) Haw) mais bagaço de cana de açúcar e ureia reduz a eficiência de utilização de compostos nitrogenados e a síntese de proteína microbiana no rúmen.</b>	
<b>RESUMO.....</b>	<b>52</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>53</b>
<b>1.INTRODUÇÃO .....</b>	<b>54</b>

<b>2.MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>55</b>
2.1 Animais, manejo e delineamento experimental.....	55
2.2 Ingredientes e formulação de dietas.....	56
2.3 Amostragem e coleta de dados.....	57
2.4 Análise química e cálculos experimentais.....	58
2.5 Métodos estatísticos.....	60
<b>3.RESULTADOS.....</b>	<b>60</b>
<b>4.DISSCUSSÃO.....</b>	<b>63</b>
<b>5.CONCLUSÃO.....</b>	<b>66</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>66</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A produção de ruminantes em regiões semiáridas enfrenta desafios estruturais decorrentes da variabilidade climática, da irregularidade pluviométrica e da recorrência de longos períodos de estiagem, fatores que limitam de forma significativa a disponibilidade de volumosos ao longo do ano (Rufino et al., 2016). Nesse contexto, a dependência de forragens tradicionais, especialmente aquelas destinadas à produção de silagem, impõe riscos produtivos e econômicos consideráveis, uma vez que culturas como milho e sorgo apresentam elevada exigência hídrica e instabilidade agrônômica sob condições de estresse ambiental (Fluck et al., 2018; Siqueira et al., 2019). Como consequência, os sistemas de produção tornam-se vulneráveis ao aumento dos custos alimentares e à redução da eficiência produtiva.

Diante da necessidade de alternativas forrageiras adaptadas às condições edafoclimáticas do semiárido, a palma forrageira tem se consolidado como um recurso estratégico amplamente explorado em regiões áridas e semiáridas do mundo, incluindo o Brasil. No contexto brasileiro, o clone Orelha de Elefante Mexicana (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw) destaca-se pela resistência a cochonilha do carmin (*Dactylopius coccus*), estabilidade agrônômica e ampla adaptação às condições do semiárido nordestino (Santos et al., 2020; Araújo Junior et al., 2024).

Do ponto de vista nutricional, a palma forrageira apresenta composição caracterizada por alto teor de água, minerais e carboidratos não fibrosos (CNF), conferindo elevado valor energético quando comparada à maioria das forragens tradicionalmente utilizadas na alimentação de ruminantes (Dutra et al., 2024). Entretanto, apesar dessas vantagens, a palma apresenta limitações importantes relacionadas ao seu baixo teor de fibra em detergente neutro (FDN), o que pode comprometer processos fundamentais da digestão ruminal, como a estimulação da mastigação, a produção de saliva, a manutenção do pH ruminal e a dinâmica fermentativa do rúmen-retículo (Mertens, 1997; Pastorelli et al., 2022). Dessa forma, sua utilização como componente majoritário da dieta requer associação com fontes fibrosas capazes de assegurar o adequado funcionamento ruminal.

Nesse contexto, resíduos agroindustriais fibrosos têm sido amplamente investigados como alternativas para complementar dietas à base de palma forrageira, especialmente em regiões onde tais subprodutos são abundantes e economicamente acessíveis. O bagaço de cana de açúcar destaca-se entre esses ingredientes por sua ampla disponibilidade, baixo custo relativo e potencial de uso estratégico durante períodos de escassez forrageira (Almeida et al., 2018). Embora seja classificado como uma forragem de baixa qualidade nutricional, em função do

elevado teor de fibra indigestível e da baixa concentração de proteína bruta, sua associação com fontes energéticas e nitrogenadas pode viabilizar sua utilização em dietas de ruminantes (Abdel-Alim; Elnesr, 2022).

Estudos anteriores indicam que dietas baseadas na associação entre palma forrageira, bagaço de cana de açúcar e ureia pode maximizar o consumo e a digestibilidade da matéria seca (MS) e de seus componentes, sugerindo potencial para substituição parcial ou total de volumosos convencionais. No entanto, uma limitação recorrente nesses estudos reside no fato de que a inclusão da palma forrageira frequentemente resulta em alterações no teor de FDN das dietas experimentais, conduzindo a comparações entre tratamentos com níveis distintos desse componente (Cardoso et al., 2019; Moura et al., 2020). Considerando o papel central da FDN na regulação do consumo voluntária, da taxa de passagem ruminal, parâmetros fermentativos ruminais, do comportamento ingestivo e da eficiência digestiva em ruminantes (Van Soest, 1965; Van Soest, 1994; Shi et al., 2023), tais diferenças dificultam a dissociação entre os efeitos atribuídos à fonte volumosa e aqueles decorrentes da variação no teor total de fibra da dieta.

Dessa forma, esta tese foi estruturada com o propósito de investigar a substituição da silagem de milho por palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana associada ao bagaço de cana de açúcar e à ureia, em dietas formuladas com teores semelhantes de FDN, destinadas a ovinos. Parte-se da hipótese de que essa estratégia alimentar, quando balanceada com base no teor de fibra, não comprometerá o consumo, a digestibilidade dos nutrientes nem o funcionamento ruminal.

Os capítulos que compõem esta tese abordam, de forma complementar, os efeitos dessa substituição sobre o consumo e a digestibilidade da MS e de seus componentes, a dinâmica ruminal da fibra, o comportamento ingestivo, os parâmetros fermentativos ruminais e a eficiência de utilização dos compostos nitrogenados, contribuindo para o avanço do conhecimento científico e para o desenvolvimento de estratégias alimentares mais resilientes às condições ambientais do semiárido.

## **2. REVISAO DE LITERATURA**

### **2.1. Limitações climáticas e nutricionais dos sistemas de produção de ruminantes no semiárido**

O clima característico das regiões semiáridas ocorre em extensas áreas do planeta, abrangendo o Sahel africano, o sul da África, o sul e o oeste da Ásia, o sudoeste dos Estados Unidos, o norte do México, o interior da Austrália, o sudeste da Península Ibérica e áreas da América do Sul, conforme evidenciado por mapas globais de classificação climática e relatórios

ambientais internacionais (Peel; Finlayson; McMahon, 2007; UNEP, 2021). Esses ambientes compartilham condições edafoclimáticas semelhantes, marcadas por restrição hídrica, elevada variabilidade climática e limitações à produção agropecuária.

No Brasil, a delimitação oficial do semiárido indica que essa região se estende por aproximadamente 1,18 milhão de km<sup>2</sup>, correspondendo a cerca de 12% a 13% do território nacional, abrangendo a maior parte da região Nordeste e o norte do estado de Minas Gerais (IBGE, 2019; SUDENE, 2021). Trata-se da região semiárida mais populosa do mundo, concentrando cerca de 27 a 28 milhões de habitantes, distribuídos em 1.477 municípios pertencentes a onze unidades federativas (IBGE, 2022; INSA, 2023). Esse contingente populacional expressivo confere elevada relevância social e econômica às atividades produtivas desenvolvidas nesse território.

Sob a ótica produtiva, dados censitários indicam que a atividade pecuária, especialmente a criação de ruminantes como bovinos, caprinos e ovinos, está presente em grande parte das propriedades rurais do semiárido brasileiro, desempenhando papel central na geração de renda e na segurança alimentar regional (Vasconcelos et al., 2025). Nesse contexto, destaca-se a ovinocultura, predominantemente voltada à produção de carne, responsável por concentrar aproximadamente 74% do rebanho ovino nacional no semiárido nordestino, evidenciando a forte adaptação dessa atividade às condições ambientais da região (IBGE, 2024).

Entretanto, o clima semiárido caracteriza-se, de modo geral, por precipitação média anual entre 300 e 800 mm, correspondendo de 20% a 50% da evapotranspiração potencial, além de elevada demanda evaporativa e regime pluviométrico irregular, concentrado em curtos períodos do ano e intercalado por longos intervalos de estiagem (FAO, 2019; Scholes, 2020; Zhu et al., 2022). Esse cenário tende a se agravar diante das projeções de mudanças climáticas associadas ao aumento da temperatura global, com alterações nos padrões de aridez, expansão de áreas semiáridas e aumento da frequência e severidade de eventos de seca (Schlaepfer et al., 2017; Shi et al., 2023).

Essas condições impõem desafios significativos aos sistemas de produção de ruminantes, sobretudo em função da limitação dos recursos naturais, com destaque para a baixa disponibilidade de forragem em quantidade e qualidade ao longo do ano, além dos efeitos adversos das condições climáticas extremas sobre o bem-estar e o desempenho produtivo dos animais (Fluck et al., 2018; Siqueira et al., 2019; Dubeux Junior et al., 2021). Togo et al. (2025) demonstram que o aumento da frequência de secas e a irregularidade das precipitações em regiões semiáridas reduzem de forma expressiva a disponibilidade de forragem, especialmente na forma de pastagens. Adicionalmente, estudos em sistemas produtivos sob estresse térmico e

hídrico indicam que a forragem produzida nessas condições apresenta menor digestibilidade e valor nutritivo, exigindo a adoção de estratégias adaptativas para manutenção do desempenho animal (Henry; Eckard; Beauchemin, 2018).

Estudos internacionais demonstram que a conservação de forragens, por meio de técnicas como a ensilagem e a fenação, é reconhecida como uma estratégia central para assegurar oferta estável de alimento para ruminantes durante períodos de déficit hídrico em regiões semiáridas, contribuindo para a manutenção da produção animal em contextos de escassez forrageira (Balehegn et al., 2021; Mello et al., 2025). No semiárido brasileiro, essas estratégias de conservação, especialmente aquelas relacionadas à ensilagem, são amplamente discutidas na literatura nacional como meios eficazes de manter a disponibilidade alimentar ao longo do ano (Paula et al., 2021). Embora a fenação também seja utilizada, a ensilagem tem se destacado, sendo frequentemente aplicada a recursos forrageiros adaptados ao clima semiárido (Godoi et al., 2024; Monção et al., 2024).

Nesse cenário, a utilização de forragens conservadas, particularmente na forma de silagem, constitui uma estratégia amplamente difundida nos sistemas de produção animal (Fluck et al., 2018). Entretanto, em regiões caracterizadas por irregularidade pluviométrica e restrição hídrica, essas condições tendem a limitar o desenvolvimento das culturas destinadas à ensilagem, resultando em menor produtividade por hectare e maior instabilidade na produção de volumosos. Melo et al. (2021) observaram que a produtividade do milho para silagem cultivado em sistema de sequeiro foi significativamente inferior à obtida sob condições irrigadas, especialmente em localidades com menor precipitação anual, evidenciando o impacto direto do déficit hídrico sobre o acúmulo de biomassa. Como consequência, a menor eficiência produtiva tende a elevar os custos de produção da silagem, uma vez que os custos operacionais passam a ser diluídos em menor volume de MS produzida, tornando essa alternativa menos viável economicamente para determinados sistemas de produção.

Outro desafio relevante refere-se à aquisição de silagens em regiões semiáridas. Após a severa estiagem de 2011–2012, intensificou-se a produção de forragens conservadas, especialmente silagens de milho e sorgo, em regiões com maior disponibilidade hídrica, com posterior comercialização desses volumosos para áreas semiáridas. Embora essa estratégia tenha ampliado a oferta de silagem nessas regiões, sua adoção tem ocorrido, de modo geral, a custos elevados, particularmente quando considerados os custos de transporte e a eficiência nutricional desses ingredientes por unidade de nutriente fornecido (CONAB, 2023; CEPEA, 2023).

Em uma simulação baseada em preços regionais recentes<sup>1</sup>, a comparação entre a silagem de milho e o milho grão indica que, embora o custo estimado por quilograma de MS seja inferior para a silagem de milho, o custo por quilograma de nutrientes digestíveis totais (NDT) é superior quando comparado ao milho grão. Esse resultado evidencia que avaliações econômicas fundamentadas exclusivamente no custo por quilograma de MS podem indicar uma vantagem apenas aparente da silagem de milho. Por outro lado, análises baseadas no custo por unidade de energia indicam uma relação menos favorável, com maior custo por unidade de NDT na aquisição da silagem. Essa desvantagem econômica por unidade de energia compromete a viabilidade financeira da utilização de silagens convencionais e, em muitos casos, inviabiliza sistemas de produção de ruminantes a médio e longo prazo em regiões semiáridas.

Diante das limitações técnicas e econômicas associadas à produção e à aquisição de silagens convencionais em regiões semiáridas, os impactos dessas restrições tendem a ser ainda mais pronunciados em função da estrutura fundiária e socioeconômica predominante nesses territórios. Dados do Censo Agropecuário de 2017 indicam que a maior parte dos estabelecimentos agropecuários localizados no semiárido brasileiro apresenta reduzida dimensão territorial, com expressiva concentração em áreas inferiores a 20 hectares, totalizando cerca de 1,2 milhão de estabelecimentos. Além disso, estima-se que mais de dois terços dos estabelecimentos pecuários da região sejam classificados como agricultura familiar, caracterizando-se pelo uso predominante de mão de obra da própria família, baixos níveis de capitalização e elevada dependência dos recursos naturais locais (Aquino, Alves; Vidal, 2020; Barreto Filho; Fontes, 2025). Esse conjunto de características evidencia um contexto estrutural de alta vulnerabilidade climática e produtiva, no qual estratégias alimentares dependentes de insumos externos ou de elevado custo tornam-se, frequentemente, inviáveis.

Nesse sentido, torna-se evidente que estratégias alimentares baseadas predominantemente em volumosos convencionais apresentam limitações estruturais em sistemas de produção de ruminantes no semiárido, tanto sob o ponto de vista produtivo quanto econômico. Nesse contexto, a adoção de forragens naturalmente adaptadas às condições edafoclimáticas da região emerge como alternativa estratégica para mitigar os efeitos da restrição hídrica e da variabilidade climática sobre a oferta de alimentos. Entre essas alternativas, destaca-se a palma forrageira, cuja elevada eficiência no uso da água, estabilidade produtiva sob estresse hídrico e ampla utilização em sistemas pecuários do semiárido justificam

---

<sup>1</sup> Valores de preços obtidos a partir de boletins informais de mercado agropecuário regional, divulgados em janeiro de 2026, utilizados exclusivamente para fins ilustrativos.

a necessidade de uma análise aprofundada de seu potencial como volumoso em dietas para ruminantes (Herrera-Ângulo et al., 2023; Santana et al., 2021).

## **2.2. Particularidades nutricionais e limitações do uso da palma forrageira em dietas de animais ruminantes**

A palma forrageira constitui um dos recursos alimentares mais estratégicos para regiões semiáridas, especialmente durante períodos de estiagem prolongada. No cenário global, análises bibliométricas confirmam a predominância do gênero *Opuntia* nas publicações científicas. Herrera-Ângulo et al. (2023), ao examinarem cerca de 500 artigos com participação de mais de 1600 autores, identificaram que o termo “*Opuntia*” apresentou crescimento expressivo ao longo das últimas décadas, consolidando-se como central nas pesquisas envolvendo cactáceas. Em contrapartida, no contexto brasileiro, além de *Opuntia*, o gênero *Nopalea* também desempenha papel relevante, especialmente no semiárido nordestino. Entre os principais cultivares/clones destacam-se *Opuntia ficus-indica* Mill. (‘Gigante’ e ‘IPA-20’), *Opuntia stricta* (Haw.) Haw. (‘Orelha de Elefante Mexicana — OEM’) e *Nopalea cochenillifera* Salm Dyck (‘Miúda’ e ‘IPA Sertânia’) (Santana et al., 2021; Araújo Junior et al., 2024).

Estudos comparativos, como os de Edvan et al. (2020) e Pessoa et al. (2024), demonstram que a composição química da palma forrageira pode variar dependendo de fatores como gênero, genótipo, idade fisiológica da planta, condições edafoclimáticas e práticas de manejo (Dubeux Junior et al., 2021). Entretanto, apesar dessa heterogeneidade, a palma mantém características bromatológicas que convergem, tais como, baixo teor de MS ( $125,2 \pm 38,9$  g/kg de matéria natural), proteína bruta (PB) ( $45,8 \pm 9,2$  g/kg MS), FDN ( $248,3 \pm 42,7$  g/kg MS) e elevado teor de CNF ( $553,8 \pm 73,5$  g/kg MS) (Tabela 1).

Os estudos apresentados na Tabela 1 foram selecionados a partir de buscas direcionadas em bases de dados científicas reconhecidas internacionalmente, abrangendo o período de 2020 a 2025; incluindo Web of Science, Scopus, ScienceDirect e Google Scholar. Foram reunidos dados sobre a composição química (expressa em base de MS) de dois gêneros de palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*) na alimentação de ruminantes, excluindo relatos sem dados analíticos completos ou estudos conduzidos com espécies não ruminantes. Dessa forma, os dados de composição obtidos foram utilizados para caracterizar a composição média desses dois gêneros (independentemente genótipo, clone, idade fisiológica da planta, condições edafoclimáticas e práticas de manejo) comparando-a à outros tipos de volumosos.

**Tabela 1.** Composição química dos diferentes gêneros de palma forrageira<sup>2</sup>

Referência	Palma forrageira	MS <sup>1</sup>	MO <sup>2</sup>	PB <sup>2</sup>	CNF <sup>2</sup>	FDNcp <sup>2</sup>
Araujo et al. (2023)	<i>Nopalea</i>	112,0	892,0	58,0	610,0	211,0
Bezerra et al. (2021)	<i>Nopalea</i>	100,0	812,7	58,6	477,5	259,7
Lima et al., (2023)	<i>Nopalea</i>	217,9	856,0	27,0	552,1	257,8
Muhamed et al. (2021)	<i>Nopalea</i>	123,6	870,6	40,0	563,9	252,8
Pinho et al. (2021)	<i>Nopalea</i>	83,9	881,2	56,1	509,2	310,9
Rocha-filho et al. (2021)	<i>Nopalea</i>	96,0	848,0	46,0	539,0	246,0
Santos et al. (2022)	<i>Nopalea</i>	119,0	867,0	57,5	527,0	268,0
Silva et al. (2022)	<i>Nopalea</i>	186,0	923,0	47,0	665,0	201,0
Silva et al., (2022)	<i>Nopalea</i>	132,3	761,3	52,5	403,0	286,0
Siqueira et al. (2022)	<i>Nopalea</i>	116,0	876,0	34,0	568,0	260,0
Média		128,7	858,8	47,7	541,5	255,3
Araujo et al. (2023)	<i>Opuntia</i>	138,0	918,0	46,0	607,0	245,0
Correia et al. (2025)	<i>Opuntia</i>	102,7	867,0	44,9	496,9	314,0
Galeno et al. (2022)	<i>Opuntia</i>	102,0	867,7	44,9	496,9	314,0
Medeiros et al. (2024)	<i>Opuntia</i>	140,0	919,0	54,0	569,0	280,0
Mora-Luna et al. (2022)	<i>Opuntia</i>	223,0	908,0	33,0	712,0	148,0
Muhamed et al. (2021)	<i>Opuntia</i>	97,3	851,0	55,0	580,1	198,1
Netto et al. (2022)	<i>Opuntia</i>	126,0	880,0	49,8	555,0	257,0
Oliveira et al. (2021)	<i>Opuntia</i>	108,0	812,0	36,1	409,0	300,0
Rocha-filho et al. (2021)	<i>Opuntia</i>	77,0	859,0	46,0	509,0	262,0
Silva et al., (2022)	<i>Opuntia</i>	112,1	766,5	36,2	479,2	227,7
Siqueira et al., (2022)	<i>Opuntia</i>	122,0	887,0	40,0	532,0	302,0
Média		122,6	866,3	44,2	540,6	258,9
Média de todos os estudos incluídos.		125,2	863,0	45,8	541,0	257,2

<sup>1</sup>g/Kg Matéria natural; <sup>2</sup> g/Kg Matéria seca; MS= matéria seca; MO= matéria orgânica; PB= proteína bruta; CNF= carboidratos não fibrosos; FDNcp= fibra em detergente neutro corrigida para cinzas e proteína.

O baixo teor de MS observado na palma forrageira está intrinsecamente relacionado ao seu metabolismo ácido crassuláceo (CAM) e sua estrutura morfológica típica de plantas suculentas de regiões semiáridas (Louhaichi et al., 2025). Plantas CAM, realizam a abertura estomática no período noturno, quando as temperaturas são mais baixas e a umidade relativa do ar é mais elevada, diminuindo substancialmente as perdas de água por transpiração, em comparação com plantas C3 ou C4 (Dutra et al., 2024).

Aliado a isso, plantas suculentas, como cactos, desenvolveram tecidos espessados e carnosos que funcionam como reservatórios de água para uso durante períodos prolongados de seca. Esses tecidos geralmente são constituídos por parênquima altamente vacuolado, que permite a retenção de grandes quantidades de água no interior das células. Esse tipo de

<sup>2</sup> Nota: Os estudos incluídos na Tabela 1 foram selecionados conforme os critérios descritos anteriormente, os valores apresentados correspondem aos dados reportados pelos autores originais.

armazenamento reduz a dependência direta de fontes externas de água, conferindo uma forma de resistência à seca (Fradera-Soler; Grace; Mravec, 2022). Essas características favorece a eficiência no uso da água e a retenção hídrica nos tecidos vegetais, conferindo à palma forrageira alta umidade e, conseqüentemente, baixos teores de MS.

De modo geral, a palma forrageira apresenta um teor de PB médio de 45,8 g/kg de MS (Tabela 1). Essa concentração pode ser considerada inferior, quando comparado a outros volumosos de maior teor proteico, como o feno de alfafa (19,2% de PB), o feno de capim Tifton 85 (11,8% de PB) e a silagem de milho (8,9% de PB), entre outros (Siqueira et al., 2022; Araújo et al., 2023; Silva et al., 2025). Contudo, esse valor equipara-se a gramíneas tropicais de regiões semiáridas (4,6 a 7,1%), silagem de milho sem espiga (5,5 a 6,0%) e silagens de sorgo (5,4 a 6,6%), entre outros (Rocha Filho et al., 2021; Medeiros et al., 2024).

Em termos de composição, o teor de PB da palma forrageira é majoritariamente solúvel no rúmen (cerca de 57%), com predominância de nitrogênio não proteico (NNP), que representa em média 71% da fração proteica (Lopes et al., 2019). Contudo, o baixo teor proteico da palma proporciona concentrações de nitrogênio amoniacal ruminal (NAR) reduzidas (6,6 mg/dL) (Silva et al., 2025). Embora essa concentração seja suficiente para atender à síntese mínima de proteína microbiana no rúmen (5 a 8 mg/dL), o crescimento bacteriano ótimo em dietas mais energéticas requer níveis de NAR entre 15 e 20 mg/dL (Zhang et al., 2020; Niazifar et al., 2024). Tal característica evidencia a necessidade de suplementação proteica de dietas para animais ruminantes baseadas em palma forrageira. Dentre as estratégias de suplementação proteica, o uso de fontes de NNP, como a ureia, apresenta elevada compatibilidade com a palma. Tal efeito decorre, principalmente, do elevado teor de CNF presentes nessa cactácea, os quais favorecem a sincronização entre a oferta de proteína degradável no rúmen e a disponibilidade de energia fermentescível, potencializando a eficiência do metabolismo microbiano (Siqueira et al., 2017; Mora-Luna et al., 2022).

Vários autores têm caracterizado os aspectos digestíveis do uso da palma forrageira em dietas para ruminantes. Esses estudos têm consistentemente relatado valores de digestibilidade relativamente altos para essa forrageira. Teklu et al. (2023), avaliando a composição química e digestibilidade in vitro de clones pertencentes ao gênero *Opuntia*, descreveram digestibilidade in vitro da matéria seca (IVDMS) média de 78%. Resultados de outros estudos corroboram esses números, Silva et al. (2025) e Razor et al. (2015) reportaram IVDMS médias de 84% e 73%, respectivamente, para palma forrageira. Essas estimativas superam, de maneira expressiva, aquelas normalmente observadas em volumosos convencionais utilizados na alimentação de ruminantes. Por exemplo, Razor et al. (2015) observaram IVDMS de 62,0%

para feno de alfafa e 52,8% para feno de aveia; Godoi et al. (2024) relataram 63,4% para silagem de milho; e Ciriaco et al. (2021) registraram 54,7% para feno de tifton 85.

A superioridade digestível da palma forrageira é uma consequência direta de seu perfil de carboidrato totais (CT), caracterizado por elevadas concentrações de frações solúveis e de rápida fermentação (CNF, em média 541,0 g/kg MS) e baixo teor de fibra (FDN, em média 257,2 g/kg MS) (Tabela 1). Ao fracionar o CT da palma forrageira, Magalhães et al. (2021) descreveu concentrações maiores de carboidratos solúveis de rápida digestão (A+B1, variando entre 741,7 e 866,9 g/kg CT) e menores concentrações de fibra potencialmente digestível de lenta degradação (B2, variando entre 101,0 e 221,0 g/kg CT) compondo essa cactácea. De acordo com os estudos de Pessoa et al. (2020), avaliando genótipos do gênero *Opuntia* em diferentes fases fenológicas, e de Pessoa et al. (2024), avaliando genótipos do gênero *Nopalea* nas mesmas condições, a predominância das frações A+B1 sobre a fração B2 mostrou-se constante, independentemente do gênero, genótipo, e fase fenológica. Esses autores relataram valores para as frações A+B1 e B2, variaram entre 566,6 e 714,6 g/kg CT, e entre 142,3 e 385,4 g/kg CT, respectivamente.

Esse padrão de composição evidencia o potencial energético da palma forrageira, aproximando-a de grãos energéticos, como o milho, que apresenta em sua composição predominantemente carboidratos solúveis (em média as frações A+B1 e B2 apresentam 846,4 e 128,3 g/kg CT, respectivamente) (Poveda-Parra et al., 2021). Por outro lado, a distanciando de volumosos comuns, como silagens, fenos e forragens frescas, que apresentam maiores proporções da fração B2. Por exemplo, a silagem de milho (237,8 g/kg CT de A+B1 e 427,3 g/kg CT de B2); o feno de azevém (197,2 g/kg CT de A+B1 e 447,8 g/kg CT de B2); e a silagem de capim-elefante (294,0 g/kg CT de A+B1 e 371,8 g/kg CT de B2) (Pereira et al., 2020; Cunha et al., 2022; Godoi et al., 2024).

A baixa concentração da fração B2 observada nos clones de palma forrageira (independente do gênero) reflete diretamente o seu reduzido teor de FDN. Assim como ocorre em função do seu baixo teor de PB, alguns autores recomendam a associação da palma forrageira a uma fonte de fibra na dieta, especialmente fibra fisicamente efetiva (Cruz et al., 2020; Dutra et al., 2024).

Isto ocorre porque, a efetividade da FDN desempenha papel central na manutenção do equilíbrio ruminal, por estimular a mastigação e a ruminação, processos que aumentam o fluxo salivar, o qual constitui o principal tampão fisiológico responsável pela neutralização da acidez ruminal (Shi et al., 2023). Embora estudos com incubações in vitro indiquem que o padrão fermentativo da palma forrageira, quando avaliada isoladamente, não compromete a

manutenção do pH ruminal, mantendo-se em torno de 6,73 (Silva et al., 2025), em um contexto dietético no qual seja associada a outras fontes de CNF (particularmente grãos ricos em amido), o elevado teor de CNF, aliado à reduzida quantidade de FDN fisicamente efetiva (FDNfe), favorece a fermentação rápida dos componentes dietéticos no rúmen e diminui sua capacidade tamponante, resultando possivelmente em reduções críticas do pH ruminal (Araujo et al., 2020).

Diante desse cenário, torna-se evidente que a utilização da palma forrageira como componente volumoso da dieta, embora apresente-se promissora, impõe limitações importantes no que se refere ao suprimento de FDN. Assim, a associação da palma forrageira a fontes fibrosas adequadas emerge como estratégia nutricional indispensável para garantir o adequado funcionamento ruminal e o atendimento das exigências nutricionais dos animais (Siqueira et al., 2019).

### **2.3. Bagaço de cana de açúcar como fonte de fibra em dietas de ruminantes no Semiárido**

Na literatura, diversas fontes de volumosos, como fenos, silagens e forragens frescas, têm sido avaliadas com o intuito de suprir as exigências mínimas de FDN na dieta de ruminantes. De modo geral, os resultados obtidos a partir da associação dessas fontes com a palma forrageira têm se mostrado promissores. Maciel et al. (2019), ao substituírem o feno de Tifton 85 por palma forrageira, observaram efeito quadrático no consumo de MS e de CNF na dieta de ovinos, evidenciando que a inclusão da palma em níveis intermediários favorece o consumo de MS e de nutrientes, refletindo positivamente no desempenho animal.

De forma semelhante, Bezerra et al. (2023), ao avaliarem a substituição do feno de tifton por palma forrageira, também relataram efeito quadrático no consumo de MS e de nutrientes, além de efeito quadrático no ganho de peso dos animais. Cardoso et al. (2019), por sua vez, reportaram resultados convergentes quanto ao consumo, associados ainda a melhorias na síntese de proteína microbiana no rúmen quando a palma forrageira foi incluída na dieta. Resultados consistentes também foram observados por Mora-Luna et al. (2022), que relataram aumento quadrático no consumo de MS em dietas contendo palma forrageira associada ao feno de tifton 85.

Em contraste, Khattab et al. (2025), ao substituírem o trevo-berseem por palma forrageira em até 50% da dieta de cabras, não observaram efeito sobre o consumo de MS. Contudo, verificaram aumentos no consumo de CNF e na produção de leite, da ordem de 16% e 18%, respectivamente. De forma semelhante, Melo et al. (2021), ao avaliarem a substituição do capim-elefante por palma forrageira em até 100% da dieta de vacas, observaram efeito quadrático no consumo de MS e de nutrientes, bem como na síntese de proteína microbiana no

rúmen. Já Santos et al. (2022), ao testarem a substituição da cana de açúcar por palma forrageira na dieta de ovinos, relataram respostas consistentes para os mesmos parâmetros avaliados.

Nesse sentido, embora a associação da palma forrageira com fontes de volumosos tradicionais resulte, de modo geral, em respostas positivas no consumo, na digestibilidade e no desempenho animal, a disponibilidade e a viabilidade desses volumosos são frequentemente limitadas em regiões semiáridas. Conforme discutido no tópico inicial desta revisão, a irregularidade pluviométrica, as elevadas temperaturas e a forte sazonalidade da produção forrageira comprometem a oferta contínua de volumosos convencionais, especialmente em sistemas de base familiar e de baixa capitalização. Nesse contexto, torna-se necessária a busca por fontes de fibra alternativas, estáveis ao longo do ano e menos dependentes das condições climáticas, capazes de sustentar a funcionalidade ruminal e a eficiência dos sistemas produtivos.

Nesse sentido, em diferentes regiões do mundo — particularmente em zonas áridas e semiáridas da África, da Ásia e da América Latina — tem-se adotado a associação da palma forrageira com ingredientes fibrosos de baixa degradabilidade como estratégia nutricional para ruminantes. Materiais como palha de trigo, palha de cevada, palha de aveia e bagaço de cana-de-açúcar, caracterizados por elevados teores de FDN (frequentemente superiores a 75–80%), têm sido utilizados para corrigir o baixo teor de fibra estrutural da palma, assegurando níveis adequados de estímulo à mastigação e à ruminação (Ben Salem et al., 2004; De Waal; Combrinck; Fouche, 2015; Pastorelli et al., 2022; Gebeyew et al., 2025). Mesmo quando incluídos em proporções relativamente reduzidas na dieta total, esses ingredientes são capazes de elevar significativamente a oferta de fibra fisicamente efetiva.

Entre essas alternativas, o bagaço de cana de açúcar destaca-se como um dos principais resíduos agroindustriais disponíveis no Brasil, sendo gerado em grandes volumes nas usinas sucroenergéticas. Estima-se que, para cada tonelada de cana processada, aproximadamente 270 a 300 kg de bagaço sejam produzidos, o que confere a esse subproduto elevada disponibilidade regional e baixo custo de aquisição, especialmente em áreas próximas aos polos sucroalcooleiros (Medeiros et al., 2024).

É válido ressaltar que o baixo custo relativo associado ao uso do bagaço de cana de açúcar não se relaciona necessariamente ao seu valor unitário de mercado, mas, sobretudo, à possibilidade de sua inclusão em baixas proporções na dieta, em função do seu elevado teor de FDN (823 g/kg MS; Siqueira et al., 2022). Ingredientes com alta concentração de FDN, especialmente aqueles com elevada fração fisicamente efetiva, são capazes de promover aumentos expressivos na oferta de fibra estrutural da dieta mesmo em níveis reduzidos de inclusão. Essas características tornam o bagaço uma opção estratégica para sistemas pecuários

localizados no Semiárido nordestino, onde o acesso a volumosos convencionais é frequentemente restrito.

Do ponto de vista nutricional, o bagaço de cana de açúcar apresenta limitações importantes, destacando-se o baixo teor de proteína bruta e a elevada concentração de frações fibrosas de baixa digestibilidade, associadas à alta lignificação da parede celular (19 a 24%) (Abdel-Alim; Elnesr, 2022). A lignina presente na fração fibrosa exerce efeito limitante sobre a degradação ruminal, ao formar estruturas rígidas na parede celular vegetal que reduzem a acessibilidade dos microrganismos ruminais aos carboidratos estruturais. Como consequência, a atuação das enzimas fibrolíticas sobre a celulose e a hemicelulose torna-se restrita, resultando em menor degradação da fibra e, conseqüentemente, em reduzido valor energético do ingrediente quando utilizado de forma isolada (Silva et al., 2015; Gado et al., 2017; Almeida et al., 2018; Alokika et al., 2021; Lima et al., 2023).

A exemplo disso, Almeida et al. (2018), ao testarem diferentes relações volumoso:concentrado, utilizando o bagaço de cana de açúcar como volumoso exclusivo na dieta de vacas leiteiras Girolando em sistemas de produção de pequenos produtores, observaram redução linear no consumo de MS e de NDT, bem como na síntese de proteína microbiana no rúmen e, de forma mais acentuada, na produção de leite, a qual apresentou redução de até 23% à medida que se aumentou a proporção de bagaço na dieta. Resultados semelhantes foram relatados por Freitas et al. (2018), que também avaliaram diferentes relações volumoso:concentrado, utilizando o bagaço de cana de açúcar como único volumoso na dieta de vacas mestiças lactantes em regiões semiáridas. Contudo, nos mesmos estudos, quando o bagaço de cana de açúcar foi associado à palma forrageira, observaram-se respostas superiores àquelas obtidas nos níveis mais elevados de inclusão do bagaço e comparáveis às observadas em dietas com menores proporções de bagaço e, conseqüentemente, maior participação de concentrado na composição da dieta.

Quando inserido em dietas baseadas em palma forrageira, o bagaço de cana de açúcar exerce papel particularmente relevante ao complementar o teor de FDN e de fibra fisicamente efetiva da dieta. Siqueira et al. (2022), ao avaliarem o efeito da inclusão de palma forrageira dos gêneros *Nopalea* e *Opuntia*, combinada com bagaço de cana de açúcar e ureia, como alternativa aos volumosos conservados tradicionais (feno de tifton 85, silagem de milho e silagem de sorgo) na dieta de ovinos, observaram maiores consumos e coeficientes de digestibilidade da MS, MO, PB e CNF para a dieta contendo palma (*Nopalea*) associada ao bagaço, enquanto valores intermediários foram registrados para a associação palma (*Opuntia*) mais bagaço. Os autores atribuíram a melhora no consumo e na digestibilidade ao aumento do

teor de CNF e à redução dos teores de FDN decorrentes da inclusão da palma na dieta, recomendando a combinação de palma forrageira e bagaço de cana de açúcar como alternativa viável aos volumosos tradicionais.

De forma semelhante, Siqueira et al. (2019), ao avaliarem a utilização da palma forrageira (*Nopalea* e *Opuntia*) associada ao bagaço de cana de açúcar e ureia como alternativa aos volumosos conservados tradicionais na dieta de ovinos e caprinos, relataram respostas consistentes quanto ao consumo e à digestibilidade dos nutrientes, corroborando o potencial dessa associação em sistemas de produção de pequenos ruminantes. Já Campelo-Lima et al. (2022), ao avaliarem caprinos confinados alimentados com dietas à base de palma forrageira associada ao feno de capim-elefante ou ao bagaço de cana-de-açúcar, observaram que a utilização dessas fontes fibrosas não comprometeu a ingestão de nutrientes nem o desempenho produtivo dos animais, independentemente da condição fisiológica (intactos ou castrados).

Evidências adicionais reforçam que os efeitos positivos da associação entre palma forrageira e o bagaço dependem do equilíbrio entre densidade energética e oferta adequada de fibra estrutural na dieta. Medeiros et al. (2024), ao avaliarem a substituição da silagem de milho sem espiga por palma forrageira associada ao bagaço de cana de açúcar na dieta de vacas em lactação, observaram aumento linear no consumo e na digestibilidade da MS, MO, PB e CNF, atribuído ao menor teor de FDN da dieta e à elevada aceitabilidade da palma pelos animais. No entanto, a produção de leite corrigida apresentou resposta quadrática, uma vez que, após um incremento inicial associado ao maior consumo de MS e energia, a redução excessiva da ingestão de FDN, aliada ao aumento do consumo de CNF, resultou em distúrbios fermentativos ruminais, culminando em queda na produção de leite em função do excesso de carboidratos de rápida fermentação no rúmen.

Apesar dos resultados favoráveis relatados na literatura quanto à associação da palma forrageira com o bagaço de cana de açúcar e outras fontes de volumosos, é importante destacar que, na maioria dos estudos disponíveis, a inclusão da palma forrageira resultou em redução do teor de FDN das dietas experimentais, quando comparadas às respectivas dietas controle baseadas em volumosos tradicionais. Como consequência, muitas das comparações realizadas envolvem dietas com níveis distintos de FDN, o que dificulta a dissociação entre os efeitos atribuídos à fonte volumosa propriamente dita e aqueles decorrentes da alteração no teor total de fibra da dieta (Cardoso et al., 2019; Maciel et al., 2019; Moura et al., 2020; Lopes et al., 2020; Ribeiro et al., 2020; Bezerra et al., 2021).

Tal comportamento torna-se evidente ao se observar que a maior parte dos estudos que associaram a palma forrageira a alguma fonte de fibra relatou melhores resultados quando

foram adotados níveis intermediários de inclusão da palma na dieta. As justificativas para o decréscimo no desempenho, por sua vez, baseiam-se principalmente na redução do consumo de FDN dietética e, conseqüentemente, em alterações na dinâmica ruminal e nos parâmetros fermentativos do rúmen (Melo et al., 2021; Santos et al., 2022; Bezerra et al., 2023 Medeiros et al., 2024).

Diante desse cenário, a interpretação dos efeitos da palma forrageira associada a fontes fibrosas, como o bagaço de cana-de-açúcar, requer uma análise mais refinada do papel do FDN na modulação das respostas digestivas e comportamentais dos ruminantes. A variação do conteúdo de FDN entre dietas experimentais não apenas influencia o consumo voluntário e a digestibilidade dos nutrientes, mas também exerce impacto direto sobre o ambiente ruminal, a taxa de passagem da digesta e os padrões de mastigação e ruminação. Nesse sentido, a compreensão das respostas ruminais ao teor de FDN da dieta, bem como de seus reflexos sobre o consumo, a digestibilidade e o comportamento ingestivo, é fundamental para elucidar os mecanismos subjacentes aos resultados observados na literatura e para embasar estratégias nutricionais mais consistentes, especialmente em sistemas que utilizam dietas à base de palma forrageira no contexto do semiárido.

#### **2.4 Respostas ingestivas, digestivas e ruminais de ruminantes em função do teor e da composição da fibra em detergente neutro da dieta**

A FDN é, historicamente, o principal indicador operacional da fração estrutural dos alimentos utilizados na alimentação de ruminantes, por reunir, sob um mesmo conceito, os principais componentes da parede celular vegetal — celulose, hemicelulose e lignina — e por se relacionar diretamente com processos físicos e fermentativos que determinam consumo, digestibilidade e estabilidade ruminal (Allen e Mertens, 1988; Waldo, 1972). Entretanto, a FDN não constitui uma entidade nutricional homogênea: a mesma concentração de FDN pode refletir materiais com composições e arquiteturas de parede celular distintas, com diferentes graus de lignificação, diferentes taxas de degradação e diferentes efeitos sobre o enchimento ruminal e a motilidade. Assim, interpretações robustas exigem que o teor de FDN seja analisado em conjunto com (i) a composição química da fibra (particularmente a fração indigestível), (ii) as taxas de digestão e passagem e (iii) a efetividade física da fibra (Cannas et al., 2003; Mertens, 2020).

Do ponto de vista químico-funcional, a FDN pode ser particionada em frações com significado biológico distinto: FDN potencialmente digestível (FDN<sub>pd</sub>) e FDN indigestível (FDN<sub>i</sub>). A FDN<sub>i</sub> representa a porção da FDN resistente à degradação microbiana ruminal, fortemente associada à lignina e a ligações cruzadas que reduzem a acessibilidade enzimática,

tornando-se determinante do efeito de enchimento e do “tempo de permanência” da fase sólida no rúmen (Waldo, 1972; Waldo et al., 1986). Já a FDN<sub>pd</sub> corresponde à fração que pode ser degradada ao longo do tempo de retenção ruminal e, portanto, contribui para energia via produção de ácidos graxos voláteis, especialmente acetato, além de influenciar a taxa de desaparecimento da fibra no rúmen (Detmann et al., 2014; Mertens, 2020).

O consumo voluntário de MS é regulado por mecanismos físicos, metabólicos e psicogênicos, cuja contribuição relativa depende da densidade energética, do perfil de fermentação e da carga de fibra de lenta degradação. Em dietas com maior proporção de volumoso, o controle físico (enchimento) tende a dominar: o acúmulo de fibra no rúmen limita a ingestão subsequente quando a taxa de desaparecimento (digestão + passagem) não é suficiente para liberar espaço (Allen, 1996; Dado e Allen, 1995).

Nesse cenário, a FDN<sub>i</sub> assume papel central, pois sua saída depende essencialmente da passagem, não dá digestão, elevando o tempo de retenção e reduzindo o CMS mesmo quando o teor de FDN total não parece excessivo (Waldo, 1972; Detmann et al., 2014). Essa relação tem sido evidenciada em sistemas tropicais: meta-análises indicam que, em dietas à base de forragens tropicais, variáveis associadas à fração indigestível e às limitações físicas explicam parcela substancial da variação no consumo (Oliveira et al., 2011; Oliveira et al., 2020). Em ovinos, ensaios de digestibilidade com níveis crescentes de FDN dietética mostram, de forma consistente, alterações no consumo MS e na digestibilidade aparente, reforçando que a resposta não depende apenas do “quanto” de FDN, mas também de “como” essa FDN está constituída e em que matriz dietética está inserida (Macedo Júnior et al., 2006).

A dinâmica ruminal da fibra resulta do balanço entre ingestão, fragmentação física, digestão microbiana e passagem. Modelos de turnover ruminal demonstram que a taxa de passagem é influenciada pela ingestão, pelo tamanho e densidade das partículas e pela origem da fibra (forragem vs. concentrado), de modo que a cinética ruminal não pode ser inferida apenas a partir da concentração de FDN (Cannas et al., 2003; Kramer et al., 2013). Em condições experimentais, quando a dieta promove maior produção de partículas finas e maior densidade de partículas, tende-se a elevar a probabilidade de passagem pelo óstio retículo-omasal; quando a dieta promove retenção de partículas longas e menor fragilidade, tende-se a aumentar ruminação e retenção, o que altera o tempo disponível para digestão da FDN<sub>pd</sub> (Lund et al., 2007). Em termos aplicados, isso explica por que dietas com “FDN adequada” podem falhar em manter o consumo MS quando a fibra é predominantemente indigestível: a taxa de desaparecimento efetivo da fase sólida cai, o pool ruminal aumenta e o consumo é reduzido (Waldo, 1972; Mertens, 2020).

Além de regular o consumo, a FDN (e, principalmente, a fibra fisicamente efetiva) controla variáveis do ambiente ruminal por modular o comportamento ingestivo e a salivacão. A FDNfe está relacionada ao tamanho de partícula, fragilidade e características físicas que determinam estímulo à mastigação e ruminação. O conceito de FDNfe integra concentração de FDN e dimensão física do alimento, e é especialmente importante em dietas com alto teor de carboidratos rapidamente fermentáveis, nas quais a redução de ruminação e saliva pode comprometer o tamponamento ruminal (Allen, 1996; Mertens, 2020). A estabilidade do pH ruminal depende do balanço entre produção de ácidos (AGV e, em casos extremos, lactato) e capacidade tampão; dietas com baixa efetividade física ou baixa FDN total frequentemente reduzem a ruminação, diminuem o fluxo de saliva e favorecem quedas de pH, com prejuízo direto à atividade de bactérias celulolíticas e à digestibilidade da fibra (Zhang et al., 2020; Zhang et al., 2025).

A relação entre teor de FDN e pH ruminal não é linear simples, porque o pH também responde à taxa de fermentação de carboidratos não fibrosos e ao padrão de ingestão. Ainda assim, estudos controlados com variação de FDN demonstram que extremos (muito baixo ou muito alto) podem ser deletérios para desempenho e parâmetros fermentativos, sendo comum observar uma “zona ótima” intermediária, em que a fibra é suficiente para manter ruminação e pH, sem impor limitação física excessiva. Essa ideia é consistente com resultados experimentais em ruminantes sob variação de FDN e com análises integrativas que tratam a adequação de fibra como um componente de segurança ruminal, e não apenas uma meta química (Mertens, 2020; Macedo Júnior et al., 2007).

O comportamento ingestivo, por sua vez, é um reflexo direto do teor e da efetividade física da FDN. Em geral, o aumento de FDNfe eleva os tempos de alimentação e ruminação por unidade de MS ingerida, ao passo que dietas com baixa fibra efetiva reduzem ruminação e aumentam a velocidade de consumo, com maior risco de instabilidade ruminal. Estudos em condições tropicais e semiáridas demonstram que mudanças na fração fibrosa alteram padrões de mastigação, ruminação e ócio, e esses ajustes comportamentais são, muitas vezes, o primeiro indicativo funcional de que a dieta perdeu (ou ganhou) efetividade física (Wanderley et al., 2012; Oliveira et al., 2020). Adicionalmente, trabalhos recentes com manipulação de FDNfe mostram impactos não apenas sobre mastigação e pH, mas também sobre digestão e metabolismo proteico, indicando que “fibra efetiva” repercute além do rúmen, afetando eficiência metabólica e partição de nitrogênio.

A interação entre FDN e metabolismo do nitrogênio no rúmen ocorre principalmente via sincronização entre energia fermentescível e nitrogênio degradável no rúmen. A

concentração de NAR reflete a taxa de liberação de amônia (de proteína degradável e NNP, como ureia) e a taxa de captura dessa amônia pelos microrganismos para síntese de proteína microbiana. Quando há energia fermentescível adequada e ambiente ruminal estável (pH favorável ao crescimento microbiano), a incorporação de  $\text{NH}_3$  em proteína microbiana é maximizada; quando há limitação energética (por queda de consumo associada a alta FDNi) ou instabilidade fermentativa (por baixa fibra efetiva e queda de pH), a eficiência de captura de amônia diminui, elevando perdas de N (urinárias, sobretudo) e reduzindo a eficiência global de uso do N (Sampaio et al., 2009; Shi et al., 2023).

A literatura metodológica sobre estimativa de proteína microbiana (via derivados de purina urinários) oferece suporte para interpretar variações de síntese microbiana como produto de mudanças no ambiente ruminal e na disponibilidade de energia/N, reforçando a necessidade de integrar as respostas de consumo e fermentação quando se avaliam dietas com diferentes perfis de fibra (Chen e Gomes, 1992; Quadros et al., 2022).

Em termos de eficiência do uso do nitrogênio, mudanças no teor de FDN e na efetividade física da fibra afetam não apenas a síntese microbiana, mas também o destino do N no organismo. Dietas com FDN muito baixa podem elevar a produção de AGV com maior proporção de propionato e acelerar fermentação, mas, se acompanhadas por redução do pH e prejuízo à população fibrolítica, podem comprometer a digestão da fibra e alterar o padrão de excreção de N, reduzindo eficiência de conversão de N ingerido em produto (Shi et al., 2023; Zhang, 2025). Por outro lado, dietas com excesso de FDNi podem reduzir CMS e aporte de energia, limitando crescimento microbiano e reduzindo retenção de N, com reflexos sobre balanço de nitrogênio e desempenho (Macedo Júnior et al., 2006; Zhang et al., 2020).

Diante do exposto, torna-se evidente que as respostas de consumo, digestibilidade, fermentação ruminal e comportamento ingestivo atribuídas à fibra em detergente neutro não podem ser interpretadas exclusivamente à luz do seu teor total na dieta. A qualidade da fração fibrosa, particularmente a proporção de FDNi, sua taxa de degradação e sua efetividade física, interagem de forma complexa com o ambiente ruminal, modulando o enchimento, a taxa de passagem, o pH, a síntese de proteína microbiana e a eficiência de utilização do nitrogênio pelos ruminantes.

No contexto de dietas à base de palma forrageira, essa complexidade assume especial relevância, uma vez que a inclusão desse ingrediente frequentemente resulta em redução do teor total de FDN e em alterações concomitantes na densidade energética e no perfil fermentativo das dietas. Assim, grande parte das respostas positivas ou negativas relatadas na literatura pode

refletir não apenas o efeito da fonte volumosa propriamente dita, mas também variações no teor e na qualidade da fibra entre as dietas comparadas.

Nesse sentido, torna-se fundamental a adoção de abordagens experimentais que permitam isolar o efeito do teor de FDN sobre as respostas ingestivas, digestivas e ruminais de ovinos, por meio da formulação de dietas com níveis semelhantes de FDN, diferindo quanto à fonte de volumoso.

### 3. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABDEL-ALIM, A.A.E., ELNESR, S.S. Influence of sugarcane bagasse on in vitro degradability, rumen characteristics, nutrient digestibility, blood parameters and milk production of lactating buffaloes. **Anim. Biotechnol.**, 34, 3378–3386, 2022. <https://doi.org/10.1080/10495398.2022.2149546>

ALLEN, M.S. Physical restrictions on voluntary forage intake by ruminants. **J. Anim. Sci.**, 74, 3063–3075, 1996. <https://doi.org/10.2527/1996.74123063x>

ALLEN, M.S., MERTENS, D.R. Evaluating constraints on fiber digestion by rumen microbes. *Journal of Nutrition*, 118, 261–270, 1988.

ALMEIDA, G.A.P., ANDRADE-FERREIRA, M., LIMA-SILVA, J., CHAGAS, J.C.C., VÉRAS, A.S.C., BARROS, L.J.A., ALMEIDA, G.L.P. Sugarcane bagasse as exclusive roughage for dairy cows in smallholder livestock systems. **Asian-Australas. J. Anim. Sci.**, 31, 379–385, 2018. <https://doi.org/10.5713/ajas.17.0205>

ALOKIKA, A., KUMAR, A., KUMAR, V., SINGH, B. Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: potential, challenges and future perspectives. **Int. J. Biol. Macromol.**, 183, 1358–1368, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.155>

AQUINO, J.R., ALVES, M.O., VIDAL, M.F. Agricultura familiar no Nordeste do Brasil: um retrato atualizado a partir dos dados do Censo Agropecuário 2017. **Rev. Econ. Nordeste**, 51, 31–54, 2020.

ARAÚJO JÚNIOR, G.N., LEITE, R.M.C., MORAIS, J.E.F., ALVES, C.P., SOUZA, C.A.A., ALMEIDA, A.C.S., JARDIM, A.M.R.F., SOUZA, L.S.B., EUGENIO, D.S., SILVA, T.G.F. Growth dynamic, productivity, evapotranspiration, and water-economic indices of forage cactus under different irrigation depths. **Agronomy**, 14, 691, 2024. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040691>

ARAÚJO, G.G.L., GOIS, G.C., CAMPOS, F.S., MAGALHÃES, A.L.R., NASCIMENTO, D.B., TEODORO, A.L., ANDRADE, A.P. Chemical composition, carbohydrate and protein fractionation, and ruminal degradation kinetics of cactus pear genotypes. **Rev. Bras. Zootec.**, 49, e20190271, 2020. <https://doi.org/10.37496/rbz4920190271>

BALEHEGN, M., DUNCAN, A.J., TOLERA, A., AYANTUNDE, A.A., GEBREMEDHIN, B. Forage conservation in sub-Saharan Africa: review of experiences, challenges, and opportunities. **Agron. J.**, 113, 2050–2073, 2021. <https://doi.org/10.1002/agj2.20650>

BARRETO FILHO, B.F., FONTES, M.N. Agricultura familiar no Nordeste e no Rio Grande do Norte: reflexões a partir de dados do Censo Agropecuário de 2017. **Estudo & Debate**, 32, 54–84, 2025. <https://doi.org/10.22410/issn.1983-036X.v32i1a2025.3937>

BEN SALEM, H., NEFZAOU, A., BEN SALEM, L. Spineless cactus (*Opuntia ficus indica* f. *inermis*) and oldman saltbush (*Atriplex nummularia* L.) as alternative supplements for 12 growing Barbarine lambs given straw-based diets. **Small Rumin. Res.**, 51, 65–73, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0921-4488\(03\)00186-X](https://doi.org/10.1016/S0921-4488(03)00186-X)

BEZERRA, S.B.L., VÉRAS, R.M.L., BATISTA, A.M.V., GUIM, A., MACIEL, M.V., CARDOSO, D.B., CARVALHO, F.F.R. Carcass characteristics and meat quality of lambs fed high levels of spineless cactus in the diet. **S. Afr. J. Anim. Sci.**, 51, 416–425, 2021. <https://doi.org/10.4314/sajas.v51i4.1>

BEZERRA, S.B.L., VÉRAS, R.M.L., BATISTA, A.M.V., GUIM, A., MACIEL, M.V., CARDOSO, D.B., LIMA JÚNIOR, D.M., CARVALHO, F.F.R. Effect of spineless cactus [*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm Dyck] on nutrient intake, ingestive behaviour, and performance of lambs. **An. Acad. Bras. Cienc.**, 95, e20201412, 2023. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202320201412>

CAMPELO-LIMA, V.H., ANTAS-URBANO, S., FERREIRA, M.A., CAVALCANTE-RIBEIRO, P.H., GOMES-BEZERRA, J.I., CARIRI-CHAGAS, J.C., MOREIRA-AGUIAR, E., NASCIMENTO-RANGEL, A.H. Sugarcane bagasse or elephant grass hay in diets for goats: performance, feeding behaviour and carcass characteristics. **Rev. Colomb. Cienc. Pecu.**, 35, 49–59, 2022. <https://doi.org/10.17533/udea.rccp.v35n1a05>

CANNAS, A., TEDESCHI, L.O., FOX, D.G., PELL, A.N., VAN SOEST, P.J. A mechanistic model for predicting the nutrient requirements and feed biological values for sheep. **J. Anim. Sci.**, 81, 1493–1507, 2003.

CARDOSO, D.B., CARVALHO, F.F.R., MEDEIROS, G.R., GUIM, A., CABRAL, A.M.D., VÉRAS, R.M.L., OLIVEIRA-NASCIMENTO, A.G. Levels of inclusion of spineless cactus (*Nopalea cochenillifera* Salm Dyck) in the diet of lambs. **Anim. Feed Sci. Technol.**, 247, 23–31, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.10.016>

CEPEA. **Boletins de preços de milho e derivados**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2023.

CHEN, X.B., GOMES, M.J. Estimation of microbial protein supply to sheep and cattle based on urinary excretion of purine derivatives: an overview of technical details. Aberdeen: Rowett Research Institute, 1992. (Occasional Publication). Editado e reimpresso em setembro de 1995.

CIRIACO, F.M., HENRY, D.D., BEIERBACH, R., STEWART, R.L., DILORENZO, N. Ruminant in situ degradability of forage components and in vitro organic matter digestibility of warm-season grasses treated with calcium oxide. **Transl. Anim. Sci.**, 5, 1–8, 2021. <https://doi.org/10.1093/tas/txab204>

CONAB. **Custos de produção agrícola: milho**. Brasília: CONAB, 2023.

CORRÊA, R.S., FERREIRA, M.A., SILVA, F.M., BARROS, L.J.A., MELO, A.A.S., CARDOSO, D.B., SOARES, L.F.P. Effects of increasing levels of indigestible neutral detergent fiber on intake, digestibility, rumen kinetics and performance of sheep fed cactus-based diets.

**Anim. Feed Sci. Technol.**, 327, 116471, 2025.  
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2025.116471>

CRUZ, A.A.C., VÉRAS, A.S.C., OLIVEIRA, J.C.V., SANTOS, D.C., CHAGAS, J.C.C., NEVES, M.L.M.W., MONTEIRO, C.C.F., FERREIRA, M.A. Sugarcane and cactus cladodes plus urea: a new option for Girolando dairy heifers. **Rev. Bras. Zootec.**, 49, e20200016, 2020.  
<https://doi.org/10.37496/rbz4920200016>

CUNHA, D.S., RODRIGUES, J.M.C.S., COSTA, C.J.P., LIMA, R.S., ARAÚJO, C.A., OLIVEIRA, G.F., CAMPOS, F.S., MAGALHÃES, A.L.R., ARAÚJO, G.G.L., GOIS, G.C. Mineral profile, carbohydrates fractionation, nitrogen compounds and in vitro gas production of elephant grass silages associated with cactus pear. **Trop. Anim. Health Prod.**, 54, 348, 2022.  
<https://doi.org/10.1186/s42269-022-00948-0>

DADO, R.G., ALLEN, M.S. Intake limitations, feeding behavior, and rumen function of cows challenged with rumen fill from dietary fiber or inert bulk. **J. Dairy Sci.**, 78, 118–133, 1995.

DADO, R.G., ALLEN, M.S. Intake limitations, feeding behavior, and ruminal function of cows challenged with ruminal filler of dietary fiber or inert bulk. **J. Dairy Sci.**, 78, 118–133, 1996.  
[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(95\)76622-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(95)76622-X)

DE WAAL, H.O., COMBRINCK, W.J., FOUCHÉ, H.J. Preserving mashed cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit with wheat straw, maize hay or lucerne hay. **Acta Hort.**, 1067, 167–172, 2015. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1067.22>

DEL RAZO, A.V., MENDOZA, J.C.M., BERNAL-SANTOS, G., GARCÍA-GASCA, T., KAWAS, J.R., COSTA, R.G., JACOBO, C.M., ANDRADE-MONTEMAYOR, H.M. Nutritional composition, in vitro degradability and gas production of *Opuntia ficus-indica* and four other wild cacti species. **Life Sci. J.**, 12, 42–54, 2015.

DETMANN, E., GIONBELLI, M.P., HUHTANEN, P. A meta-analytical evaluation of the regulation of voluntary intake in cattle fed tropical forage-based diets. **J. Anim. Sci.**, 92, 4632–4644, 2014. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-7717>

DUBEUX JR., J.C.B., SANTOS, M.V.F., CUNHA, M.V., FERREIRA, R.L.C., SANTOS, D.C., MELLO, A.C.L., SANTOS, M.V. Cactus (*Opuntia* and *Nopalea*) nutritive value: a review. **Anim. Feed Sci. Technol.**, 275, 114890, 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114890>

DUTRA, I.C., PIRES, A.J.V., SANTOS, B.E.F., SILVA, N.V., PIO, L.P., CRUZ, N.T., CARVALHO-DUTRA, G. Forage cactus (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) f. Cactaceae as an alternative for ruminant feeding. **Braz. J. Sci.**, 3, 33–41, 2024.  
<https://doi.org/10.14295/bjs.v3i9.617>

EDVAN, R.L., CARNEIRO, M.S.S., SILVA, E.B., SILVA, A.L., OLIVEIRA, R.L., PEREIRA, E.S., BEZERRA, L.R., ARAÚJO, G.G.L., DANTAS, F.R., QUEIROZ, M.A.Á. Spineless cactus as a forage resource for ruminant feeding in semiarid regions: a review. **J. Arid Environ.**, 173, 104029, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104029>

FAO. **Agro-ecological zones: guidelines.** Rome: FAO, 2019.

FLUCK, A.C., SCHAFHÄUSER, J., ALFAYA, H., COSTA, O.A.D., FARIAS, G.D., SCHEIBLER, R.B., RÖSLER, D.C. Chemical composition of annual ryegrass forage and silage for different drying times and phenological phases. **Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.**, 70, 1979–1987, 2018. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-9981>

FRADERA-SOLER, M., GRACE, O.M., JØRGENSEN, B., MRAVEC, J. Elastic and collapsible: current understanding of cell walls in succulent plants. **J. Exp. Bot.**, 73, 2290–2307, 2022. <https://doi.org/10.1093/jxb/erac054>

FREITAS, W.R., FERREIRA, M.D.A., SILVA, J.L., VÉRAS, A.S.C., BARROS, L.J.A., ALVES, A.M.S.V., ALMEIDA, G.A.P. Sugarcane bagasse as only roughage for crossbred lactating cows in semiarid regions. **Pesq. Agropecu. Bras.**, 53, 386–393, 2018. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018000300014>

GADO, H.M., ELGHANDOUR, M.M.Y., CIPRIANO, M., ODONGO, N.E., SALEM, A.Z.M. Rumen degradation and nutritive utilization of wheat straw, corn stalks and sugarcane bagasse ensiled with multienzymes. **J. Appl. Anim. Res.**, 45, 485–489, 2017. <https://doi.org/10.1080/09712119.2016.1217866>

GALENO, J.A., FERREIRA, M.A., SANTOS, D.C., BISPO, S.V., VÉRAS, A.S.C., GUIM, A., WANDERLEY, W.L. Intake, digestibility, ingestive behavior and performance of sheep fed diets containing spineless cactus associated with different fiber sources. **Small Rumin. Res.**, 214, 106758, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2022.106758>

GEBEYEW, K., MI, H., DU, R., GAO, M., DIBA, D., TANG, S., HE, Z., TAN, Z. Wheat straw and alfalfa hay alone or combined in a high-concentrate diet alters microbial–host interaction in the rumen of lambs. **Anim. Nutr.**, 20, 444–457, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2024.08.010>

GODOI, F.N., FERREIRA, M.A., SILVA, R.C., SANTOS, D.C., OLIVEIRA, J.C.V., GUIM, A., SILVA, E.C., LIMA, L.E., CARVALHO, F.F.R. Intake, digestibility, and ruminal parameters of sheep fed diets based on spineless cactus associated with different fiber sources. **Small Rumin. Res.**, 234, 107225, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2024.107225>

HENRY, B.K., ECKARD, R.J., BEAUCHEMIN, K.A. Adaptation of ruminant livestock production systems to climate changes. **Animal**, 12, S445–S456, 2018. <https://doi.org/10.1017/S1751731118001301>

HERRERA-ANGULO, A.M., FERREIRA DOS SANTOS, M.V., DA CUNHA, M.V., LEÃO DE MELLO, A.C., FERREIRA, R.L.C., DINIZ, W.P., MORA-LUNA, R.E. Bibliometric analysis on forage cactus production, management and use in animal nutrition: development, current status and future research. **Chil. J. Agric. Anim. Sci.**, 39, 430–443, 2023. <https://doi.org/10.29393/CHJAA39-38BAAR70038>

IBGE. **Censo Demográfico 2022: resultados preliminares**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

IBGE. **Pesquisa da Pecuária Municipal 2023**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html>

IBGE. **Semiárido brasileiro: base cartográfica e delimitação regional**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

INSA. **O Semiárido Brasileiro: delimitação, população e características gerais**. Campina Grande: INSA, 2023.

KHATTAB, I.M., EL-HAIS, A.M., EL-HENDAWY, N.M., EL-BLTAGY, E.A., ALLAM, A.A., HASSAN, A.A., ATIA, S.E.S. Utilization of cactus cladodes as a replacement for berseem clover: effect on nutrient intake, rumen fermentation, blood metabolites, and milk yield, composition and fatty acid profile in the diets of dairy goats. **Anim. Feed Sci. Technol.**, 324, 116312, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2025.116312>

KRÄMER, M., LUND, P., WEISBJERG, M.R. Rumen passage kinetics of forage- and concentrate-derived fiber in dairy cows. **J. Dairy Sci.**, 96, 3163–3176, 2013. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6146>

LIMA, I.E., MONTEIRO, C.C., MESQUITA, F.T.L., VASCONCELOS, E.Q.L., SOUZA, M.S., SANTOS, D.S., ANDRADE-FERREIRA, M. Cactus cladodes for dairy goats: what is the best fiber source? **Trop. Anim. Health Prod.**, 55, 347, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11250-023-03771-5>

LOPES, L.A., ANDRADE-FERREIRA, M., BATISTA, Â.M.V., VALE-MACIEL, M., ANDRADE, R.B., MUNHAME, J.A., CARVALHO, F.F.R. Intake, digestibility, and performance of lambs fed spineless cactus cv. Orelha de Elefante Mexicana. **Asian-Australas. J. Anim. Sci.**, 33, 1284–1292, 2020. <https://doi.org/10.5713/ajas.19.0328>

LOUHAICHI, M., YIGEZU, Y.A., HASSAN, S., NAOREM, A., META-GONZALES, R., KUMAR, S., HAMDENI, I., PALSANIYA, D.R., KAUTHLE, V.K., AL-MAHASNEH, A.M., AL-TAWAIEH, M.A., SÁENZ, C., ABDALLAH, M.A.B., MORA GONZÁLEZ, M. Characterization of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) production systems and analysis of the adoption and economic viability of spineless cactus for animal feed in four continents. **Cogent Food Agric.**, 11, 2550493, 2025. <https://doi.org/10.1080/23311932.2025.2550493>

LUND, P., WEISBJERG, M.R., HVELPLUND, T. Digestible NDF is selectively retained in the rumen of dairy cows compared to indigestible NDF. **Anim. Feed Sci. Technol.**, 134, 1–17, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.05.016>

MACEDO JÚNIOR, G.L., PÉREZ, J.R.O., ALMEIDA, T.R.V., PAULA, O.J., FRANÇA, P.M., ASSIS, R.M. Influência de diferentes níveis de fibra em detergente neutro dietético no consumo e digestibilidade aparente de ovelhas Santa Inês. **Ciênc. Agrotec.**, 30, 547–553, 2006. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542006000300022>

MACEDO JÚNIOR, G.L., ZANINE, A.M., BORGES, I., PÉREZ, J.R.O. Qualidade da fibra para a dieta de ruminantes. **Ciênc. Anim.**, 17, 7–18, 2007.

MACIEL, L.P.A.A., CARVALHO, F.F.R., BATISTA, Â.M.V., GUIM, A., VALE-MACIEL, M., CARDOSO, D.B., LIMA-JÚNIOR, D.M. Intake, digestibility and metabolism in sheep fed increasing levels of spineless cactus (*Nopalea cochenillifera* Salm-Dyck). **Trop. Anim. Health Prod.**, 51, 1717–1723, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11250-019-01868-4>

MAGALHÃES, A.L.R., TEODORO, A.L., OLIVEIRA, L.P., GOIS, G.C., CAMPOS, F.S., ANDRADE, A.P., MELO, A.A.S., NASCIMENTO, D.B., SILVA, W.A. Chemical composition, fractionation of carbohydrates and nitrogen compounds, ruminal degradation kinetics, and in vitro gas production of cactus pear genotypes. **Ciênc. Anim. Bras.**, 22, e-69338, 2021. <https://doi.org/10.1590/1809-6891v22e-69338>

MEDEIROS, I.P.S., GUIDO, S.I., GAMA, M.A.S., SILVA, C.H.M., SIQUEIRA, M.C.B., SILVA, C.S., NETTO, A.J., FELIX, S.B., RABELO, M.N., SANTOS, T.V.M. Cactus cladodes and sugarcane bagasse can partially replace earless corn silage in diets of lactating dairy cows. **Dairy**, 5, 33–43, 2024. <https://doi.org/10.3390/dairy5010003>

MELLO, A.C.L., ANDRADE, A.P., HERRERA-ANGULO, A.M., SILVA, P.H.F., VOLTOLINI, T.V., CÂNDIDO, M.J.D. Forage management in arid and semiarid regions. In: *Forage systems in arid and semiarid regions*. [S.l.: s.n.], [s.d.], 95–122.

MELO, A.A.S., SILVA, D.K.A., MAGALHÃES, A.L.R., CORDEIRO, F.S.B., ALMEIDA, G.H.O., MORAES, G.S.O., CARDOSO, D.B., PEREIRA, P.H.B. Which non-fibrous carbohydrates: neutral detergent fiber ratio optimizes the use of cactus cladodes in diets of growing heifers? *Semina: Ciênc. Agrár.*, 42, 3947–3960, 2021. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2021v42n6SUPL2p3947>

MERTENS, D.R. Creating a system for meeting the fiber requirements of dairy cows. **J. Dairy Sci.**, 80, 1463–1481, 1997. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(97\)76075-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76075-2)

MERTENS, D.R. Gravimetric determination of amylase-treated neutral detergent fiber in refluxed diets in beakers or crucibles: a collaborative study. **J. AOAC Int.**, 85, 1217–1240, 2002. <https://doi.org/10.1093/jaoac/85.6.1217>

MERTENS, D.R. **Regulation of forage intake**. In: *Forage quality, evaluation and utilization*. [DADO AUSENTE], 1994. <https://doi.org/10.2134/1994.foragequality.c11>

MERTENS, D.R., GRANT, R.J. Digestibility and intake. In: *Forages: the science of grassland agriculture*, 2, 609–631, 2020. <https://doi.org/10.1002/9781119436669.ch34>

MONÇÃO, F.P., ROCHA JÚNIOR, V.R., LEAL, D.B., RIGUEIRA, J.P.S., CALDEIRA, L.A., SILVA, R.K.O.J., ANTUNES, A.B., CARVALHO, C.C.S., SANTOS, A.S., D'ANGELO, M.F.S.V. Impact of mixed forage silage with BRS Capiapu grass, ground corn, and varying forage palm levels on aerobic stability, fermentation profile, chemical composition, and digestibility. **Rev. Bras. Zootec.**, 53, e20240122, 2024. <https://doi.org/10.37496/rbz5320240122>

MORA-LUNA, R.E., HERRERA-ANGULO, A.M., SIQUEIRA, M.C.B., CONCEIÇÃO, M.G., CHAGAS, J.C.C., MONTEIRO, C.C.F., VÉRAS, A.S.C., CARVALHO, F.F.R., FERREIRA, M.A. Spineless cactus plus urea and Tifton-85 hay: maximizing the digestible organic matter intake, ruminal fermentation and nitrogen utilization of wethers in semi-arid regions. **Animals**, 12, 401, 2022. <https://doi.org/10.3390/ani12030401>

MOURA, M.D.S.C., GUIM, A., BATISTA, Â.M.V., VALE-MACIEL, M., CARDOSO, D.B., LIMA-JÚNIOR, D.M., CARVALHO, F.F.R. The inclusion of spineless cactus in the diet of lambs increases carcass fattening. **Meat Sci.**, 160, 107975, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107975>

MUHAMED, J.A., GUIM, A., BATISTA, Â.M.V., LIMA, L.R. Spineless cactus (*Nopalea cochenillifera*) as roughage in diets for goats: intake, digestibility and performance. **Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.**, 73, 237–245, 2021. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-12292>

NIAZIFAR, M., DANESH MESGARAN, M., VAKILI, A.R., EGHBALESAIED, S., ALIMIRZAEI, M., JAFARI, A., FOROUGH, A.R. Slow-release non-protein nitrogen sources

in animal nutrition: a review. **Heliyon**, 10, e30543, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30543>

PASTORELLI, G., SERRA, V., VANNUCCINI, C., ATTARD, E. Opuntia spp. as alternative fodder for sustainable livestock production. **Animals**, 12, 1597, 2022. <https://doi.org/10.3390/ani12131597>

PAULA, T.A., VÉRAS, A.S.C., GOMES, R.N., FERREIRA, M.A. Produção de silagem: aspectos agronômicos e valor nutricional em regiões semiáridas. **Arq. Mudi**, 25, 127–154, 2021. <https://doi.org/10.4025/arqmudi.v25i1.56240>

PEEL, M.C., FINLAYSON, B.L., MCMAHON, T.A. Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 11, 1633–1644, 2007. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>

PEREIRA, J.R., NERES, M.A., SANDINI, I.E., FLUCK, A.C., COSTA, O.A.D., SARTOR, L.R. Chemical compounds and gas production kinetics of annual ryegrass hay in distinct nitrogen levels and cutting heights. **Turk. J. Vet. Anim. Sci.**, 44, [DADO AUSENTE], 2020. <https://doi.org/10.3906/vet-2006-94>

PESSOA, D.V., ANDRADE, A.P., MAGALHÃES, A.L.R., TEODORO, A.L., SANTOS, D.C., ARAÚJO, G.G.L., MEDEIROS, A.N., NASCIMENTO, D.B., VALENÇA, R.L., CARDOSO, D.B. Forage cactus of the genus Opuntia in different phenological phases: nutritional value. **J. Arid Environ.**, 181, 104243, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104243>

PESSOA, D.V., ANDRADE, A.P., MAGALHÃES, A.L.R., TEODORO, A.L., VALENÇA, R.L., CARDOSO, D.B., SILVA, G.D., BARBOSA, S.N., MACEDO, E., DOS SANTOS, L., SANTOS, D.C., ARAÚJO, F.S. Nutritional value and kinetics of in vitro fermentation of spineless cactus of the genus Nopalea in different phenological phases. **An. Acad. Bras. Cienc.**, 96, e20221001, 2024. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202420221001>

PESSOA, R.A.S., FERREIRA, M.A., SILVA, F.M., BISPO, S.V., WANDERLEY, W.L., VASCONCELOS, P.C. Diferentes suplementos associados à palma forrageira em dietas para ovinos: consumo, digestibilidade aparente e parâmetros ruminais. **Rev. Bras. Saúde Prod. Anim.**, 14, 508–517, 2013.

PINHO, A.C.A., OLIVEIRA, L.M., RIBEIRO, O.L.L., SILVA, Â.M.A., GUIM, A., CARVALHO, F.F.R., VÉRAS, A.S.C. Spineless cactus-based diets associated with various nitrogen sources affect intake, digestibility, rumen kinetics and N balance in sheep. **S. Afr. J. Anim. Sci.**, 51, [DADO AUSENTE], 2021.

POVEDA-PARRA, A.R., PRADO-CALIXTO, O.P., PEREIRA, E.S., MASSARO JUNIOR, F.L., CARVALHO, L.N., GUERRA, G.L., SERAFIM, C.C., CAVALHEIRO JUNIOR, E.R., SILVA, L.D.F., MIZUBUTI, I.Y. In vitro ruminal fermentation kinetics of diets with crambe cake protein replacing soybean meal protein by gas production technique. **Semina: Ciênc. Agrár.**, 42, 3399–3414, 2021. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2021v42n6p3399>

QUADROS, D.G., SILVA, F.F., ÍTAVO, L.C.V., ÍTAVO, C.C.B.F., PINA, D.S., VALADARES FILHO, S.C. Fiber intake, digestibility and rumen kinetics in ruminants fed diets with different fiber sources. **Rev. Bras. Zootec.**, 51, e20210234, 2022. <https://doi.org/10.37496/rbz5120210234>

RIBEIRO, J.D.S., MORENO, G.M.B., VIEIRA, M.S.B., SILVA, M.J.M.S., LIMA, C.B., MARIZ, T.M.A., LIMA-JÚNIOR, D.M. Replacement of corn silage with spineless cactus in sheep diet: carcass and meat sensory characteristics. *Acta Sci. Anim. Sci.*, 42, e48832, 2020. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v42i1.48832>

ROCHA FILHO, R.R., SANTOS, D.C., VÉRAS, A.S.C., SILVA, D.S., GUIM, A., LIMA, A.M. Can spineless forage cactus be the queen of forage crops in dryland areas? *J. Arid Environ.*, 186, 104426, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104426>

RUFINO, L.M.A., DETMANN, E., GOMES, D.Í., REIS, W.L.S., BATISTA, E.D., VALADARES FILHO, S.C., PAULINO, M.F. Intake, digestibility and nitrogen utilization in cattle fed tropical forage and supplemented with protein in the rumen, abomasum, or both. *J. Anim. Sci. Biotechnol.*, 7, 11, 2016. <https://doi.org/10.1186/s40104-016-0069-9>

SAMPAIO, C.B., DETMANN, E., LAZZARINI, I., SOUZA, M.A., PAULINO, M.F., VALADARES FILHO, S.C. Rumen dynamics of neutral detergent fiber in cattle fed low-quality tropical forage and supplemented with nitrogenous compounds. *Rev. Bras. Zootec.*, 38, 560–569, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009000300023>

SANTOS, D.C., BATISTA, Â.M.V., VÉRAS, A.S.C., SIQUEIRA, M.C.B., OLIVEIRA, J.S., SIQUEIRA, M.C., MACIEL, M.V., CARVALHO, F.F.R. Sugarcane replaced by cactus cladodes improves the ruminal dynamics of sheep. *Small Rumin. Res.*, 213, 106715, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2022.106715>

SANTOS, K.C., CARVALHO, F.F.R., MAGALHÃES, A.L.R., SILVA, F.J.S., CARDOSO, D.B., SOUSA, D.R., BATISTA, Â.M.V. Can urea associated with alternative carbohydrate sources replace conventional concentrate for lambs? *Livest. Sci.*, 239, 104172, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104172>

SCHLAEPFER, D., BRADFORD, J., LAUENROTH, W. Climate change reduces extent of temperate drylands and intensifies drought in deep soils. *Nat. Commun.*, 8, 14196, 2017. <https://doi.org/10.1038/ncomms14196>

SCHOLES, R.J. The future of semi-arid regions: a weak fabric unravels. *Climate*, 8, 43, 2020. <https://doi.org/10.3390/cli8030043>

SHI, H., LUO, G., HELLWICH, O., HE, X., KURBAN, A., DE MAEYER, P., VAN DE VOORDE, T. Global dryland aridity changes indicated by atmospheric, hydrological, and vegetation observations at meteorological stations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 27, 4551–4562, 2023. <https://doi.org/10.5194/hess-27-4551-2023>

SHI, R., DONG, S., MAO, J., WANG, J., CAO, Z., WANG, Y., LI, S., ZHAO, G. Dietary neutral detergent fiber levels impacting dairy cows' feeding behavior, rumen fermentation, and production performance during the period of peak lactation. *Animals*, 13, 2876, 2023. <https://doi.org/10.3390/ani13182876>

SILVA, A.E.M., FRANCO, A.M., SOLOMON, J.K.Q., LIMA, L.E., FERREIRA, M.A., SANTOS, D.C., GUIM, A. Cactus (*Opuntia ficus-indica*) diets reduce voluntary water intake, water footprint and enteric methane production improving ruminal fermentation in steers. *J. Arid Environ.*, 227, 105311, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2024.105311>

SILVA, A.E.M., LIRA, A.T., FERREIRA, M.A., BARROS, L.J.A., MELO, T.T.B., SIQUEIRA, T.D.Q., SOARES, L.F.P., COSTA, C.T.F. Bagaço de cana de açúcar como volumoso exclusivo em dietas para ovinos. **Rev. Bras. Saúde Prod. Anim.**, 16, 118–129, 2015. <https://doi.org/10.1590/S1519-99402015000100013>

SILVA, J.G.M., SANTOS, L.H.M., SILVA, H.P., SILVA, G.J.A.M., CARDOSO, D.B., LIMA, G.F.C., MELO, A.A.S. Nutrients intake, milk production, and production costs of dairy goats fed with high proportions of cactus cladodes genotypes *Opuntia* and *Nopalea* in association with different forage sources. **Acta Sci. Anim. Sci.**, 46, e62223, 2024. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v46i1.62223>

SIQUEIRA, M.C., CHAGAS, J.C.C., MONNERAT, J.P.I., MONTEIRO, C.C., MORA-LUNA, R.E., FELIX, S.B., FERREIRA, M.A. Cactus cladodes (*Opuntia* or *Nopalea*) and by-products of low nutritional value as solutions to forage shortages in semiarid areas. **Animals**, 12, 3182, 2022. <https://doi.org/10.3390/ani12223182>

SIQUEIRA, M.C.B., FERREIRA, M.A., MONNERAT, J.P.I., SILVA, J.L., COSTA, C.T.F., CONCEIÇÃO, M.G., ANDRADE, R.P.X., BARROS, L.J.A., MELO, T.T.B. Optimizing the use of spineless cactus in the diets of cattle: total and partial digestibility, fiber dynamics and ruminal parameters. **Anim. Feed Sci. Technol.**, 226, 56–64, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.12.006>

SIQUEIRA, T.Q., SANTOS-MONNERAT, J.P.I., CHAGAS, J.C., CONCEIÇÃO, M.G., SIQUEIRA, M.C., VIANA, T.B.L., ANDRADE-FERREIRA, M. Cactus cladodes associated with urea and sugarcane bagasse: an alternative to conserved feed in semiarid regions. **Trop. Anim. Health Prod.**, 51, 1975–1980, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11250-019-01895-1>

SUDENE. **Nova delimitação do Semiárido Brasileiro: metodologia e base legal**. Recife: SUDENE, 2021.

TEKLU, G.W., AYIMUT, K.-M., ABERA, F.A., EGZIABHER, Y.G., FITIWI, I. Nutritive and chemical composition and in vitro digestibility of cladodes of the *Opuntia* species. **Sustainability**, 15, 6624, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15086624>

TOGO, B.G., KUWI, S.O., MUSSA, N.J., LYAHAMA, O.J., KABUNI, K.T., KAJUNA, J.A., FUPI, G.F., KASIBA, B.R., MGALULA, J.R., FELIX, D.K., KATABAZI, L.V., MTEI, E.P. Climate change and livestock production in semi-arid regions: the untapped potential of climate-resilient forages. **Asian J. Adv. Agric. Res.**, 25, 45–52, 2025. <https://doi.org/10.9734/ajaar/2025/v25i10679>

UNEP. **Global Drylands: a UN system-wide response**. Nairobi: UNEP, 2021.

VAN SOEST, P.J. **Nutritional ecology of the ruminant**. 2nd ed. Ithaca, NY: Cornell University Press, 1994.

VAN SOEST, P.J. Symposium on factors influencing the voluntary intake of herbage by ruminants: voluntary intake in relation to chemical composition and digestibility. **J. Anim. Sci.**, 24, 834–843, 1965. <https://doi.org/10.2527/jas1965.243834x>

VAN SOEST, P.J., ROBERTSON, J.B., LEWIS, B.A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. **J. Dairy Sci.**, 74, 3583–3597, 1991. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)

VASCONCELOS, J.M.P.B.L., BARROS, A.V., SILVA, T.C.D.M., MORAES, L.A.L., RODRIGUES, J.S.S.P., NERI, R.C.A., BEZERRA, R.S., OLIVEIRA, M.B.M. Goat farming in Northeastern Brazil: socio-economic impacts and sustainability in the semi-arid region. **Rev. Gest. Soc. Ambient.**, 19, 1–26, 2025. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n4-089>

WALDO, D.R. Effect of forage quality on intake and forage–concentrate interactions. **J. Dairy Sci.**, 69, 617–631, 1986.

WALDO, D.R., SMITH, L.W., COX, E.L. Model of cellulose disappearance from the rumen. **J. Dairy Sci.**, 55, 125–129, 1972. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(72\)85442-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(72)85442-0)

WANDERLEY, W.L., FERREIRA, M.A., BATISTA, Â.M.V., VÉRAS, A.S.C., SANTOS, D.C., URBANO, S.A., BISPO, S.V. Silagens e fenos em associação à palma forrageira para vacas em lactação: consumo, digestibilidade e desempenho. **Rev. Bras. Saúde Prod. Anim.**, 13, 745–754, 2012.

ZHANG, X., WANG, Y., ZHANG, Q., LI, F., LIU, G., ZHANG, Z. Effects of dietary neutral detergent fiber levels on intake, digestibility and rumen fermentation in ruminants. **Anim. Feed Sci. Technol.**, 262, 114395, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114395>

ZHANG, Z., LI, F., LI, F., WANG, Z., GUO, L., WENG, X., SUN, X., HE, Z., MENG, X., LIANG, Z. Influence of dietary forage neutral detergent fiber on ruminal fermentation, chewing activity, nutrient digestion, and ruminal microbiota of Hu sheep. **Animals**, 15, 314, 2025. <https://doi.org/10.3390/ani15030314>

ZHU, Z., ZHANG, Z., ZUO, L., PAN, T., ZHAO, X., WANG, X., SUN, F., XU, J., LIU, Z. Study on the classification and change detection methods of drylands in arid and semi-arid regions. **Remote Sens.**, 14, 1256, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14051256>

## **CAPÍTULO 1**

---

**Fibra em detergente neutro como fator limitante na substituição da silagem de milho por palma forrageira (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw) mais bagaço de cana de açúcar e ureia**

## Resumo

O objetivo deste estudo foi avaliar como a substituição da silagem de milho por palma forrageira (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw), bagaço de cana de açúcar e ureia afeta o consumo de matéria seca, a digestibilidade, o comportamento ingestivo e a atividade ruminal em ovinos, mantendo-se os níveis de fibra em detergente neutro (FDN) constantes. Cinco diferentes níveis de substituição (0, 25, 50, 75 e 100%) foram testados utilizando cinco ovinos machos da raça Santa Inês fistulados e canulados no rúmen (peso corporal de  $37,5 \pm 5,57$  kg), em um delineamento em quadrado latino  $5 \times 5$ . Como resultado, o consumo de matéria seca (MS), FDN corrigida para cinzas e proteínas (FDN<sub>cp</sub>) e o consumo de nutrientes digestíveis totais (NDT) diminuíram linearmente com o nível de substituição ( $P < 0,03$ ,  $P < 0,02$  e  $P < 0,01$ , respectivamente), enquanto o consumo de FDN indigestível (FDN<sub>i</sub>) aumentou linearmente ( $P < 0,04$ ). Já a digestibilidade aparente da MS, da matéria orgânica (MO) e da FDN da dieta também apresentou declínio linear ( $P < 0,01$  para todas as variáveis). Observou-se um aumento linear no pool ruminal de FDN<sub>i</sub> ( $P < 0,01$ ) e no tempo de retenção da FDN<sub>cp</sub> (Tr) ( $P < 0,01$ ). Por outro lado, o pool ruminal de FDN potencialmente digestível (FDN<sub>pd</sub>), bem como as taxas de passagem (kp) e degradação (kd) da FDN<sub>cp</sub>, diminuíram ( $P < 0,01$  para todas as variáveis). Por outro lado, a substituição da silagem de milho pela mistura de palma, bagaço de cana de açúcar e ureia não afetou a eficiência alimentar para MS e FDN<sub>cp</sub>; entretanto, a eficiência de ruminação para MS e FDN<sub>cp</sub> diminuiu ( $P < 0,02$  e  $P < 0,01$ , respectivamente). Os resultados deste estudo sugerem que manter a FDN fixada em 45% da MS em dietas com a substituição crescente de silagem de milho por palma OEM e bagaço de cana de açúcar mais ureia pode não ser uma abordagem viável. Essa limitação decorre principalmente da necessidade de incluir quantidades progressivamente maiores de bagaço de cana de açúcar para atingir o nível de FDN desejado, o que aumenta substancialmente a proporção de FDN<sub>i</sub> na fração de fibrosa da dieta, afetando negativamente a ingestão de NDT pelos animais. Dessa forma, conclui-se que a combinação de palma forrageira, bagaço de cana de açúcar e ureia não substituiu adequadamente a silagem de milho, pois reduziu as taxas de passagem e degradação da FDN<sub>cp</sub> no rúmen, aumentando o tempo de retenção e, conseqüentemente, reduzindo o consumo de nutrientes. Recomenda-se considerar não apenas o teor total de FDN na formulação de dietas para ovinos, mas também os níveis de FDN<sub>i</sub> e FDN<sub>pd</sub>.

**Palavras-chave:** Consumo; Cactáceas; Eficiência alimentar; Fontes de forragem; Semiárido; Subproduto.

**Abstract**

The objective of this study was to see how replacing corn silage with cactus cladodes (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw), sugarcane bagasse, and urea affect dry matter intake, digestibility, eating behavior, and rumen activity in sheep, while keeping the neutral detergent fiber (NDF) levels the same. Five different replacement levels (0, 25, 50, 75, and 100%) were tested using five Santa Inês sheep males fitted with rumen fistulas (body weight  $37.5 \pm 5.57$  kg), in a  $5 \times 5$  Latin square design. Dry matter (DM) intake, NDF corrected for ash and protein (NDFap) intake, and total digestible nutrients (TDN) intake decreased linearly with the replacement level ( $P < 0.03$ ,  $P < 0.02$  and  $P < 0.01$ , respectively), while intake of undigestible NDF (iNDF) increased linearly ( $P < 0.04$ ). Apparent digestibility of diet DM, organic matter (OM), and NDF also showed a linear decline ( $P < 0.01$  for all variables). There was a linear increase in the ruminal pool of iNDF ( $P < 0.01$ ) and the retention time of NDFap (Rt) ( $P < 0.01$ ). Conversely, the ruminal pool of potentially degradable NDF (pdNDF), as well as NDFap passage (kp) and degradation (kd) rates, decreased ( $P < 0.01$  for all variables). Replacement of corn silage with the mixture cactus, sugarcane bagasse and urea did not affect feeding efficiency for DM and NDFap; however, rumination efficiency for both DM and NDFap declined ( $P < 0.02$  and  $P < 0.01$ , respectively). The findings of this study suggest that maintaining NDF fixed at 45% of dietary dry matter in diets with increasing replacement of corn silage by OEM cladodes and sugarcane bagasse supplemented with urea may not be a feasible approach. This limitation stems primarily from the need to include progressively larger amounts of sugarcane bagasse to achieve the desired NDF level, which substantially raises the proportion of iNDF in the fiber fraction and negatively affects the animals' intake of TDN. It is concluded that the combination of cactus cladodes, sugarcane bagasse, and urea had not adequately replaced corn silage, as it reduced the passage rates and degradation of NDFap in the rumen, increasing retention time and consequently reducing nutrient consumption. It is recommended to consider not only total NDF content when formulating diets for sheep but also the levels of iNDF and pdNDF.

**Keywords:** By-product; Cactaceae; Feeding efficiency; Intake; Roughage sources; Semiarid.

## 1. INTRODUÇÃO

Considerando o cenário típico da região semiárida, onde a baixa precipitação anual leva a períodos prolongados de disponibilidade limitada de forragem, o uso de forragens conservadas na forma de silagem é amplamente adotado como estratégia. No entanto, a produção de silagem nem sempre é simples, especialmente devido aos desafios no cultivo de forragens tradicionais, como milho e sorgo, em regiões semiáridas. Essas limitações aumentam substancialmente os custos de produção e aquisição desse tipo de forragem, representando, assim, um desafio significativo para muitos sistemas de produção pecuária (Fluck et al., 2018; Siqueira et al., 2019).

Para superar esse desafio, a palma forrageira, particularmente do gênero *Opuntia* spp., têm sido amplamente incorporados às dietas de animais ruminantes em regiões semiáridas, como o Norte da África e a região semiárida do Brasil (Dubeux Junior et al., 2021; Herrera-Ângulo et al., 2023).

No Brasil, o principal clone do gênero *Opuntia* spp. amplamente utilizado na alimentação de ruminantes em regiões semiáridas é a Orelha de Elefante Mexicana (OEM) (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw). Seu uso se justifica por seus mecanismos fisiológicos que proporcionam alta tolerância a ambientes secos, rápida disseminação, alta produção de biomassa (sendo capaz de produzir entre 30 e 60 toneladas de matéria seca (MS) por hectare a cada dois anos) e suas características bromatológicas, como alto teor de água, minerais, ácidos orgânicos e, principalmente, carboidratos não fibrosos (CNF), que a tornam mais energética do que a maioria das forragens (Santos et al., 2020; Araújo Junior et al., 2024; Dutra et al., 2024).

No entanto, devido à sua composição característica (baixo teor de fibra), a palma forrageira não deve ser fornecida isoladamente a animais ruminantes. Assim recomendando-se o uso de alguma fonte de fibra associada a palma para atingir os níveis mínimos de fibra exigidos para dietas de ruminantes. Tais como fenos, forragens frescas (como gramíneas e leguminosas), silagens, palha de trigo e resíduos agroindustriais.

Nesse contexto, o uso de resíduos agroindustriais ricos em fibras, como o bagaço de cana-de-açúcar, surge como uma alternativa viável para esse fim (Almeida et al., 2018). Esse subproduto é classificado como forragem de baixa qualidade devido ao seu alto teor de fibra indigestível e baixa concentração de proteína bruta (Almeida et al., 2018; Abdel-Alim e Elnesr, 2022). Contudo, por estar amplamente disponível em regiões próximas a áreas produtoras de cana-de-açúcar, destaca-se como uma opção acessível durante períodos de escassez de forragem, especialmente quando comparado a outras fontes convencionais de forragem.

Nesse contexto, diferentes estudos têm investigado o uso da palma forrageira combinada ao bagaço de cana de açúcar como potenciais substitutos totais ou parciais de vários tipos de forragem em dietas de ruminantes, apresentando resultados variados quanto à sua eficácia. Notavelmente, foram relatados aumentos no consumo e digestibilidade da MS, matéria orgânica (MO) e CNF (Almeida et al., 2018; Freitas et al., 2018; Siqueira et al., 2019; Campelo-Lima et al., 2022; Siqueira et al., 2022; Medeiros et al., 2024). No entanto, é importante destacar que, na maioria dos estudos, o teor de fibra em detergente neutro (FDN) das dietas experimentais diminuiu devido à inclusão da palma forrageira quando comparado às respectivas dietas controle, envolvendo, portanto, comparações entre dietas com diferentes níveis de FDN (Cardoso et al., 2019; Maciel et al., 2019; Moura et al., 2020; Lopes et al., 2020; Ribeiro et al., 2020; Bezerra et al., 2021).

Por outro lado, reconhece-se que o teor de FDN em dietas de ruminantes é um fator importante, pois pode afetar a ingestão de MS e nutrientes; conseqüentemente, induzindo alterações no comportamento ingestivo, na taxa de passagem do conteúdo digestivo pelo trato digestivo e na digestibilidade da dieta, especialmente em dietas com alta proporção de volumoso (Van Soest, 1965; Van Soest, 1994; Mertens, 1997). No presente estudo, hipotetizamos que a substituição da silagem de milho por palma forrageira, combinada com bagaço de cana de açúcar e ureia como componente volumoso, em dietas com teores semelhantes de FDN, não altera o valor nutricional das dietas de ovinos. Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito dessa substituição sobre o consumo e a digestibilidade aparente da MS e seus componentes, bem como sobre a dinâmica do FDN ruminal e o comportamento ingestivo dos ovinos.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi conduzido no confinamento do setor de caprinos e ovinos do Departamento de Zootecnia (DZ) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), no Brasil. As análises dos alimentos, sobras e fezes foram realizadas no Laboratório de Nutrição Animal da mesma instituição. O manejo dos animais seguiu as diretrizes estabelecidas pelo Comitê de Ética no Uso de Animais (CEUA) da UFRPE (protocolo nº 8811290322, ID 001020).

### **2.1. Animais, manejo e delineamento experimental**

Foram utilizados cinco ovinos machos da raça Santa Inês fistulados e canulados no rúmen, com peso corporal médio de 37,5 kg e desvio padrão de 5,57 kg. Os animais foram distribuídos em um delineamento quadrado latino  $5 \times 5$ , com cinco animais, cinco tratamentos e cinco períodos experimentais. Cada período teve duração de 22 dias, sendo 14 dias dedicados

à adaptação às dietas e 8 dias para amostragem e coleta de dados. Antes do início do experimento, os animais passaram por um período de adaptação de 10 dias às instalações e rotinas de manejo. A dieta foi oferecida aos animais *ad libitum*, permitindo-se uma sobra de 10% de MS. A alimentação ocorreu duas vezes ao dia, às 8h e às 16h, com água limpa e fresca sempre disponível. A dieta oferecida e as sobras foram pesadas diariamente para ajustar a quantidade fornecida com base no consumo de MS do dia anterior, ao longo de todos os períodos experimentais.

## 2.2. Ingredientes e formulação de dietas

A composição química dos ingredientes utilizados na formulação das dietas, bem como suas proporções e a composição química das dietas experimentais, são apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

**Tabela 1.** Composição química dos ingredientes utilizados nas dietas experimentais.

Itens	Silagem de milho	Palma forrageira (OEM)	Bagaço de cana de açúcar	Farelo de soja	Milho moído
<i>Composição química., g/kg MS</i>					
Matéria seca <sup>1</sup>	288,3	106,8	539,7	878,4	864,4
Cinzas	58,8	108,0	57,2	73,3	15,1
Proteína bruta	61,0	55,0	18,7	493,4	102,7
FDN <sub>cp</sub>	591,3	252,3	850,5	146,0	130,0
FDN <sub>i</sub>	168,8	112,8	447,4	17,3	16,1
CNF	257,9	566,3	62,0	268,2	712,1

<sup>1</sup> g/kg de matéria natural; OEM = “Orelha de Elefante mexicana” (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw); FDN<sub>cp</sub> = Fibra em detergente neutro corrigido para cinzas e proteína; FDN<sub>i</sub> Fibra em detergente neutro indigestível; CNF = Carboidratos não fibrosos.

As dietas experimentais foram formuladas com níveis de substituição da silagem de milho por palma forrageira Orelha de elefante mexicana (OEM) (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw), combinada ao bagaço de cana de açúcar e ureia, em 0, 25, 50, 75 e 100% com base na MS. Além dessas fontes de forragem, as dietas incluíram ingredientes concentrados (milho moído e farelo de soja), sal comum e um mix mineral comercial (Ovinofós®, Tortuga/DSM, São Paulo, Brasil), mantendo uma relação volumoso:concentrado (V:C) de 70:30.

A formulação das dietas foram planejadas para manter níveis fixados de FDN em todos os tratamentos (0%, 25%, 50%, 75% e 100% de substituição), respeitando a proporção entre palma e bagaço de cana-de-açúcar. Os cladódeos de palma forrageira foram colhidos manualmente e triturados em um picador de forragem. Antes de serem oferecidos aos animais, os cladódeos de palma processados foram homogeneizados manualmente com os demais ingredientes da dieta.

**Tabela 2.** Proporções dos ingredientes e composição química das dietas experimentais.

Itens	Níveis de substituição (%)				
	0	25	50	75	100
	<i>Ingredientes, g/kg MS</i>				
Silagem de milho	697,5	523,0	348,6	174,2	0,0
Palma OEM	0,0	74,8	149,5	224,2	299,0
Bagaço de cana de açúcar	0,0	97,7	195,4	293,1	390,5
Milho moído	132,0	132,0	132,0	132,0	132,0
Farelo de soja	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0
Ureia/Sulfato de amônia <sup>1</sup>	0,0	2,0	4,0	6,0	8,0
Sal comum	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1
Suplemento mineral <sup>2</sup>	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4
	<i>Composição química, g/kg MS</i>				
Matéria seca <sup>3</sup>	363,0	332,0	299,2	274,6	253,4
Matéria orgânica	925,5	922,0	918,5	915,1	911,6
Proteína bruta	130,1	130,7	131,3	131,9	132,5
FDNcp	451,5	450,3	449,1	447,9	446,6
FDNpd	329,1	305,2	281,3	257,4	233,4
FDNi	122,4	145,1	167,8	190,5	213,1
CNF	316,3	321,1	325,7	330,4	335,2

<sup>1</sup> Proporção de ureia para sulfato de amônio (SA): 9 partes de ureia para 1 parte de sulfato de amônio; <sup>2</sup> Composição química do suplemento mineral: Ca – 120 g/kg, P – 87 g/kg, S – 18 g/kg, Mg – 1300 mg/kg, Na – 147 g/kg, Co – 40 mg/kg, Cu – 590 mg/kg, I – 80 mg/kg, Se – 15 mg/kg, Zn – 3800 mg/kg, F (max.) – 870 mg/kg; <sup>3</sup> g/kg de matéria natural; Palma OEM = Orelha de elefante mexicana (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw); FDNcp = Fibra em detergente neutro corrigido para cinzas e proteína; FDNpd = Fibra em detergente neutro potencialmente digestível; FDNi = Fibra em detergente neutro indigestível; CNF = Carboidratos não fibrosos.

### 2.3. Amostragem e coleta de dados

Para estimar o consumo voluntário de MS e nutrientes, os ingredientes que compuseram a dieta ofertada e as sobras individuais foram coletadas do 15º ao 22º dia de cada período experimental. As amostras diárias foram armazenadas em freezer a –4°C para análises químicas subsequentes em laboratório. O comportamento ingestivo dos animais foi avaliado no 15º dia de cada período experimental. Os ovinos foram observados utilizando o método de amostragem de varredura instantânea (Martin e Bateson, 2007). No 19º dia de cada período experimental, quatro horas após a alimentação matinal, e no 21º dia, antes da alimentação, foi realizado o esvaziamento ruminal para determinar as taxas de desaparecimento ruminal (ki), passagem (kp) e degradação (kd), bem como os pools dietéticos de fibra em detergente neutro corrigida para cinzas e proteína (FDNcp), fibra em detergente neutro potencialmente digestível (FDNpd) e fibra em detergente neutro indigestível (FDNi), utilizando a técnica descrita por Allen e Linton (2007). Uma amostra representativa foi coletada e armazenadas em freezer a –4°C para posterior análise de MS, FDNcp e FDNi.

Do 16º ao 18º dia de cada período experimental, foi realizada a coleta total de fezes para estimar a digestibilidade aparente total da MS e seus constituintes, utilizando sacos coletores

fixados aos animais. As amostras diárias foram armazenadas em freezer a  $-4^{\circ}\text{C}$  para posterior análise química em laboratório.

#### **2.4. Análise química e cálculos experimentais**

As amostras de ingredientes, sobras e fezes coletadas durante o período de amostragem foram descongeladas e pré-secas em estufa de ar forçado a  $55^{\circ}\text{C}$  por 72 horas ou até atingirem peso constante. Posteriormente, uma amostra composta foi preparada para cada animal, tratamento e período. Essas amostras compostas foram então processadas utilizando um moinho de facas (Marconi®, modelo MA 340, Brasil), empregando peneiras com poros de 1 mm e 2 mm. A peneira com poros de 2 mm foi utilizada exclusivamente para a estimativa da FDN<sub>i</sub>, enquanto a peneira de 1 mm foi empregada para todas as demais análises químicas.

As determinações de MS (método AOAC 934.01), cinzas (CA; método AOAC 942.05), proteína bruta (PB; método AOAC 954.01) e extrato etéreo (EE; método AOAC 920.39) foram realizadas de acordo com a AOAC (2023). O teor de FDN foi determinado seguindo Van Soest et al. (1991), sem o uso de sulfito de sódio, com a adição da enzima  $\alpha$ -amilase termoestável, conforme recomendado por Mertens (2002). O resíduo de FDN foi corrigido para cinzas (CIDN) e proteína insolúvel em fibra detergente neutra (PIDN), de acordo com as metodologias descritas por Mertens (2002) e Licitra et al. (1996), respectivamente.

Posteriormente, o FDN<sub>cp</sub> foi obtido utilizando a equação proposta por Detmann e Valadares Filho (2010):  $\text{FDN}_{cp} \text{ (g/kg MS)} = \text{FDN} - (\text{CIDN} + \text{PIDN})$ . Para a estimativa do FDN<sub>i</sub>, as amostras previamente secas em estufa e moídas em peneira de 2 mm foram colocadas em sacos de tecido não tecido (TNT,  $100 \text{ g/m}^2$ ), mantendo uma relação amostra/superfície de até  $20 \text{ mg MS/cm}^2$ . Os sacos foram incubados no rúmen de um bovino fistulado por 288 h. Sacos de malha de náilon foram utilizados para manter os sacos de amostra dentro do rúmen, permitindo sua completa recuperação ao final do período de incubação. Após a incubação, os sacos foram enxaguados em água corrente até a completa remoção dos resíduos solúveis. Em seguida, foram secos em estufa a  $55\text{--}60^{\circ}\text{C}$  até peso constante e submetidos à extração com detergente neutro, de acordo com o procedimento de Van Soest et al. (1991) (sem o uso de sulfito de sódio). O valor de FDN<sub>i</sub> foi expresso como a porcentagem do resíduo restante em relação à MS inicial, representando a fração de FDN que resiste à degradação microbiana no rúmen.

O consumo de MS e de nutrientes foi calculada como a diferença entre a quantidade de nutrientes oferecida e a quantidade recuperada nas sobras. A estimativa da FDN<sub>pd</sub> de cada componente da dieta foi realizada utilizando a seguinte equação:  $\text{FDN}_{pd} = \text{FDN}_{cp} - \text{FDN}_i$ .

Para a quantificação de CNF em dietas contendo ureia (25%, 50%, 75% e 100% de substituição), utilizou-se a equação sugerida por Mertens (1997), adaptada por Hall (2000) e descrita por Detmann et al. (2021):  $CNF (\% MS) = 100 - CA - EE - FDN_{cp} - (PB - PBU + U)$ . Onde: PBU = proteína bruta da ureia; U = quantidade de ureia. Para a quantificação de CNF na dieta sem inclusão de ureia (0% de substituição), utilizou-se a equação proposta por Mertens (1997), com modificações de Detmann e Valadares Filho (2010), onde:  $CNF (\% MS) = 100 - CA - EE - FDN_{ap} - PB$ . Para a estimativa da ingestão total de nutrientes digestíveis (NDT), foi adotada a equação descrita por Weiss et al (1992), adaptada da seguinte forma:  $NDT (g/kg) = (PBd + FDN_{cpd} + CNFd + (EEd \times 2,25))$ . Onde: d = digestível.

### 2.5. Métodos estatísticos

O modelo estatístico utilizado foi:  $Y_{ijkl} = \mu + S_i + A_j + P_k + \varepsilon_{(ijk)}$ . Onde:  $Y_{ijk}$  = variável resposta medida no animal j, durante o período k, submetido ao tratamento i;  $\mu$  = média geral;  $S_i$  = efeito do tratamento i (efeito fixo);  $A_j$  = efeito do animal j (efeito aleatório);  $P_k$  = efeito do período experimental k (efeito aleatório); e  $\varepsilon_{(ijk)}$  = erro aleatório não observável, assumido como normalmente distribuído. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software Statistical Analysis System (SAS versão 9.4 M8). O comportamento das variáveis ao longo do período de amostragem foi avaliado utilizando o procedimento PROC MIXED. Polinômios ortogonais foram ajustados aos níveis quantitativos do tratamento para avaliar a presença de tendências lineares e quadráticas. A análise foi realizada utilizando o procedimento PROC GLM do SAS, incluindo os termos lineares e quadráticos no modelo. O nível de significância de 5% foi adotado para o erro do Tipo I.

## 3. RESULTADOS

O aumento dos níveis de substituição diminuiu linearmente o consumo diário de MS (e MS como % do peso corporal), MO, PB, FDN<sub>cp</sub> (e FDN como % do peso corporal) e NDT (de 1244,2 para 947,9 g/dia [3,18 para 2,56% do PC]; 1151,9 para 957,9; 168,1 para 131,5; 544,5 para 397 g/dia (1,38 para 1,06% do PC); e 804,1 para 554 g/dia, respectivamente). Em contraste, a ingestão diária de FDN<sub>i</sub> aumentou linearmente (de 151,3 para 194,9 g/dia). Por outro lado, não foi observado efeito da substituição sobre o consumo diário de CNF (Tabela 3).

Observou-se uma redução linear na digestibilidade média da MS, MO e FDN<sub>cp</sub> (650,2–505,9; 683,2–537,7; 539,7–396,3 g/dia; 79,6–66,2%, respectivamente). Não foi observado efeito na digestibilidade aparente da PB e do CNF (Tabela 4).

Não houve efeito significativo da substituição no pool ruminal de FDN<sub>cp</sub> e no ki do FDN<sub>i</sub>. No entanto, as taxas de kp e kd do FDN<sub>cp</sub> diminuíram linearmente, com reduções de 87 g, 0,8% e 2,39% h<sup>-1</sup>, respectivamente. Da mesma forma, o ki do FDN<sub>cp</sub> e do FDN<sub>p</sub> diminuiu

3,19% e 3,2% h<sup>-1</sup>, respectivamente. Observou-se um efeito significativo no tempo de retenção da FDNcp (Tr) e no pool ruminal de FDNi, que aumentaram linearmente, variando de 14,03 a 25,90 horas e de 95 a 226 g, respectivamente (Tabela 5).

**Tabela 3.** Valores médios de consumo de nutrientes em ovinos.

Itens	Níveis de substituição (%)					EPM	P-valor	
	0	25	50	75	100		L	Q
<i>Consumo, g/dia</i>								
Matéria seca	1244,2	1156,2	1013,7	1002,4	947,9	48,2	0,039	0,634
Matéria orgânica	1151,9	1063,8	927,8	912,4	857,9	44,4	0,027	0,625
Proteína bruta	168,1	157,7	138,6	137,3	131,5	6,4	0,042	0,638
FDNcp	544,5	507,4	432,3	426,3	397,0	21,6	0,022	0,650
FDNi	151,3	164,6	164,8	187,0	194,9	7,9	0,044	0,869
CNF	398,9	379,1	348,8	341,4	339,0	16,2	0,219	0,745
NDT	804,1	727,4	635,9	615,9	554,0	76,6	< 0,01	0,682
<i>Consumo, % PC</i>								
Matéria seca	3.18	2.99	2.73	2.65	2.56	0.06	< 0.01	0.451
FDNcp	1.38	1.31	1.17	1.12	1.07	0.03	< 0.01	0.541

FDNcp = Fibra em detergente neutro corrigido para cinzas e proteína; FDNi = Fibra em detergente neutro indigestível; CNF = Carboidratos não fibrosos; NDT = nutrientes digestíveis totais (calculado); %PC = porcentagem do peso corporal; EPM = Erro padrão da média; L = Efeito linear; Q = Efeito quadrático.

**Tabela 4.** Valores médios da digestibilidade aparente total dos nutrientes.

Item	Níveis de substituição (%)					EPM	P-valor	
	0	25	50	75	100		L	Q
<i>Digestibilidade aparente total, g/dia</i>								
Matéria seca	650,2	596,2	578,0	548,8	505,9	7,1	< 0,01	0,780
Matéria orgânica	683,2	630,1	583,1	564,2	537,7	6,8	< 0,01	0,939
Proteína bruta	705,9	726,6	729,9	711,9	727,1	7,3	0,596	0,607
FDNcp	539,7	492,8	480,0	450,9	396,3	6,8	< 0,01	0,669
CNF	826,2	825,2	820,4	819,6	802,8	16,5	0,136	0,899

FDNcp = Fibra em detergente neutro corrigido para cinzas e proteína; CNF = Carboidratos não fibrosos.

No comportamento ingestivo dos animais, observou-se uma redução linear no tempo gasto com alimentação (TGA) (278–216 min/dia) com o aumento dos níveis de substituição. Por outro lado, o tempo gasto em ocio (TGO) aumentou linearmente (596–712 min/dia). Não houve efeito significativo dos níveis de substituição no tempo gasto em ruminação (TGR). Em relação às eficiências, observou-se uma redução linear na eficiência de ruminação da matéria seca (ERMS) (143,3–113,7 g/hora) e na eficiência de ruminação da fibra em detergente neutro (ERFDN) (63,5–47,7 g/hora). A eficiência de ingestão de matéria seca (EIMS) e a eficiência de ingestão de fibra em detergente neutro (EIFDN) não apresentaram efeito significativo com a substituição (Tabela 6).

**Tabela 5.** Valores médios do conteúdo ruminal, cinética da digestão e tempo de retenção das frações de fibra em dietas de ovinos.

Itens	Níveis de substituição (%)					EPM	P-valor	
	0	25	50	75	100		L	Q
Pool ruminal (g)								
FDNcp	320,1	321,8	354,0	379,8	364,2	20,1	0,162	0,681
FDNpd	225,1	173,0	166,6	154,9	138,0	15,1	< 0,01	0,537
FDNi	95,0	147,7	187,4	224,0	226,2	13,4	< 0,01	0,101
FDNcp (% h <sup>-1</sup> )								
ki	7,2	6,8	5,8	4,5	4,0	0,2	< 0,01	0,761
kp	3,5	3,5	2,8	2,6	2,7	0,1	< 0,01	0,606
kd	3,6	3,3	2,9	1,8	1,2	0,1	< 0,01	0,260
Tempo de retenção <sup>1</sup>	14,0	15,6	17,6	21,5	25,9	0,8	< 0,01	0,467
FDNpd (% h <sup>-1</sup> )								
ki	5,1	4,7	4,0	2,3	1,9	0,1	< 0,01	0,225
FDNi (% h <sup>-1</sup> )								
ki	2,0	2,1	2,0	1,9	2,0	0,1	0,162	0,199

<sup>1</sup> = h<sup>-1</sup>; FDNcp = Fibra em detergente neutro corrigido para cinzas e proteína; FDNpd = Fibra em detergente neutro potencialmente digestível; FDNi = Fibra em detergente neutro indigestível; ki = taxa de desaparecimento ruminal; kp = taxa de passagem ruminal; kd = taxa de degradação ruminal.

**Tabela 6.** Valores médios do comportamento ingestivo de ovinos.

Item	Níveis de substituição (%)					EPM	P-valor	
	0	25	50	75	100		L	Q
TGA (min/dia)	278,0	272,0	222,0	226,0	216,0	5,7	< 0,01	0,351
TGR (min/dia)	566,0	508,0	506,0	492,0	512,0	11,7	0,149	0,143
TGO (min/dia)	596,0	660,0	712,0	722,0	712,0	11,9	< 0,01	0,065
	<i>Eficiências (g/hora)</i>							
EIMS	296,3	279,2	280,1	271,8	261,8	12,3	0,393	0,963
EIFDN	131,2	121,7	119,7	115,0	109,4	5,4	0,206	0,913
ERMS	143,3	147,0	119,6	128,0	113,7	4,6	0,025	0,992
ERFDN	63,5	64,0	51,0	54,0	47,7	2,0	< 0,01	0,899

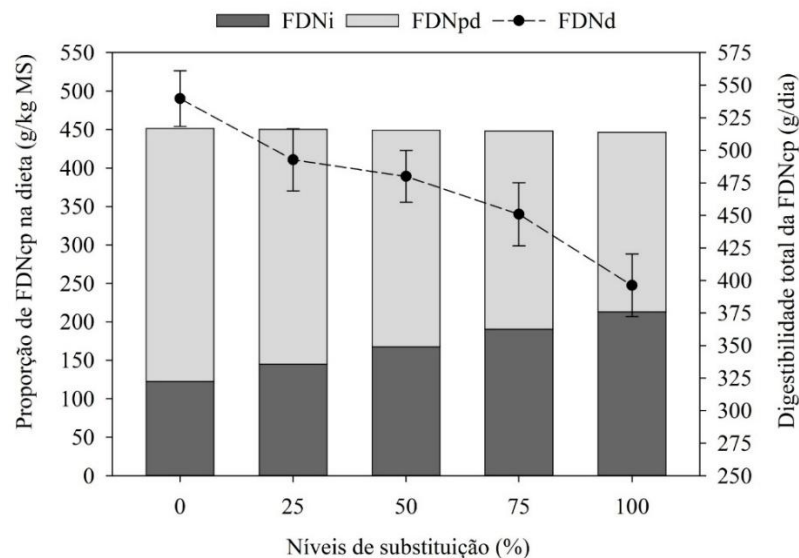
TGA = Tempo gasto com alimentação; TGR = Tempo gasto com ruminacão; TGO = Tempo gasto em ócio; EIMS= Eficiência de ingestão de matéria seca; EIFDN = Eficiência de ingestão de fibra detergente neutra; ERMS= Eficiência de ruminacão de matéria seca; ERFDN = Eficiência de ruminacão da fibra em detergente neutro.

#### 4. DISCUSSÃO

A substituição parcial ou total da silagem de milho por palma forrageira OEM, bagaço de cana de açúcar e ureia alterou significativamente a composição da FDN das dietas. Embora as dietas tenham mantido o mesmo teor total de FDN, a proporção de FDNi aumentou linearmente (em aproximadamente 0,91 g para cada 1% de substituição), enquanto a FDNpd diminuiu gradualmente (em cerca de 0,95 g para cada 1% de substituição). Conseqüentemente, na dieta com 100% de substituição, o teor de FDNi atingiu 21,3% da MS (Tabela 2).

O aumento no teor de FDNi na dieta deveu-se principalmente à inclusão progressiva de bagaço de cana de açúcar na dieta (0–390,5 g/kg de MS, Tabela 2). O bagaço de cana de açúcar apresenta alto teor de FDNi em sua composição (44,74% da MS, Tabela 1) devido à participação substancial de lignina em seu componente estrutural (19 a 24%) (Abdel-Alim e

Elnesr, 2022). Esse constituinte está intimamente associado à resistência à degradação microbiana no rúmen, criando barreiras físicas que impedem o acesso dos microrganismos ruminais aos polissacarídeos fibrosos, prevenindo, assim, a ação das enzimas hidrolíticas ruminais sobre a celulose e a hemicelulose (Silva et al., 2015; Gado et al., 2017; Almeida et al., 2018; Alokika et al., 2021; Lima et al., 2023). Nesse sentido, como a silagem de milho deixou de ser a principal fonte de FDN, sendo substituída quase que totalmente pelo bagaço de cana de açúcar (representando 74,4% da FDN na dieta com substituição de 100%), observou-se o aumento descrito anteriormente na relação FDNi/FDNpd. Isso levou a uma diminuição linear na fração digestível de FDN no rúmen, prejudicando significativamente a digestibilidade da FDNcp da dieta (Gráfico 1) e, consequentemente, a digestibilidade aparente da MS e da MO da dieta.



**Gráfico 1.** Proporção de fibra em detergente neutro potencialmente digestível (FDNpd) e fibra em detergente neutro indigestível (FDNi) na fibra em detergente neutro corrigida para cinzas e proteína (FDNcp) (g/kg MS) e digestibilidade total da FDNcp (g/dia) de acordo com os níveis de substituição da silagem de milho por palma forrageira (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw) mais bagaço de cana de açúcar e ureia na dieta de ovinos (0, 25, 50, 75 e 100%). As barras de erro indicam o desvio padrão da média.

Por outro lado, os níveis de substituição não afetaram a digestibilidade da PB e do CNF. A alta disponibilidade de nitrogênio não proteico, resultante do aumento gradual da ureia na dieta (Tabela 2), exerceu um efeito positivo na digestibilidade da PB, equilibrando-a entre as dietas. Isso ocorre porque a ureia é altamente solúvel no rúmen e é rapidamente hidrolisada pela urease produzida por microrganismos ruminais, convertendo-a em amônia. Parte dessa amônia é rapidamente utilizada para a síntese de proteína microbiana, enquanto o restante é absorvido pela corrente sanguínea e pode retornar ao rúmen como ureia hepática (via saliva ou difusão através da parede ruminal) ou ser excretado na urina (também como ureia hepática) (Van Soest, 1994; Ramalho et al., 2024). Os CNF são quase inteiramente digeridos no rúmen (média de

81,88%, Tabela 4), independentemente de sua origem, seja silagem de milho, palma forrageira ou sua proporção na dieta, e estão rapidamente disponíveis para digestão pelos microrganismos ruminais (Silva et al., 2015).

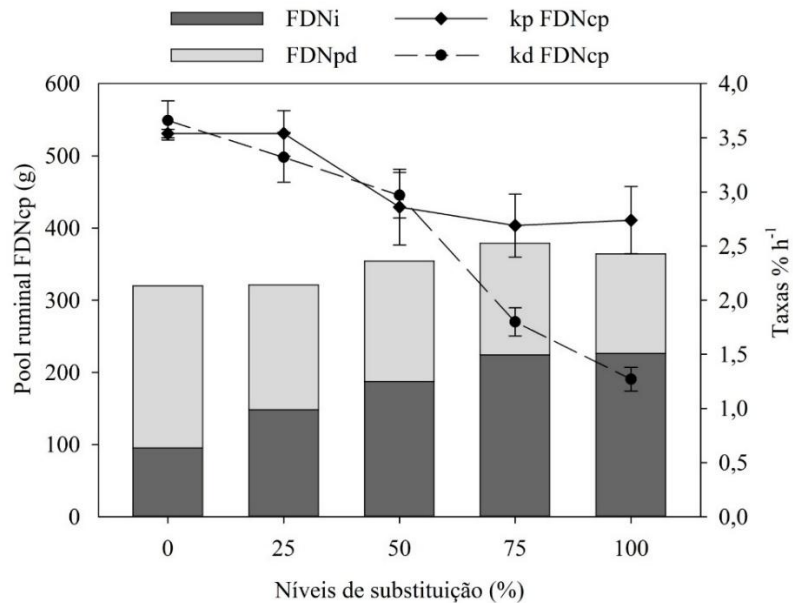
O aumento linear no consumo de FDNi (151,3–194,9 g/dia,  $P < 0,05$ ), combinado com a redução na digestibilidade da dieta, causou alterações significativas na dinâmica ruminal da FDNcp. O fluxo de FDNi no rúmen ocorre exclusivamente por passagem; ou seja, a saída desse componente para compartimentos além do rúmen acontece somente após as partículas atingirem um tamanho e densidade específicos, exigindo processamento físico por meio da mastigação e ruminação (Tabela 6). Não há degradação microbiana desse constituinte, o que resulta em um tempo de retenção mais longo no rúmen (Waldo et al., 1972; Mertens e Grant, 2020; Oliveira et al., 2020).

Assim, embora o consumo de FDNcp tenha diminuído linearmente (544,5–397,0 g/dia,  $P < 0,05$ ), sua composição apresentou uma proporção maior de FDNi, reduzindo substancialmente a quantidade de FDNpd que chegava ao ambiente ruminal. Esse padrão causou uma redução linear na kd da FDNcp no rúmen (3,66–1,27%  $h^{-1}$ ,  $P < 0,05$ ), reduzindo-a em mais da metade (redução de 2,39%), o que, conseqüentemente, prejudicou a kp da FDNcp, reduzindo-a linearmente (3,54–2,74%  $h^{-1}$ ,  $P < 0,05$ ). A redução dessas duas taxas críticas resultou em uma diminuição significativa na ki da FDNcp no rúmen (7,20–4,01%  $h^{-1}$ ,  $P < 0,05$ ).

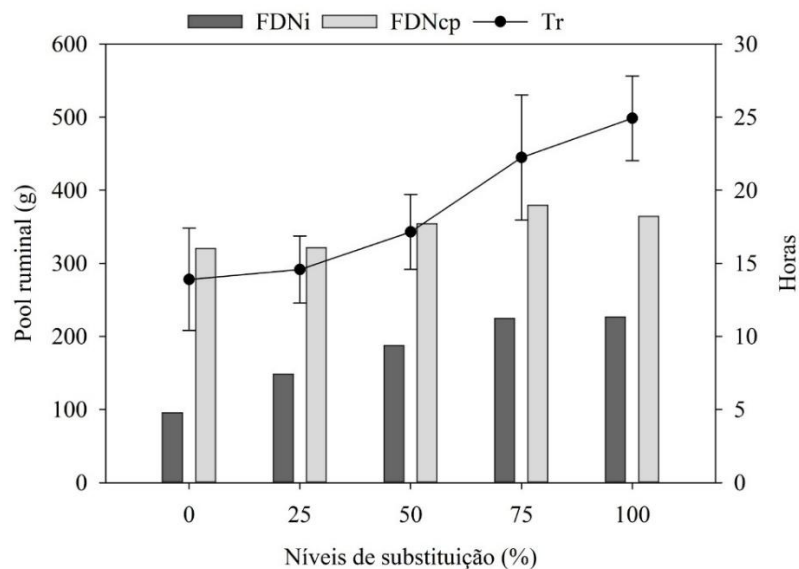
O parâmetro ki representa a porcentagem de FDNcp que desaparece do rúmen por hora, abrangendo tanto a degradação microbiana quanto a passagem física para o trato digestivo posterior ao rúmen. Portanto, sua redução implica em uma menor taxa de renovação de FDNcp presente no rúmen, levando a um efeito cumulativo desse constituinte e aumentando consideravelmente em seu Tr no ambiente ruminal — um efeito confirmado pelo Tr da FDNcp observado neste estudo (14,03–25,90 h,  $P < 0,05$ ) (Waldo et al., 1972; Oliveira et al., 2011; Mertens e Grant, 2020).

Esse efeito pode ser observado ao analisar o pool ruminal de FDNcp, FDNi e FDNpd. O pool observado para FDNcp foi semelhante entre os níveis de substituição, demonstrando que o limiar do pool ruminal de FDN foi, em média, de 348,0 g para todos os níveis de substituição. No entanto, a composição desse pool variou com o aumento da substituição, observando-se um aumento linear no pool ruminal de FDNi concomitantemente com uma redução no pool ruminal de FDNpd, causada pela redução no ki e pelo aumento na retenção de FDNcp no rúmen (com alta proporção de FDNi). Assim, enquanto a dieta 0% proporcionou maior ki e menor Tr, permitindo maior consumo de FDNcp pelos animais, os níveis

subsequentes (25, 50, 75 e 100%) reduziram linearmente essa possibilidade (Gráfico 2 e Gráfico 3).



**Gráfico 2.** Relação entre o pool ruminal de fibra em detergente neutro potencialmente digestível (FDNpd) e indigestível (FDNi) (g) e as taxas fracionárias de passagem (kp, % h<sup>-1</sup>) e de degradação (kd, % h<sup>-1</sup>) de FDNcp de acordo com os níveis de substituição da silagem de milho por palma forrageira (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw) mais bagaço de cana de açúcar e ureia na dieta de ovinos (0, 25, 50, 75 e 100%). As barras de erro indicam o desvio padrão da média.



**Gráfico 3.** Relação entre o pool ruminal de fibra em detergente neutro corrigida para cinzas e proteína (FDNpd, g) e sua fração indigestível (FDNi, g), e o tempo de retenção ruminal (Tr, h) de acordo com os níveis de substituição da silagem de milho por palma forrageira (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw) mais bagaço de cana de açúcar e ureia na dieta de ovinos (0, 25, 50, 75 e 100%). As barras de erro indicam o desvio padrão da média.

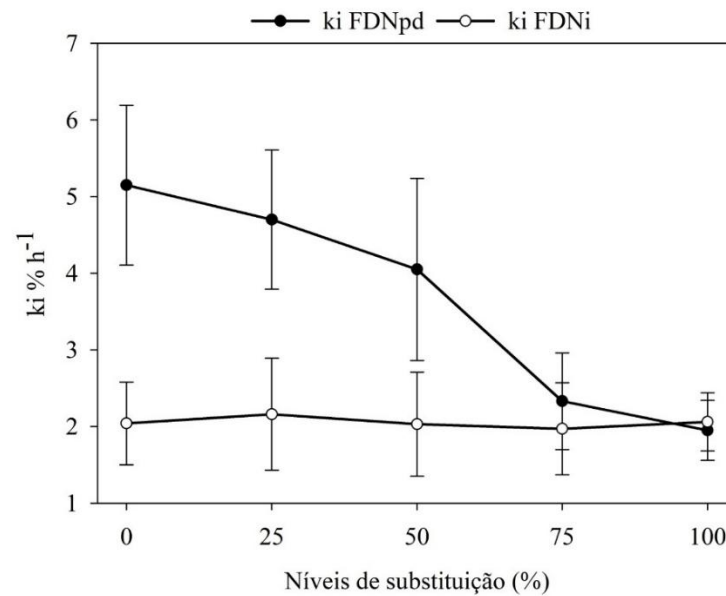
É importante destacar que o Tr estimado neste estudo foi baseado em modelos bem estabelecidos na literatura (Dado e Allen, 1996). No entanto, algumas limitações devem ser

reconhecidas em relação a fatores não considerados por esses modelos. Sabe-se que, para certos alimentos, a produção de FDN<sub>pd</sub> só se inicia após processos preliminares, como a hidratação das partículas, a remoção de compostos bacteriostáticos por solubilização e a colonização efetiva por microrganismos ruminais — conhecidos coletivamente como fase de latência (Oliveira et al., 2011). Portanto, pode-se inferir que variações na duração dessa fase de latência nos diferentes níveis de substituição testados neste estudo (por meio da inclusão de óleo de palma e bagaço de cana) podem ter influenciado o aumento observado no Tr, indicando a necessidade de mais pesquisas para esclarecer esse efeito.

A substituição não afetou o  $k_i$  da FDN<sub>i</sub>, que permaneceu consistente em todos os níveis de substituição (média de 2,05% h<sup>-1</sup>). No entanto, o  $k_i$  da FDN<sub>pd</sub> apresentou uma diminuição linear (5,15–1,95% h<sup>-1</sup>,  $P < 0,05$ ). Portanto, pode-se inferir que o Tr da FDN<sub>pd</sub> aumentou linearmente, potencialmente atingindo ou mesmo excedendo o da FDN<sub>i</sub> no rúmen em níveis de substituição mais elevados. Isso sugere um possível mecanismo compensatório natural, aumentando a probabilidade de digestão da FDN por meio da retenção seletiva da FDN<sub>pd</sub> no rúmen (Gráfico 4). Lund et al. (2007) analisaram a cinética da FDN (especificamente FDN<sub>pd</sub> e FDN<sub>i</sub>) em forragens usando o método de pool e fluxo in vivo. Eles observaram taxas de passagem mais elevadas para a FDN<sub>i</sub> em comparação com a FDN<sub>pd</sub> não degradada, bem como um Tr médio da FDN<sub>pd</sub> maior do que o da FDN<sub>i</sub> para a maioria dos alimentos. Concluíram que esse comportamento reflete uma retenção seletiva genuína no rúmen de partículas com alto teor de fibra.

O mecanismo subjacente à retenção seletiva no rúmen pode ser explicado pelo efeito da intensidade da fermentação sobre as partículas em suspensão. Partículas em processo ativo de fermentação tendem a permanecer suspensas, uma vez que o dióxido de carbono e o metano produzidos durante a fermentação da matéria orgânica potencialmente fermentável reduzem a densidade dessas partículas. Em outras palavras, a FDN<sub>pd</sub> no rúmen mantém-se em suspensão em função da fermentação, sendo retida na porção dorsal do rúmen devido aos gases gerados durante esse processo fermentativo.

Assim, quanto menor a taxa de degradação da FDN<sub>pd</sub>, maior tende a ser o tempo de permanência dessa fração na região dorsal do rúmen. Em contrapartida, as partículas de FDN<sub>i</sub> que se tornam livres — seja por ação física (mastigação/ruminação) ou pelo seu desprendimento gradual da fração fibrosa à medida que a fermentação avança — apresentam maior densidade e, portanto, sofrem menor influência dos gases presentes no ambiente ruminal. Essa condição favorece o deslocamento dessas partículas para regiões mais profundas do rúmen, aumentando a probabilidade de passagem pelo orifício retículo-omasal (Allen, 1996; Oliveira et al., 2011).



**Gráfico 4.** Relação entre a taxa fracionária de desaparecimento ruminal ( $ki$ , %  $h^{-1}$ ) da fibra em detergente neutro potencialmente digestível (FDNpd) e indigestível (FDNi), em função dos níveis de substituição da silagem de milho por palma forrageira (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.), mais bagaço de cana de açúcar e à ureia, na dieta de ovinos (0, 25, 50, 75 e 100%). As barras de erro indicam o desvio-padrão da média.

Nesse contexto, a entrada de FDN com elevada proporção de FDNi no rúmen evidenciou uma limitação físico-ruminal associada ao consumo excessivo de FDNi pelos ovinos, possivelmente resultando em enchimento e distensão ruminal, o que pode ter contribuído para a restrição do consumo adicional de alimento. Consequentemente, os animais reduziram o tempo de alimentação, ocasionando um declínio linear no consumo de matéria seca e de nutrientes (MO, PB, FDNcp e NDT), bem como no TGA, o que, por sua vez, resultou em aumento no TGO. Esse comportamento está em consonância com achados da literatura, nos quais alguns autores relatam que, quando a dieta é predominantemente composta por fibra de baixa digestibilidade ou indigestível, a correlação entre o consumo voluntário e os componentes químicos da dieta é elevada. Consequentemente, o consumo de FDNcp, especialmente quando a fração de FDNi representa uma proporção elevada, passa a ser um dos principais fatores responsáveis pela regulação física do consumo voluntário de matéria seca (Mertens, 1994; Van Soest, 1994; Sampaio et al., 2009; Oliveira et al., 2020). Não foi observado efeito dos níveis de substituição sobre o consumo de CNF, possivelmente em função do aumento do teor de CNF na dieta (316,3–335,2 g/kg de MS; Tabela 2), impulsionado principalmente pela inclusão progressiva da palma OEM.

Ovinos podem consumir FDN em quantidades superiores a 1,5% do PC em função de sua maior eficiência na degradação da fibra, uma vez que apresentam capacidade de ruminar

partículas finas que, em bovinos, tenderiam a escapar do processo de ruminação (Oliveira et al., 2020; Azevêdo et al., 2024). Entretanto, essa capacidade torna-se limitada quando a FDN da dieta é majoritariamente composta por fibra de baixa digestibilidade, intensificando o efeito de enchimento ruminal e reduzindo adicionalmente a digestibilidade da FDN. Essa limitação explica o decréscimo linear observado no consumo de FDNcp em relação ao peso corporal (1,38–1,07% PC;  $P < 0,05$ ) no presente estudo.

O tempo de retenção ruminal corresponde ao período necessário para que as partículas do alimento sejam suficientemente reduzidas em tamanho, por meio da ação combinada da mastigação e da ruminação, e adquiram a densidade específica requerida para a passagem, em decorrência da degradação microbiana que altera sua densidade. Esses processos complementares promovem o escoamento ruminal e permitem que as partículas atravessem o orifício retículo-omasal em direção aos compartimentos subsequentes do trato gastrointestinal (Mertens e Richard, 2020). Nesse contexto, o acúmulo de FDNi, associado ao aumento linear do Tr, evidenciou a necessidade de um período mais prolongado de ruminação para a adequada redução do tamanho das partículas. Em outras palavras, os animais passaram a despender mais tempo ruminando por grama de MS e de FDNcp à medida que os níveis de substituição aumentaram, resultando em redução da ERMD e da ERFDN. No entanto, o TGR manteve-se semelhante entre os níveis de substituição, provavelmente em função do efeito combinado da menor eficiência de ruminação e da redução no consumo de MS e de FDNcp. A AIMS e AIFDN não foram afetadas pelos níveis de substituição, principalmente porque a redução no consumo de MS e de FDNcp foi compensada pela diminuição do TGA, mantendo assim o equilíbrio.

A inclusão de palma forrageira pode ter favorecido o consumo de bagaço de cana de açúcar pelos animais, uma vez que suas propriedades mucilaginosas, quando moídos, contribuem para a coesão dos ingredientes, resultando em uma mistura alimentar mais homogênea (Medeiros et al., 2024). Esse efeito torna-se particularmente evidente na ausência da palma forrageira em dietas à base de bagaço de cana-de-açúcar. Em um estudo que avaliou o bagaço de cana de açúcar como única fonte de volumoso para vacas em lactação, Almeida et al. (2018) relataram que a presença de partículas longas — decorrente do elevado teor de bagaço — associada à ausência da palma forrageira como agente ligante e promotor de palatabilidade resultou em acentuada redução na EIMS e EIFDN.

Os resultados deste estudo sugerem que manter o FDN fixado em 45% da matéria seca da dieta em dietas com substituição crescente de silagem de milho por cladódios de OEM e bagaço de cana de açúcar suplementado com ureia pode não ser uma abordagem viável. Essa limitação decorre principalmente da necessidade de incluir quantidades progressivamente

maiores de bagaço de cana de açúcar para atingir o nível de FDN desejado, o que aumenta substancialmente a proporção de FDNi na fração de fibra e afeta negativamente a ingestão de NDT pelos animais.

Por outro lado, são necessários estudos adicionais para elucidar a relação entre o teor de FDNi e a proporção de FDN na dieta, uma vez que níveis de FDNi superiores a 15% tendem a se tornar progressivamente mais relevantes à medida que o teor total de FDN na dieta aumenta. Nesse sentido, o conteúdo de FDNi emerge como um fator-chave a ser considerado na formulação de dietas, podendo desempenhar um papel benéfico na saúde ruminal, ao estimular a ruminação, ou, inversamente, atuar como fator limitante do consumo voluntário de alimentos.

## 5. CONCLUSÃO

Conclui-se que a combinação de palma forrageira, bagaço de cana de açúcar e ureia não substituiu adequadamente a silagem de milho, pois reduziu as taxas de passagem e degradação da FDNcp no rúmen, aumentando o tempo de retenção e, conseqüentemente, reduzindo o consumo de nutrientes.

Considerando que os efeitos da FDN total e da FDNi sobre o consumo, a digestibilidade dos nutrientes e o desempenho animal dependem da composição da fonte fibrosa, recomenda-se levar em conta não apenas o teor de FDN total na formulação de dietas, mas também os níveis de FDNi e FDNpd. Essa abordagem visa prevenir possíveis excessos de FDNi em dietas para ruminantes, especialmente quando a principal fonte de fibra é um ingrediente com alta proporção de fibra indigestível, como o bagaço de cana-de-açúcar.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-ALIM, A.A.E., ELNESR, S.S. Influence of sugarcane bagasse on in vitro degradability, rumen characteristics, nutrient digestibility, blood parameters and milk production of lactating buffaloes. **Anim. Biotechnol.**, 34, 3378–3386, 2022. <https://doi.org/10.1080/10495398.2022.2149546>

ALLEN, M.S. Physical restrictions on voluntary forage intake by ruminants. **J. Anim. Sci.**, 74, 3063–3075, 1996.. <https://doi.org/10.2527/1996.74123063x>

ALLEN, M.S., LINTON, J.V. In vivo methods to measure digestibility and digestion kinetics of feed fractions in the rumen. In: **Proceedings of the 1st International Symposium on Advances in Research Techniques in Ruminant Nutrition**. Pirassununga, Brazil: Universidade de São Paulo, pp. 72–89, 2007.

ALMEIDA, G.A.P., ANDRADE-FERREIRA, M., LIMA-SILVA, J., CHAGAS, J.C.C., VÉRAS, A.S.C., BARROS, L.J.A., ALMEIDA, G.L.P. Sugarcane bagasse as exclusive roughage for dairy cows in smallholder livestock systems. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.*, 31, 379–385, 2018. <https://doi.org/10.5713/ajas.17.0205>

ALOKIKA, A., KUMAR, A., KUMAR, V., SINGH, B. Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: potential, challenges and future perspectives. **Int. J. Biol. Macromol.**, 183, 1358–1368, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.155>

AOAC. **Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists.** 22nd ed. AOAC International, Gaithersburg, MD, USA, 2023.

ARAÚJO JÚNIOR, G.N., LEITE, R.M.C., MORAIS, J.E.F., ALVES, C.P., SOUZA, C.A.A., ALMEIDA, A.C.S., JARDIM, A.M.R.F., SOUZA, L.S.B., EUGENIO, D.S., SILVA, T.G.F. Growth dynamic, productivity, evapotranspiration, and water-economic indices of forage cactus under different irrigation depths. **Agronomy.**, 14, 691, 2024. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040691>

AZEVEDO, J.A.G., PEREIRA, M.I.B., SOUZA, L.L., MENEZES, G.L., CARVALHO, G.G.P., PEREIRA, E.S., TEIXEIRA, I.A.M.A., SANTOS, S.A., PEREIRA, M.L.A., ARAÚJO, G.G.L., CÂNDIDO, M.J.D., BEZERRA, L.R., PEREIRA FILHO, J.M., LIMA JÚNIOR, D.M., URBANO, S.A., FERREIRA, M.A., RUIZ ALBA, H.D. Predição do consumo de matéria seca para caprinos e ovinos. In: Exigências Nutricionais de Caprinos e Ovinos – BR-CAPRINOS & OVINOS. **Scienza Publishing**, pp. 33–64, 2024. <https://doi.org/10.26626/9786556681849.2024C002>

BEZERRA, S.B.L., VÉRAS, R.M.L., BATISTA, A.M.V., GUIM, A., MACIEL, M.V., CARDOSO, D.B., CARVALHO, F.F.R. Carcass characteristics and meat quality of lambs fed high levels of spineless cactus in the diet. *S. Afr. J. Anim. Sci.*, 51, 416–425, 2021. <https://doi.org/10.4314/sajas.v51i4.1>

CAMPELO-LIMA, V.H., ANTAS-URBANO, S., ANDRADE-FERREIRA, M., CAVALCANTE-RIBEIRO, P.H., GOMES-BEZERRA, J.I., CARIRI-CHAGAS, J.C., MOREIRA-AGUIAR, E., NASCIMENTO-RANGEL, A.H. Sugarcane bagasse or elephant grass hay in diets for goats: performance, feeding behaviour and carcass characteristics. **Rev. Colomb. Cienc. Pecu.**, 35, 49–59, 2022. <https://doi.org/10.17533/udea.rccp.v35n1a05>

CARDOSO, D.B., CARVALHO, F.F.R., MEDEIROS, G.R., GUIM, A., CABRAL, A.M.D., VÉRAS, R.M.L., OLIVEIRA-NASCIMENTO, A.G. Levels of inclusion of spineless cactus (*Nopalea cochenillifera* Salm Dyck) in the diet of lambs. **Anim. Feed Sci. Technol.**, 247, 23–31, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.10.016>

DADO, R.G., ALLEN, M.S. Intake limitations, feeding behavior, and ruminal function of cows challenged with ruminal filler of dietary fiber or inert bulk. **J. Dairy Sci.**, 78, 118–133, 1996. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(95\)76622-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(95)76622-X)

DETMANN, E., SOUZA, M.A., VALADARES FILHO, S.C., QUEIROZ, A.C., BERCHIELLI, T.T., SALIBA, E.O.S., CABRAL, L.S., PINA, D.S., LADEIRA, M.M., AZEVEDO, J.A.G. **Métodos para análise de alimentos.** Suprema, Visconde do Rio Branco, MG, Brazil: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Ciência Animal, 2021.

DETMANN, E., VALADARES FILHO, S.C. On the estimation of non-fibrous carbohydrates in feeds and diets. **Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.**, 62, 980–984, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0102-09352010000400030>

DUBEUX, J.C.B. JR., SANTOS, M.V.F., CUNHA, M.V., FERREIRA, R.L.C., SANTOS, D.C., MELLO, A.C.L., SANTOS, M.V. Cactus (*Opuntia* and *Nopalea*) nutritive value: A

review. **Anim. Feed Sci. Technol.**, 275, 114890, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114890>

DUTRA, I.C., PIRES, A.J.V., SANTOS, B.E.F., SILVA, N.V., PIO, L.P., CRUZ, N.T., CARVALHO-DUTRA, G. Forage cactus (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) f. Cactaceae as an alternative for ruminant feeding. **Braz. J. Sci.**, 3, 33–41, 2024. <https://doi.org/10.14295/bjs.v3i9.617>

FLUCK, A.C., SCHAFHÄUSER, J., ALFAYA, H., COSTA, O.A.D., FARIAS, G.D., SCHEIBLER, R.B., RÖSLER, D.C. Chemical composition of annual ryegrass forage and silage for different drying times and phenological phases. **Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.**, 70, 1979–1987, 2018. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-9981>

FREITAS, W.R., FERREIRA, M.D.A., SILVA, J.L., VÉRAS, A.S.C., BARROS, L.J.A., ALVES, A.M.S.V., ALMEIDA, G.A.P. Sugarcane bagasse as only roughage for crossbred lactating cows in semiarid regions. **Pesq. Agropecu. Bras.**, 53, 386–393, 2018. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018000300014>

GADO, H.M., ELGHANDOUR, M.M.Y., CIPRIANO, M., ODONGO, N.E., SALEM, A.Z.M. Rumen degradation and nutritive utilization of wheat straw, corn stalks and sugarcane bagasse ensiled with multienzymes. **J. Appl. Anim. Res.**, 45, 485–489. 2017. <https://doi.org/10.1080/09712119.2016.1217866>

HALL, M.B. 2000. Calculation of non-structural carbohydrate content of feeds that contain non-protein nitrogen. **Bull. Univ. Fla.**, A25–A32.

HERRERA-ANGULO, A.M., FERREIRA DOS SANTOS, M.V., DA CUNHA, M.V., LEÃO DE MELLO, A.C., FERREIRA, R.L.C., DINIZ, W.P., MORA-LUNA, R.E. Bibliometric analysis on forage cactus production, management and use in animal nutrition: Development, current status and future research. **Chil. J. Agric. Anim. Sci.**, 39, 430–443. 2023. <https://doi.org/10.29393/CHJAA39-38BAAR70038>

LICITRA, G., HERNANDEZ, T.M., VAN SOEST, P.J. Standardization of procedures for nitrogen fractionation of ruminant feeds. **Anim. Feed Sci. Technol.**, 57, 347–358. 1996. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(95\)00837-3](https://doi.org/10.1016/0377-8401(95)00837-3)

LIMA, I.E., MONTEIRO, C.C., MESQUITA, F.T.L., VASCONCELOS, E.Q.L., SOUZA, M.S., SANTOS, D.S., ANDRADE-FERREIRA, M. Cactus cladodes for dairy goats: what is the best fiber source?. **Trop. Anim. Health Prod.** 55, 347. 2023. <https://doi.org/10.1007/s11250-023-03771-5>

LOPES, L.A., ANDRADE-FERREIRA, M., BATISTA, Â.M.V., VALE-MACIEL, M., ANDRADE, R.B., MUNHAME, J.A., CARVALHO, F.F.R. Intake, digestibility, and performance of lambs fed spineless cactus cv. Orelha de Elefante Mexicana. **Asian-Australas. J. Anim. Sci.**, 33, 1284–1292. 2020. <https://doi.org/10.5713/ajas.19.0328>

LUND, P.; WEISBJERG, M. R.; HVELPLUND, T. Digestible NDF is selectively retained in the rumen of dairy cows compared to indigestible NDF. **Anim. Feed Sci. Technol.**, 134, 1-17. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.05.016>

MACIEL, L.P.A.A., CARVALHO, F.F.R., BATISTA, Â.M.V., GUIM, A., VALE-MACIEL, M., CARDOSO, D.B., LIMA-JÚNIOR, D.M. Intake, digestibility and metabolism in sheep fed

increasing levels of spineless cactus (*Nopalea cochenillifera* Salm-Dyck). **Trop. Anim. Health Prod.**, 51, 1717–1723. 2019. <https://doi.org/10.1007/s11250-019-01868-4>

MARTIN, P., BATESON, P.P.G. **Measuring behaviour: an introductory guide**. 3rd ed. Cambridge University Press, Cambridge. 2007. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511810893>

MEDEIROS, I.P.S., GUIDO, S.I., GAMA, M.A.S., SILVA, C.H.M., SIQUEIRA, M.C.B., SILVA, C.S., NETTO, A.J., FELIX, S.B., RABELO, M.N., SANTOS, T.V.M., LEITE, M.A.M., FERREIRA, M.A. Cactus cladodes and sugarcane bagasse can partially replace earless corn silage in diets of lactating dairy cows. **Dairy.**, 5, 33–43. 2024 <https://doi.org/10.3390/dairy5010003>

MERTENS, D. R. Regulation of forage intake. Forage quality, evaluation and utilization. **American Society of Agronomy**. 1994. <https://doi.org/10.2134/1994.foragequality.c11>

MERTENS, D. R. Creating a system for meeting the fiber requirements of dairy cows. **J. Dairy Sci.**, 80(7), 1463-1481, 1997. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(97\)76075-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76075-2).

MERTENS, D. R. Gravimetric determination of amylase-treated neutral detergent fiber in refluxed diets in beakers or crucibles: a collaborative study. **J. AOAC Int.**, 85(6), 1217-1240, 2002. <https://doi.org/10.1093/jaoac/85.6.1217>

MERTENS, D. R., GRANT, R. J. **Digestibility and intake. Forages: the science of grassland agriculture**. 2: 609-631, 2020. <https://doi.org/10.1002/9781119436669.ch34>

MOURA, M.D.S.C., GUIM, A., BATISTA, Â.M.V., VALE-MACIEL, M., CARDOSO, D.B., LIMA-JÚNIOR, D.M., CARVALHO, F.F.R. The inclusion of spineless cactus in the diet of lambs increases carcass fattening. **Meat Sci.**, 160, 107975, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107975>

OLIVEIRA, A.P.D., CUNHA, C.S., PEREIRA, E.S., BIFFANI, S., MEDEIROS, A.N.D., SILVA, A.M.A., MARCONDES, M.I. Meta-analysis of dry matter intake and neutral detergent fiber intake of hair sheep raised in tropical areas. **PLoS ONE.**, 15, e0244201. 2020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0244201>

OLIVEIRA, A.S., DETMANN, E., CAMPOS, J.M.S., PINA, D.S., SOUZA, S.M., COSTA, M.G. Meta-analysis of the impact of neutral detergent fiber on intake, digestibility, and performance of lactating dairy cows. **Rev. Bras. Zootec.**, 40, 1587–1595. 2011. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982011000700026>

RAMALHO, I.O., SANTOS-SOUZA, W., HOMEM, B.G.C., COSTA-SOARES, S., BORRÉ, J.G., RAMOS, J.V.B., SALGADO, L. Nitrogen metabolism in ruminants and the implications of excess dietary nitrogen in pasture-based livestock farming. **Zootec. Top. Atuais Pesqui. Cienc. Digit**, 5, 62–80. 2024. <https://doi.org/10.37885/240316172>

RIBEIRO, J.D.S., MORENO, G.M.B., VIEIRA, M.S.B., SILVA, M.J.M.S., LIMA, C.B., MARIZ, T.M.A., LIMA-JÚNIOR, D.M. Replacement of corn silage with spineless cactus in sheep diet: carcass and meat sensory characteristics. **Acta Sci. Anim. Sci.**, 42, e48832. 2020. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v42i1.48832>

SAMPAIO, C.B., DETMANN, E., LAZZARINI, I., SOUZA, M.A., PAULINO, M.F., VALADARES FILHO, S.C. Rumen dynamics of neutral detergent fiber in cattle fed low-

quality tropical forage and supplemented with nitrogenous compounds. **Rev. Bras. Zootec.**, 38, 560–569. 2009. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009000300023>

SANTOS, K.C., CARVALHO, F.F.R., MAGALHÃES, A.L.R., SILVA, F.J.S., CARDOSO, D.B., SOUSA, D.R., BATISTA, Â.M.V. Can urea associated with alternative carbohydrate sources replace conventional concentrate for lambs? **Livest. Sci.**, 239, 104172. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104172>

SILVA, A.E.M., LIRA, A.T., FERREIRA, M.A., BARROS, L.J.A., MELO, T.T.B., SIQUEIRA, T.Q., COSTA, C.T.F. Bagaço de cana de açúcar como volumoso exclusivo em dietas para ovinos. **Rev. Bras. Saude Prod. Anim**, 16, 118–129. 2015. <https://doi.org/10.1590/S1519-99402015000100013>

SIQUEIRA, M.C., CHAGAS, J.C., MONNERAT, J.P.I., MONTEIRO, C.C., MORA-LUNA, R.E., FELIX, S.B., FERREIRA, M.A. Cactus cladodes (*Opuntia* or *Nopalea*) and by-products of low nutritional value as solutions to forage shortages in semiarid areas. **Animals.**, 12, 3182. 2022. <https://doi.org/10.3390/ani12223182>

SIQUEIRA, T.Q., MONNERAT, J.I.S., CHAGAS, J.C., CONCEIÇÃO, M.G., SIQUEIRA, M.C., VIANA, T.B.L., FERREIRA, M.A. Cactus cladodes associated with urea and sugarcane bagasse: an alternative to conserved feed in semiarid regions. **Trop. Anim. Health Prod.**, 51, 1975–1980. 2019. <https://doi.org/10.1007/s11250-019-01895-1>

VAN SOEST, P.J. Symposium on factors influencing the voluntary intake of herbage by ruminants: voluntary intake in relation to chemical composition and digestibility. **J. Anim. Sci.**, 24, 834–843. 1965. <https://doi.org/10.2527/jas1965.243834x>

VAN SOEST, P.J. **Nutritional ecology of the ruminant. 2nd ed.** Cornell University Press, Ithaca, NY, USA. 1994.

VAN SOEST, P.J., ROBERTSON, J.B., LEWIS, B.A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. **J. Dairy Sci.**, 74, 3583–3597. 1991. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)

WALDO, D.R., SMITH, L.W., COX, E.L. Model of cellulose disappearance from the rumen. **J. Dairy Sci.**, 55, 125–129. 1972. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(72\)85442-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(72)85442-0)

WEISS, W.P., CONRAD, H.R., ST. PIERRE, N.R. A theoretically based model for predicting total digestible nutrient values of forages and concentrates. **Anim. Feed Sci. Technol.**, 39, 95–110. 1992. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(92\)90034-4](https://doi.org/10.1016/0377-8401(92)90034-4)

## CAPÍTULO 2

---

**A substituição de silagem de milho por palma forrageira (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw) mais bagaço de cana de açúcar e ureia reduz a eficiência de utilização de compostos nitrogenados e a síntese de proteína microbiana no rúmen**

**Resumo**

Objetivou-se avaliar o efeito da substituição da silagem de milho por palma forrageira (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw) mais bagaço de cana de açúcar e ureia, em dietas contendo teores semelhantes de fibra em detergente neutro (FDN) sobre a matéria seca potencialmente digestível (MSPd) e nutrientes digestíveis, pH ruminal, eficiência de utilização de compostos nitrogenados e síntese de proteína microbiana em ovinos. Cinco níveis de substituição (0, 25, 50, 75 e 100%) foram testados como tratamentos experimentais, utilizando cinco ovinos fistulados no rúmen (peso corporal médio de  $37,5 \pm 5,57$  kg) distribuídos em um delineamento em quadrado latino  $5 \times 5$ . Como resultados, o consumo de MSPd diminuiu linearmente com o aumento dos níveis de substituição ( $P < 0,01$ ). Já o pH ruminal não foi afetado pela substituição ( $6,2 \pm 0,04$ ). O nitrogênio amoniacal ruminal (NAR) aumentou linearmente de acordo com os níveis de substituição ( $15,10$ – $19,08$  mg/dL;  $P < 0,034$ ), com interação entre os níveis e o tempo da coleta, apresentando picos de NAR mais elevados à medida que o nível de substituição aumentava ( $19,00$ – $27,12$  mg/dL;  $P < 0,01$ ). Por outro lado, a consumo de nitrogênio, o nitrogênio fecal, o nitrogênio retido (g/dia e em porcentagem do consumo) e a síntese de proteína microbiana diminuíram com o aumento dos níveis de substituição ( $P < 0,04$ ,  $P < 0,02$ ,  $P < 0,03$  e  $P < 0,01$ , respectivamente). Em contraste, o nitrogênio urinário em porcentagem do consumo e o nitrogênio ureico sanguíneo aumentaram linearmente ( $P < 0,03$  e  $P < 0,01$ , respectivamente). Considerando os potenciais efeitos negativos do aumento da fibra em detergente neutro indigestível (FDNi) da dieta na eficiência de utilização de compostos nitrogenados e na síntese de proteína microbiana no rúmen, recomenda-se que a formulação da dieta considere não apenas o teor total de FDN, mas também o teor de FDNi e/ou o teor de MSPd. Essa abordagem ajuda a prevenir potenciais reduções na disponibilidade de energia fermentável no rúmen, particularmente quando o bagaço de cana de açúcar é usado como principal fonte de FDN. Como conclusão, não é recomendado substituir a silagem de milho por palma forrageira, bagaço de cana de açúcar e ureia em dietas com alto teor de forragem, formuladas principalmente com base no teor de FDN, pois essa estratégia reduz o consumo de MSPd, diminui a eficiência da utilização de compostos nitrogenados e limita a síntese de proteína microbiana no rúmen.

**Palavras-chave:** Cactácea; Fibra; Nitrogênio não proteico; Proteína microbiana; Semiárido; Subproduto.

**Abstract**

The objective of this study was to evaluate the effect of replacing corn silage with cladodes cactus (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw) plus sugarcane bagasse and urea in diets with similar neutral detergent fiber (NDF) contents on potentially digestible dry matter (pdDM) and digestible nutrients intake, ruminal pH, efficiency of nitrogen compound utilization, and microbial protein synthesis in sheep. Five substitution levels (0, 25, 50, 75, and 100%) were tested as experimental treatments, using five rumen-fistulated sheep (average body weight of  $37.5 \pm 5.57$  kg) distributed in a  $5 \times 5$  Latin square design. The intake of pdDM decreased linearly with increasing levels of substitution ( $P < 0.01$ ). Ruminal pH was not affected by the replacement ( $6.2 \pm 0.04$ ). Ruminal ammonia nitrogen (RAN) increased linearly according to the substitution levels (15.10–19.08 mg/dL;  $P < 0.034$ ), with an interaction between levels and collection time, showing higher RAN peaks as the replacement level increased (19.00–27.12 mg/dL;  $P < 0.01$ ). Conversely, nitrogen intake, fecal nitrogen, retained nitrogen (g/day and as a percentage of intake), and microbial protein synthesis decreased with increasing substitution levels ( $P < 0.04$ ,  $P < 0.02$ ,  $P < 0.03$  and  $P < 0.01$ , respectively). In contrast, urinary nitrogen as a percentage of intake and blood urea nitrogen increased linearly ( $P < 0.03$  and  $P < 0.01$ , respectively). Considering the potential negative effects of increasing dietary indigestible neutral detergent fiber (iNDF) on the efficiency of nitrogen compound utilization and microbial protein synthesis in the rumen, it is recommended that diet formulation consider not only the total NDF content but also the iNDF fraction and/or the pdDM content. This approach helps prevent potential reductions in fermentable energy availability in the rumen, particularly when sugarcane bagasse is used as the main source of NDF. In conclusion, it is not recommended to replace corn silage with cladodes cactus plus sugarcane bagasse and urea in high-forage diets formulated primarily based on NDF content, as this strategy reduces the intake of potentially digestible dry matter, decreases the efficiency of nitrogen compound utilization, and limits microbial protein synthesis in the rumen.

**Keywords:** Cactaceae; Fiber; Non protein nitrogen; Semiarid region; By-product.

## 1. INTRODUÇÃO

A palma forrageira (*Opuntia* spp.) apresenta alta tolerância à seca e uma composição química caracterizada por elevado teor de água e alta concentração de carboidratos não fibrosos (CNF). Nesse contexto, a palma forrageira tem sido amplamente cultivado e incorporado à dieta de ruminantes em regiões semiáridas — especialmente durante períodos de baixa disponibilidade de forragem, tanto em quantidade quanto em qualidade — com o objetivo de substituir parcialmente ou totalmente as forragens tradicionais (como silagens, fenos e forragens frescas) (Muhamed et al., 2021; Sánchez et al., 2022; Lima et al., 2023).

No entanto, apesar de seu reconhecido potencial como fonte de energia e água, a palma forrageira apresenta baixo teor de fibra em detergente neutro (FDN), característica que pode comprometer a atividade mastigatória, a motilidade ruminal e a estabilidade do ambiente fermentativo quando utilizado como único volumoso na dieta. Portanto, sua associação com fontes de fibra estrutural é essencial para garantir a estimulação adequada da ruminação, a manutenção do pH ruminal e o funcionamento ruminal ideal (Pastorelli et al., 2022; Dutra et al., 2024).

Nesse contexto, em diferentes partes do mundo — particularmente em zonas áridas e semiáridas da África, Ásia e América Latina — a associação da palma forrageira com ingredientes fibrosos de baixa degradabilidade, como palha de trigo, palha de cevada, palha de aveia e bagaço de cana-de-açúcar, tem sido adotada como estratégia nutricional (Ben Salem et al., 2004; De Waal, Combrinck e Fouche, 2015; Pastorelli et al., 2022; Gebeyew et al., 2025). Essa combinação visa corrigir o déficit de fibra fisicamente efetiva da palma, permitindo sua inclusão em maiores proporções na dieta, além de promover o uso de subprodutos agrícolas disponíveis localmente.

Por exemplo, o uso da palma forrageira ‘Orelha de elefante mexicana’ (OEM) (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw) em associação com bagaço de cana de açúcar e ureia, como potenciais substitutos para diferentes tipos de forragem, tem apresentado resultados promissores, particularmente pelo aumento da ingestão e digestibilidade de matéria seca (MS), matéria orgânica (MO) e CNF (Campelo-Lima et al., 2022; Siqueira et al., 2022; Medeiros et al., 2024). No entanto, nesses estudos, os teores de FDN das dietas experimentais diferem entre si, diminuindo devido à inclusão da palma forrageira. Assim, comparações são frequentemente feitas entre dietas com níveis de FDN substancialmente diferentes (Siqueira et al., 2019; Siqueira et al., 2022; Medeiros et al., 2024).

Contudo, o teor de FDN em dietas de ruminantes pode ser responsável por limitar a ingestão voluntária de MS e, conseqüentemente, alterar a dinâmica digestiva geral da dieta. Isso afeta diretamente o ponto de inflexão do pH ruminal, a disponibilidade de amônia ruminal, a síntese de proteína microbiana e a eficiência de utilização dos compostos nitrogenados da dieta (Rufino et al., 2016; Shi et al., 2023). Considerando esse efeito, pode ser aconselhável padronizar o teor de FDN entre as dietas experimentais para evitar vieses causados por diferenças na ingestão e digestão associadas ao teor de fibra, em vez do próprio fator testado.

Nesse contexto, hipotetizou-se que a substituição da silagem de milho por palma forrageira OEM, combinada com bagaço de cana de açúcar e ureia como fonte de volumoso, em dietas com níveis semelhantes de FDN, não alteraria os parâmetros ruminais de ovinos. Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito dessa substituição sobre o consumo de matéria seca potencialmente digestível (MSpd) e nutrientes digestíveis, o pH ruminal, a eficiência de utilização de compostos nitrogenados e a síntese de proteína microbiana no rúmen.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi conduzido no confinamento do setor de caprinos e ovinos do Departamento de Zootecnia (DZ) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), no Brasil. As análises dos alimentos, sobras e fezes foram realizadas no Laboratório de Nutrição Animal da mesma instituição. O manejo dos animais seguiu as diretrizes estabelecidas pelo Comitê de Ética no Uso de Animais (CEUA) da UFRPE (protocolo nº 8811290322, ID 001020).

### **2.1. Animais, manejo e delineamento experimental**

Foram utilizados cinco ovinos machos da raça Santa Inês fistulados e canulados no rúmen, com peso corporal médio de 37,5 kg e desvio padrão de 5,57 kg. Os animais foram distribuídos em um delineamento quadrado latino  $5 \times 5$ , com cinco animais, cinco tratamentos e cinco períodos experimentais. Cada período teve duração de 22 dias, sendo 14 dias dedicados à adaptação às dietas e 8 dias para medições, amostragem e coleta de dados. Antes do início do experimento, os animais passaram por um período de adaptação de 10 dias às instalações e rotinas de manejo.

A dieta foi oferecida aos animais *ad libitum*, permitindo-se uma sobra de 10% de MS. A alimentação ocorreu duas vezes ao dia, às 8h e às 16h, com água limpa e fresca sempre disponível. A dieta oferecida e as sobras foram pesadas diariamente para ajustar a quantidade fornecida com base no consumo de MS do dia anterior, ao longo de todos os períodos experimentais.

## 2.2. Ingredientes e formulação de dietas

A composição química dos ingredientes utilizados na formulação das dietas, bem como suas proporções e a composição química das dietas experimentais, são apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

**Tabela 1.** Composição química dos ingredientes utilizados nas dietas experimentais.

Itens	Silagem de milho	Palma forrageira (OEM)	Bagaço de cana de açúcar	Farelo de soja	Milho moído
<i>Composição química, g/kg MS</i>					
Matéria seca <sup>1</sup>	288,3	106,8	539,7	878,4	864,4
Cinzas	58,8	108,0	57,2	73,3	15,1
Proteína bruta	61,0	55,0	18,7	493,4	102,7
FDNcp	591,3	252,3	850,5	146,0	130,0
FDNi	168,8	112,8	447,4	17,3	16,1
CNF	257,9	566,3	62,0	268,2	712,1

<sup>1</sup> g/kg de matéria natural; OEM = “Orelha de Elefante mexicana” (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw); FDNcp = Fibra em detergente neutro corrigido para cinzas e proteína; FDNi Fibra em detergente neutro indigestível; CNF = Carboidratos não fibrosos.

**Tabela 2.** Proporções dos ingredientes e composição química das dietas experimentais.

Itens	<i>Níveis de substituição (%)</i>				
	0	25	50	75	100
<i>Ingredientes, g/kg MS</i>					
Silagem de milho	697,5	523,0	348,6	174,2	0,0
Palma OEM	0,0	74,8	149,5	224,2	299,0
Bagaço de cana de açúcar	0,0	97,7	195,4	293,1	390,5
Milho moído	132,0	132,0	132,0	132,0	132,0
Farelo de soja	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0
Ureia/Sulfato de amônia <sup>1</sup>	0,0	2,0	4,0	6,0	8,0
Sal comum	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1
Suplemento mineral <sup>2</sup>	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4
<i>Composição química, g/kg MS</i>					
Matéria seca <sup>3</sup>	363,0	332,0	299,2	274,6	253,4
Matéria orgânica	925,5	922,0	918,5	915,1	911,6
Proteína bruta	130,1	130,7	131,3	131,9	132,5
FDNcp	451,5	450,3	449,1	447,9	446,6
FDNpd	329,1	305,2	281,3	257,4	233,4
FDNi	122,4	145,1	167,8	190,5	213,1
CNF	316,3	321,1	325,7	330,4	335,2

<sup>1</sup> Proporção de ureia para sulfato de amônio (SA): 9 partes de ureia para 1 parte de sulfato de amônio; <sup>2</sup> Composição química do suplemento mineral: Ca – 120 g/kg, P – 87 g/kg, S – 18 g/kg, Mg – 1300 mg/kg, Na – 147 g/kg, Co – 40 mg/kg, Cu – 590 mg/kg, I – 80 mg/kg, Se – 15 mg/kg, Zn – 3800 mg/kg, F (max.) – 870 mg/kg; <sup>3</sup> g/kg de matéria natural; Palma OEM = Orelha de elefante mexicana (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw); FDNcp = Fibra em detergente neutro corrigido para cinzas e proteína; FDNpd = Fibra em detergente neutro potencialmente digestível; FDNi = Fibra em detergente neutro indigestível; CNF = Carboidratos não fibrosos.

As dietas experimentais foram formuladas com níveis de substituição da silagem de milho por palma forrageira Orelha de elefante mexicana (OEM) (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw), combinada ao bagaço de cana de açúcar e ureia, em 0, 25, 50, 75 e 100% com base na MS.

Além dessas fontes de forragem, as dietas incluíram ingredientes concentrados (milho moído e farelo de soja), sal comum e um mix mineral comercial (Ovinofós®, Tortuga/DSM, São Paulo, Brasil), mantendo uma relação volumoso:concentrado (V:C) de 70:30.

A formulação das dietas foram planejadas para manter níveis fixados de FDN (fibra em detergente neutro) em todos os tratamentos (0%, 25%, 50%, 75% e 100% de substituição), respeitando a proporção entre palma e bagaço de cana-de-açúcar. Os cladódeos de palma forrageira foram colhidos manualmente e triturados em um picador de forragem. Antes de serem oferecidos aos animais, os cladódeos de palma processados foram homogeneizados manualmente com os demais ingredientes da dieta.

### **2.3. Amostragem e coleta de dados**

A dieta e as sobras alimentares foram coletados do 15º ao 22º dia de cada período experimental. As amostras diárias foram armazenadas em freezer (-4°C) para posteriores análises químicas em laboratório. Especificamente, no 16º dia de cada período experimental, o fluido ruminal foi coletado antes da alimentação (0 h) e 2, 4 e 6 horas após a refeição da manhã. O pH ruminal foi medido imediatamente após a coleta utilizando um potenciômetro digital (Kasavi®, Modelo K39-0014P, Taiwan). O fluido ruminal foi acidificado com 2 mL de ácido clorídrico (6N) e subamostras (40 mL) foram congeladas a -20°C para posterior determinação da concentração de nitrogênio amoniacal ruminal (NAR). A determinação do NAR foi realizada de acordo com o método descrito por Fenner (1965) e adaptado por Detmann et al. (2021), e os valores resultantes foram corrigidos utilizando a equação proposta por Souza et al. (2013).

Do 17º ao 19º dia de cada período experimental, foi realizada a coleta total de fezes para estimar a matéria seca digestível (MSd), os nutrientes digestíveis totais (NDT) e a excreção de nitrogênio fecal (N fecal). As fezes foram coletadas utilizando sacos coletores fixados aos animais. As fezes foram pesadas e quantificadas ao longo de um período de 24 horas. Do total de fezes produzidas em cada dia, uma subamostra de aproximadamente 20% foi retida para as análises.

Durante o mesmo período (do 17º ao 19º dia), a coleta total de urina também foi realizada ao longo de 24 horas, utilizando funis de coleta fixados à região genital dos animais para direcionar a urina para um recipiente de plástico. O pH da urina foi medido a cada 6 horas e mantido abaixo de 3 para evitar a degradação bacteriana das bases purinas urinárias e a precipitação de ácido úrico. Ao final de cada período de coleta de 24 horas, ao longo dos três dias de coleta, o volume total de urina foi medido e uma amostra composta foi preparada a partir dessas coletas diárias. Uma alíquota equivalente a 10% do volume total de cada período

foi obtida e armazenada a -20 °C para análises subsequentes de ácido úrico, alantoína e balanço de nitrogênio.

No 21º dia de cada período experimental, amostras de sangue foram coletadas dos animais quatro horas após a alimentação matinal, por meio de punção da veia jugular, utilizando tubos Vacutainer® contendo anticoagulante (heparina). As amostras foram imediatamente centrifugadas (2500 rpm por 10 minutos) para obtenção do soro para a determinação da concentração de ureia no sangue (mg/dL), utilizando um analisador LAB Max 250® e kits comerciais LAB Test®.

#### **2.4. Análise química e cálculos experimentais**

Os ingredientes, sobras e fezes obtidas durante o período de coleta foram descongeladas e pré-secas em estufa de ar forçado a 55 °C por 72 horas ou até atingirem peso constante. Uma amostra composta foi então preparada para cada animal, tratamento e período experimental. Essas amostras compostas foram processadas em um moinho de facas (Marconi®, modelo MA 340, Brasil), utilizando peneiras com poros de 1 mm e 2 mm. A peneira com poros de 2 mm foi utilizada exclusivamente para a estimativa de FDN<sub>i</sub>, enquanto a peneira de 1 mm foi utilizada para todas as demais análises químicas.

As determinações de MS (método AOAC 934.01), cinzas (CA; método AOAC 942.05), proteína bruta (PB; método AOAC 954.01) e extrato etéreo (EE; método AOAC 920.39) foram realizadas de acordo com a AOAC (2023). O teor de FDN foi determinado seguindo Van Soest et al. (1991), sem o uso de sulfito de sódio, com a adição da enzima  $\alpha$ -amilase termoestável, conforme recomendado por Mertens (2002). O resíduo de FDN foi corrigido para cinzas (CIDN) e proteína insolúvel em fibra detergente neutra (PIDN), de acordo com as metodologias descritas por Mertens (2002) e Licitra et al. (1996), respectivamente.

Posteriormente, o FDN<sub>cp</sub> foi obtido utilizando a equação proposta por Detmann e Valadares Filho (2010):  $FDN_{cp} \text{ (g/kg MS)} = FDN - (CIDN + PIDN)$ . Para a estimativa do FDN<sub>i</sub>, as amostras previamente secas em estufa e moídas em peneira de 2 mm foram colocadas em sacos de tecido não tecido (TNT, 100 g/m<sup>2</sup>), mantendo uma relação amostra/superfície de até 20 mg MS/cm<sup>2</sup>. Os sacos foram incubados no rúmen de um bovino fistulado por 288 h. Sacos de malha de náilon foram utilizados para manter os sacos de amostra dentro do rúmen, permitindo sua completa recuperação ao final do período de incubação. Após a incubação, os sacos foram enxaguados em água corrente até a completa remoção dos resíduos solúveis. Em seguida, foram secos em estufa a 55–60 °C até peso constante e submetidos à extração com detergente neutro, de acordo com o procedimento de Van Soest et al. (1991) (sem o uso de sulfito de sódio). O valor de FDN<sub>i</sub> foi expresso como a porcentagem do resíduo restante em

relação à MS inicial, representando a fração de FDN que resiste à degradação microbiana no rúmen.

A estimativa da FDN<sub>pd</sub> de cada componente da dieta foi realizada utilizando a seguinte equação:  $FDN_{pd} = FDN_{cp} - FDN_i$ . Para a quantificação de CNF em dietas contendo ureia (25%, 50%, 75% e 100% de substituição), utilizou-se a equação sugerida por Mertens (1997), adaptada por Hall (2000) e descrita por Detmann et al. (2021):  $CNF (\% MS) = 100 - CA - EE - FDN_{cp} - (PB - UCP + U)$ . Onde: PBU = proteína bruta da ureia; U = quantidade de ureia. Para a quantificação de CNF na dieta sem inclusão de ureia (0% de substituição), utilizou-se a equação proposta por Mertens (1997), com modificações de Detmann e Valadares Filho (2010), onde:  $CNF (\% MS) = 100 - CA - EE - FDN_{cp} - PB$ . A estimativa da MS<sub>pd</sub>, matéria orgânica digestível (M<sub>Od</sub>), proteína bruta digestível (PB<sub>d</sub>), fibra em detergente neutro digestível (FDN<sub>d</sub>), carboidratos totais digestíveis (TC<sub>d</sub>) e carboidrato não fibroso digestível (CNF<sub>d</sub>) foi realizada multiplicando o consumo de MS e os respectivos nutrientes pelos seus coeficientes de digestibilidade aparente. Para a estimativa do consumo de NDT, foi adotada a equação descrita por Weiss et al (1992), adaptada da seguinte forma:  $NDT (g/kg) = (PB_d + FDN_{cpd} + CNF_d + (EE_d \times 2,25))$ . Onde: d = digestível.

A concentração de alantoína foi determinada de acordo com a metodologia descrita por Chen e Gomes (1992). A concentração de ácido úrico foi medida utilizando um analisador LAB Max 250® e um kit comercial específico (LAB Test®) para determinação de ácido úrico em amostras de urina. A xantina e a hipoxantina foram estimadas como 7,5% do total de derivados de purina (DDP) excretados, com base na contribuição proporcional esperada desses metabólitos em ovinos e caprinos (5 a 10% do total de DDP) (Chen e Gomes, 1992; BR-Caprinos e Ovinos, 2024).

A absorção de purinas microbianas (mmol/dia) e o fluxo intestinal de compostos nitrogenados microbianos (g/dia) foram calculados utilizando o modelo matemático proposto por Chen e Gomes (1992). A excreção urinária total de derivados de purina foi obtida pela soma da alantoína, do ácido úrico e dos valores estimados de xantina + hipoxantina. A síntese de proteína microbiana (SPM; g/dia) foi determinada multiplicando-se as purinas microbianas absorvidas pela constante 6,25. A eficiência da síntese de proteína microbiana foi calculada dividindo-se a SPM total pelo consumo de NDT, expressa em SPM (g SPM/kg NDT).

O nitrogênio total nos ingredientes, sobras, fezes e urina foi determinado pelo método de Kjeldahl (AOAC 954.01; AOAC, 2023). Para o balanço de nitrogênio, o nitrogênio digerido (g/dia) foi calculado como a diferença entre a ingestão total de nitrogênio (ingestão de N) e a excreção fecal de nitrogênio (N fecal). O nitrogênio retido (g/dia) foi calculado como a

diferença entre a ingestão de N e a soma do N fecal e do N urinário. As proporções de nitrogênio digerido e retido em relação à ingestão (% da ingestão) foram calculadas expressando-se os respectivos valores de nitrogênio digerido e retido como porcentagem da ingestão total de nitrogênio.

### 2.5. Métodos estatísticos

O modelo estatístico utilizado foi:  $Y_{ijkl} = \mu + S_i + A_j + P_k + \epsilon_{l(ijk)}$ . Onde:  $Y_{ijk}$  = variável resposta medida no animal  $j$ , durante o período  $k$ , submetido ao tratamento  $i$ ;  $\mu$  = média geral;  $S_i$  = efeito do tratamento  $i$  (efeito fixo);  $A_j$  = efeito do animal  $j$  (efeito aleatório);  $P_k$  = efeito do período experimental  $k$  (efeito aleatório); e  $\epsilon_{l(ijk)}$  = erro aleatório não observável, assumido como normalmente distribuído. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software Statistical Analysis System (SAS versão 9.4 M8).

Foram realizadas análises de variância e regressão, exceto para o pH ruminal e o RAN, para os quais o tempo de amostragem foi considerado como uma medida repetida. O comportamento dessas variáveis ao longo do tempo foi analisado utilizando o procedimento PROC MIXED. Polinômios ortogonais foram ajustados aos níveis quantitativos do tratamento para avaliar a presença de tendências lineares e quadráticas. A análise foi realizada utilizando o procedimento PROC GLM do SAS, incluindo os termos lineares e quadráticos no modelo. O nível de significância de 5% foi adotado para o erro do Tipo I.

## 3. RESULTADOS

O consumo diário de MSpd, MSd, MOd, PBd, FDNd, TCd e NDT dos animais diminuiu linearmente com o aumento dos níveis de substituição. Por outro lado, não foi observado efeito da substituição sobre o consumo diário de CNFd pelos animais (Tabela 3).

**Tabela 3.** Valores médios de ingestão de matéria seca e nutrientes digestíveis em ovinos.

Itens	Níveis de substituição (%)					EPM	P-valor		
	0	25	50	75	100		L	Q	
	<i>Consumo, g/dia</i>								
MSpd	1078,9	915,3	786,2	757,6	741,9	41,2	< 0,01	0,259	
MSd	801,4	650,8	622,4	545,4	543,6	34,7	< 0,01	0,534	
MOd	770,1	625,5	545,4	489,3	483,1	34,1	0,012	0,406	
PBd	118,3	115,4	95,6	94,3	95,5	4,4	0,044	0,737	
FDNd	292,3	236,7	213,0	170,6	157,3	10,9	< 0,01	0,484	
CNFd	326,9	289,6	299,3	279,8	272,1	12,6	0,196	0,780	
CTd	619,3	526,0	512,4	450,5	429,5	23,3	0,011	0,638	
NDT	804,1	727,4	625,9	615,9	554,0	76,6	0,012	0,688	

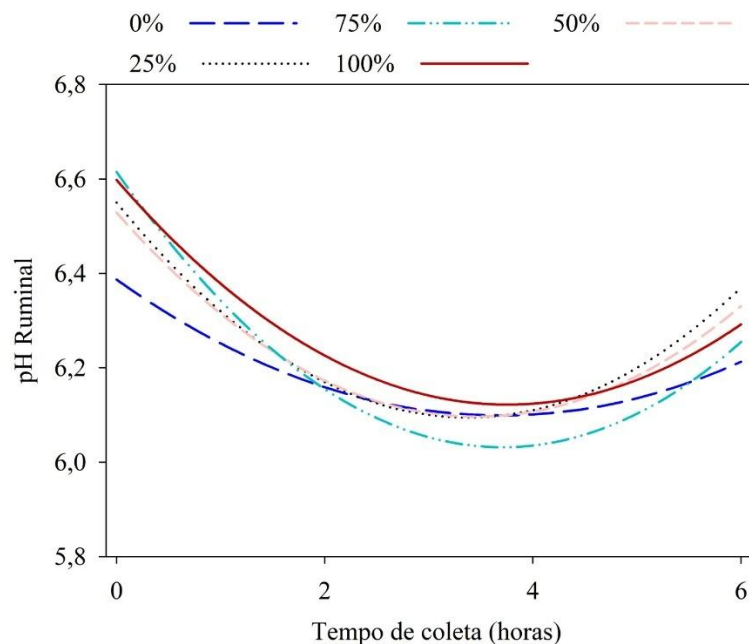
MSpd = matéria seca potencialmente digestível; MSd = matéria seca digestível; MOd = matéria orgânica digestível; PBd = proteína bruta digestível; FDNd = fibra em detergente neutro digestível; CNFd = carboidrato não fibroso digestível; CTd = carboidratos totais digestível; NDT = nutrientes digestíveis totais; EPM = erro padrão da média; L = efeito linear; Q = efeito quadrático.

Não houve interação entre os níveis de substituição e o tempo de coleta para o pH ruminal (Tabela 4 e Gráfico 1). O pH ruminal não foi influenciado pelos níveis de substituição (pH médio de  $6,2 + 0,04$ ). Observou-se uma resposta quadrática em função do tempo de coleta, sendo observado um valor mínimo de 6,11 (pH), às 3,73 horas após a alimentação dos animais.

**Tabela 4** Fluido ruminal, balanço de nitrogênio, nitrogênio ureico sanguíneo (BUN), síntese de proteína microbiana e eficiência no rúmen.

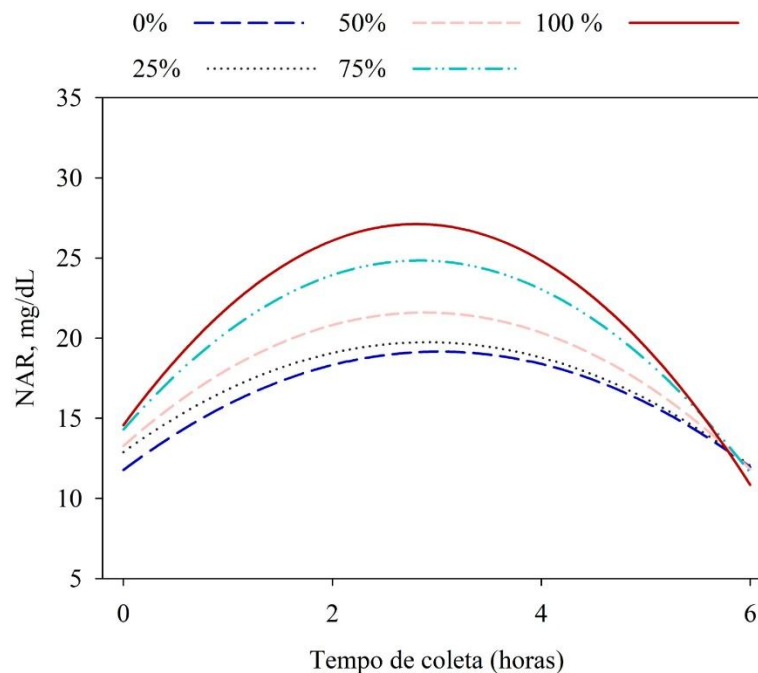
Parâmetros	Níveis de substituição (%)					EPM	P-valor					
	0	25	50	75	100		Níveis		Tempo de coleta		Interações	
							L	Q	L	Q		
pH	6,22	6,30	6,29	6,27	6,31	0,06	0,153	0,912	<0,01	<0,01	0,411	
NAR (mg/dL)	15,10	15,69	16,56	18,22	19,08	1,09	0,034	0,682	<0,01	<0,01	<0,01	
N consumo (g/dia)	26,90	25,23	23,27	21,97	21,04	1,01	0,048	0,808	-	-	-	
N fezes (g/dia)	7,57	6,72	6,14	6,21	5,82	0,23	0,022	0,429	-	-	-	
N urina (g/dia)	6,85	6,43	6,84	6,88	6,44	0,38	0,896	0,902	-	-	-	
N urina <sup>1</sup>	25,45	25,47	29,39	31,31	30,63	0,92	0,034	0,898	-	-	-	
N retido (g/dia)	12,48	12,09	10,29	8,88	8,77	0,69	0,039	0,870	-	-	-	
N retido <sup>1</sup>	46,39	47,91	44,21	40,42	41,71	1,39	0,034	0,936	-	-	-	
NUS (mg/dL)	13,86	14,25	17,12	18,11	19,49	0,78	0,012	0,989	-	-	-	
SPM (g/dia)	57,22	53,15	45,56	44,37	43,05	1,76	< 0,01	0,429	-	-	-	
g SPM/kg NDT	71,96	74,08	77,14	78,45	78,86	0,97	0,014	0,539	-	-	-	

<sup>1</sup> porcentagem do consumo. NAR = Nitrogênio amoniacal ruminal; NUS = nitrogênio ureico no sangue; SPM = Síntese de proteína microbiana; N = Nitrogênio; g SPM/kg NDT = Eficiência da síntese de proteína microbiana ruminal por kg de nutrientes digestíveis totais consumida; EPM = erro padrão da média; L = efeito linear; Q = efeito quadrático.



**Gráfico 1.** Resposta do pH ruminal ao longo do tempo (0–6 h após a alimentação) em ovinos alimentados com dietas contendo diferentes níveis de substituição de silagem de milho por palma forrageira e bagaço de cana de açúcar mais ureia (0, 25, 50, 75 e 100%). As linhas representam as curvas de regressão ajustadas para cada nível de substituição.

O NAR aumentou em função dos níveis de substituição (15,10—19,08 mg/dL), observando-se também interação entre os níveis e o tempo de coleta (Tabela 4 e Gráfico 2). O maior pico de NAR foi observada para o nível 100% (27,12 mg/dL, às 2,80 h após a alimentação), seguido dos níveis 75% (24,84 mg/dL, as 2,83 h), 50% (21,65 mg/dL, as 2,88 h), 25% (20,75 mg/dL, as 2,91 h) e 0% (19,00 mg/dL, as 3,02 h), respectivamente.

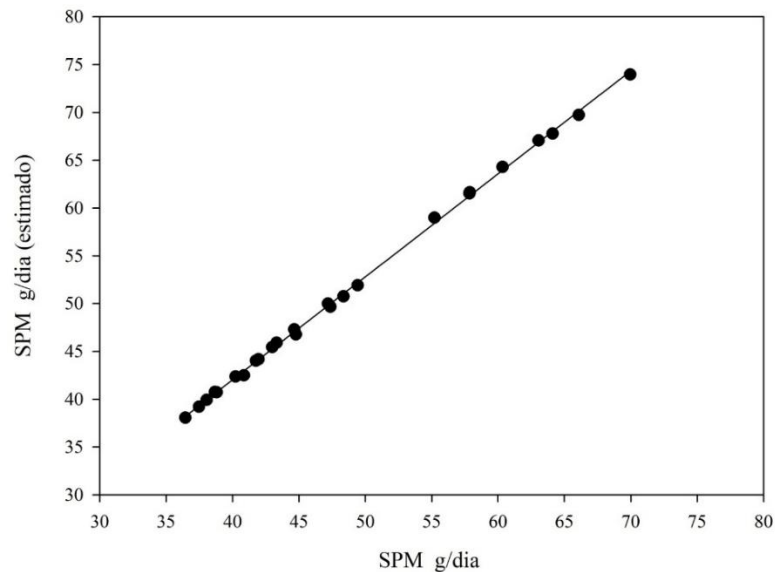


**Gráfico 2.** Concentração de nitrogênio amoniacal ruminal (NAR, mg/dL) ao longo do tempo (0–6 h após a alimentação) em ovinos alimentados com dietas contendo diferentes níveis de substituição de silagem de milho por palma forrageira e bagaço de cana de açúcar mais ureia (0, 25, 50, 75 e 100%). As linhas representam as curvas de regressão ajustadas para cada nível de substituição.

O N ingerido (26,90 – 21,04 g/dia), N nas fezes (7,57 – 5,82 g/dia) e N retido em g/dia e em porcentagem do ingerido (12,48 – 8,77 g/dia e 46,39– 41,71% ingerido, respectivamente) reduziram linearmente com a substituição. Por outro lado, o N urinário em porcentagem do ingerido e o nitrogênio ureico no sangue (NUS) aumentaram linearmente (25,45 – 31,31 % do ingerido e 13,86– 19,49 mg/dL, respectivamente). Já o N urinário g/dia não foi influenciado pelos níveis testados (Tabela 4)

Recentemente Santos et al. (2021) desenvolveram uma equação para estimativa da síntese de proteína, a partir do consumo de NDT para ovinos ( $PB_{microbiana}$  em g/dia =  $12,73 + 59,29 * CNDT$  (g/dia)). Ao compararmos os dados observados (X) com aqueles estimados pela equação (Y), verificou-se que a equação estimou com precisão a produção de proteína microbiana verificada no presente estudo (Gráfico 3). Dito isto, a síntese de proteína microbiana ( $Pbmic$  em g/dia) neste estudo, diminuiu (57,22 – 43,05 g/dia), enquanto a eficiência da síntese

de proteína microbiana (g P<sub>mic</sub>/kg NDT) aumentou linearmente com o aumento dos níveis de substituição (71,96– 78,86 g P<sub>mic</sub>/kg NDT) (Tabela 1).



**Gráfico 3.** Relação entre os valores observados e estimados (usando a equação desenvolvida por Santos et al. (2021)) da síntese de proteína microbiana (SPM, g/dia) em ovinos. A linha contínua representa o ajuste de regressão linear, indicando um alto grau de concordância entre os valores observados e previstos ( $Y = 1,0773x - 1,0572$ ;  $R^2 = 0,9993$ ).

#### 4. DISCUSSÃO

Apesar das dietas apresentarem teores semelhantes de FDN<sub>cp</sub>, os níveis de substituição alteraram a composição desse constituinte. Observou-se um aumento na fração FDN<sub>i</sub>, variando de 122,4 a 213,1 g/kg de MS, acompanhado de uma redução concomitante na FDN<sub>pd</sub>, que diminuiu de 329,1 para 233,4 g/kg de MS (Tabela 2). Esse efeito pode ser atribuído, sobretudo, à inclusão crescente do bagaço de cana de açúcar na dieta, volumoso que apresenta elevado teor de FDN<sub>i</sub> (447,4 g/kg de MS) e, portanto, contribui diretamente para o aumento da fração indigestível na FDN<sub>cp</sub> e na dieta como um todo.

Conforme descrito por Van Soest (1994) e Mertens (1997), o aumento da fração FDN<sub>i</sub> reduz a degradabilidade ruminal da fibra e prolonga o tempo de retenção do conteúdo no rúmen, podendo levar a limitação física do consumo e, conseqüentemente, à redução da ingestão de nutrientes potencialmente digestíveis. Nesse sentido, o incremento da FDN<sub>i</sub> observada nas dietas resultou em redução linear no consumo de MS<sub>pd</sub>, MS<sub>d</sub>, MO<sub>d</sub>, PB<sub>d</sub>, FDN<sub>d</sub>, CT<sub>d</sub> e NDT (Tabela 3). Essa resposta reflete a menor disponibilidade de substrato fermentável no rúmen, limitando o aporte energético e o consumo de nutrientes efetivamente aproveitáveis pelos animais.

Em contrapartida, não foi observado diferença significativa no consumo de CNF<sub>d</sub>. Esse resultado está relacionado ao incremento na concentração de CNF da dieta (316,3–335,2 g/kg

de MS), decorrente prioritariamente da inclusão crescente da palma forrageira OEM (ingrediente com elevado teor de CNF (566,3 g/kg de MS)), uma vez que o bagaço de cana apresenta baixa concentração desse constituinte (62,0 g/kg de MS), e a relação volumoso:concentrado foi mantida constante (Tabelas 1 e 2). Além disso o CNF é um constituinte altamente digestível independentemente da digestão dos outros constituintes (como a FDN<sub>cp</sub>).

Os níveis de substituições não alteraram o pH do fluido ruminal dos ovinos (média de  $6,3 \pm 0,06$  DP; Tabela 4), mantendo-se na faixa ideal para a atividade de bactérias celulolíticas (6,2–7,0) (Siqueira et al., 2022). Esse comportamento pode ser parcialmente atribuído à similaridade no teor de FDN<sub>cp</sub> e, possivelmente, de FDN fisicamente efetiva das dietas — oriunda principalmente da silagem de milho e do bagaço de cana de açúcar —, a qual promoveu estímulo equivalente à mastigação e, conseqüentemente, à salivação. Esse mecanismo de tamponamento ruminal aliado a pequena participação de concentrado nas dietas (em torno de 30%) possivelmente foi suficiente para neutralizar os ácidos produzidos durante a fermentação da matéria orgânica no rúmen, mantendo o pH ruminal estável entre os diferentes níveis de substituição (Gráfico 1) (Shi et al., 2023; Zhang et al., 2025).

Somado a isso, embora a inclusão progressiva de palma OEM tenha elevado a concentração de CNF nas dietas, o perfil fermentativo dessa cactácea se assemelha ao de alimentos volumosos, o que atenua a acidificação ruminal. De acordo com Luna et al. (2022), a fermentação do CNF presente na palma forrageira favorece a produção de ácido acético (principal ácido formado na fermentação de alimentos fibrosos), através da digestão microbiana de polissacarídeos não amiláceos (frutose e  $\beta$ -glucanos) que compõe parte do seu CNF. Silva et al. (2025), ao avaliarem características fermentativas da palma forrageira e de outros volumosos por meio de incubação *in vitro*, não observaram diferenças significativas na produção de acetato. Além disso, o pH resultante da fermentação da palma manteve-se em 6,73, valor muito próximo ao observado no feno de capim-prado (6,73) e ao do feno de alfafa (6,64).

Os níveis crescentes de substituição promoveram aumento linear da concentração de NAR (15,10–19,08 mg/dL), além de provocarem picos maiores nas primeiras horas após a alimentação (19,00–27,12 mg/dL, às 3,02 e 2,80 h, respectivamente) (Tabela 4; Gráfico 2). Esse resultado indica que, embora o consumo de P<sub>Bd</sub> e o N ingerido tenha reduzido com os níveis de substituição, a inclusão crescente de ureia nos diferentes níveis promoveu maior disponibilidade de nitrogênio degradável no ambiente ruminal. Isto ocorre porque a ureia é altamente solúvel no ambiente ruminal, sendo rapidamente hidrolisada pela ação da urease

produzida pelos microrganismos ruminais, convertendo-se em amônia, podendo assim, ser incorporada pela microbiota (Ma e Faciola et al., 2024; Ramalho et al., 2024)

Contudo, embora os valores médios encontrados estejam dentro da margem considerada suficiente para maximizar a síntese de proteína microbiana (15 a 20 mg/dL) (Niazifar et al., 2024), os picos encontrados acima dessa faixa após a alimentação — mesmo que seguidos por queda — indicam problemas na sincronização entre disponibilidade de energia fermentescível e nitrogênio degradável (Santos et al., 2022).

A redução linear no consumo de MSpd e MOd (Tabela 3) à medida que os níveis aumentaram evidencia que quantidades cada vez menores de energia fermentável estavam disponíveis no rúmen. O aumento linear do teor de FDNi, concomitante à redução da fração potencialmente degradável da FDN, refletiu-se em um decréscimo na disponibilidade de energia fermentável no rúmen ao longo do tempo, levando a dissociação subsequente entre nitrogênio degradável e energia disponível. Justificando os picos aumentados de NAR à medida que a substituição aumentou (Zhang et al., 2020).

Nesse sentido, o aumento do NUS, seguido da elevação do N urinário em % do ingerido e redução do N retido observados neste estudo, confirmam que boa parte do nitrogênio fornecido pelo pico de NAR não foi aproveitado pelos microrganismos ruminais, sendo absorvido como amônia, convertido em ureia no fígado e posteriormente excretado na urina (Hailemariam et al., 2021; Nichols et al., 2023). Somado a isso, a redução do substrato energético no rúmen com o aumento dos níveis de substituição não só provocou o uso ineficiente do N dietético, mas também ocasionou a redução linear da síntese de proteína microbiana no rúmen (57,22– 43,05 SPM g/dia; Tabela 4) (Sampaio et al., 2009).

Os resultados obtidos neste estudo, apontam que a substituição da silagem de milho por palma OEM mais bagaço de cana de açúcar e ureia, em dietas contendo teores semelhantes de FDN não altera o pH do fluido ruminal. Contudo, a utilização crescente do bagaço de cana-de-açúcar, empregada com o objetivo de equalizar o teor de FDNcp entre as dietas, comprometeu a oferta de energia fermentescível no rúmen, resultando em menor sincronismo entre a disponibilidade de energia e o NAR. Esse descompasso reduziu a eficiência de utilização do nitrogênio dietético e limitou a síntese de proteína microbiana, sugerindo que os níveis de substituição avaliados neste estudo não são viáveis sob as condições testadas.

## 5. CONCLUSÃO

Não se recomenda a substituição da silagem de milho por palma forrageira mais bagaço de cana de açúcar e ureia em dietas com alta proporção de volumoso formuladas com base apenas no teor de FDN, pois reduz o consumo de matéria seca potencialmente digestível, a eficiência de utilização de compostos nitrogenados e limita a síntese de proteína microbiana no rúmen.

Considerando os possíveis efeitos negativos do aumento da FDNi na dieta sobre a eficiência de utilização dos compostos nitrogenados e a síntese de proteína microbiana no rúmen, recomenda-se considerar não somente o teor de FDN na formulação das dietas, mas também o teor de FDNi e/ou o teor de MSpd. Dessa forma, prevenindo potenciais reduções na disponibilidade de energia fermentável no rúmen, notadamente quando o bagaço de cana de açúcar e a principal fonte de FDN.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AOAC, 2023. **Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists.**, 22nd ed. AOAC International, Gaithersburg, MD, USA.

BEN SALEM, H., NEFZAOU, A., BEN SALEM, L. Spineless cactus (*Opuntia ficus-indica* f. *inermis*) and oldman saltbush (*Atriplex nummularia* L.) as alternative supplements for growing Barbarine lambs given straw-based diets. **Small Rumin. Res.** 51, 65–73. 2004. [https://doi.org/10.1016/S0921-4488\(03\)00186-X](https://doi.org/10.1016/S0921-4488(03)00186-X)

BR-Caprinos & Ovinos. **Exigências nutricionais de caprinos e ovinos.** Editora Scienza, São Carlos, Brazil. 2024. <https://doi.org/10.26626/9786556681849.2024B0001>

CAMPELO-LIMA, V.H., ANTAS-URBANO, S., ANDRADE-FERREIRA, M., CAVALCANTE-RIBEIRO, P.H., GOMES-BEZERRA, J.I., CARIRI-CHAGAS, J.C., MOREIRA-AGUIAR, E., NASCIMENTO-RANGEL, A.H. Sugarcane bagasse or elephant grass hay in diets for goats: Performance, feeding behavior and carcass characteristics. **Rev. Colomb. Cienc. Pecu.** 35(1), 49–59. 2022. <https://doi.org/10.17533/udea.rccp.v35n1a05>

CHEN, X.B., GOMES, M.J. Estimation of microbial protein supply to sheep and cattle based on urinary excretion of purine derivatives – an overview of technical details. **International Feed Resources Unit**, Rowett Research Institute, Aberdeen, UK. Occasional Publication, 1992.

DE WAAL, H.O., COMBRINCK, W.J., FOUCHÉ, H.J. Preserving mashed cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit with wheat straw, maize hay or lucerne hay. **Acta Hort.** 1067, 167–172. 2015. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1067.22>

DETMANN, E., SOUZA, M.A., VALADARES FILHO, S.C., QUEIROZ, A.C., BERCHIELLI, T.T., SALIBA, E.O.S., CABRAL, L.S., PINA, D.S., LADEIRA, M.M., AZEVEDO, J.A.G. **Métodos para análise de alimentos.** Suprema, Visconde do Rio Branco, MG, Brazil: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Ciência Animal, 2021.

DETMANN, E., VALADARES FILHO, S.C. On the estimation of non-fibrous carbohydrates in feeds and diets. **Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.** 62, 980–984, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0102-09352010000400030>

DUTRA, I.C., PIRES, A.J.V., SANTOS, B.E.F., SILVA, N.V., PIO, L.P., CRUZ, N.T., CARVALHO-DUTRA, G. Forage cactus (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) f. Cactaceae as an alternative for ruminant feeding. **Rev. Bras. Ciênc.** 3, 33–41, 2024. <https://doi.org/10.14295/bjs.v3i9.617>

FENNER, H. Method for determining total volatile bases in rumen fluid by steam distillation. **J. Dairy Sci.** 48, 249–251, 1965. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(65\)88206-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(65)88206-6)

GEBEYEW, K., MI, H., DU, R., GAO, M., DIBA, D., TANG, S., HE, Z., TAN, Z. Wheat straw and alfalfa hay alone or combined in a high-concentrate diet alters microbial–host interaction in the rumen of lambs. **Anim. Nutr.** 20, 444–457, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2024.08.010>

HAILEMARIAM, S.A., ZHAO, W., WANG, J., XUE, M., LIU, J. Effect of synchronized energy and nitrogen supply on rumen fermentation and microbial protein synthesis. **Anim. Feed Sci. Technol.** 276, 114930, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114930>

HALL, M.B. Calculation of non-structural carbohydrate content of feeds that contain non-protein nitrogen. Bull. 339. University of Florida, **Institute of Food and Agricultural Sciences** (IFAS), Gainesville, FL, USA, 2000.

LICITRA, G., HERNANDEZ, T.M., VAN SOEST, P.J. Standardization of procedures for nitrogen fractionation of ruminant feeds. **Anim. Feed Sci. Technol.** 57, 347–358, 1996. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(95\)00837-3](https://doi.org/10.1016/0377-8401(95)00837-3)

LIMA, I.E., MONTEIRO, C.C., MESQUITA, F.T.L., VASCONCELOS, E.Q.L., SOUZA, M.S., SANTOS, D.S., FERREIRA, M.A. Cactus cladodes for dairy goats: what is the best fiber source? **Trop. Anim. Health Prod.** 55, 347, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11250-023-03771-5>

MA, S.-W., FACIOLA, A.P., Impacts of slow-release urea in ruminant diets: A review. **Fermentation** 10, 527, 2024. <https://doi.org/10.3390/fermentation10100527>

MEDEIROS, I.P.S., GUIDO, S.I., GAMA, M.A.S., SILVA, C.H.M., SIQUEIRA, M.C.B., SILVA, C.S., NETTO, A.J., FELIX, S.B., RABELO, M.N., SANTOS, T.V.M., LEITE, M.A.M., FERREIRA, M.A. Cactus cladodes and sugarcane bagasse can partially replace earless corn silage in diets of lactating dairy cows. **Dairy** 5, 33–43, 2024. <https://doi.org/10.3390/dairy5010003>

MERTENS, D. R. Creating a system for meeting the fiber requirements of dairy cows. **J. Dairy Sci.** 80(7), 1463–1481. 1997. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(97\)76075-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76075-2).

MERTENS, D. R. Gravimetric determination of amylase-treated neutral detergent fiber in refluxed diets in beakers or crucibles: a collaborative study. **J. AOAC Int.** 85(6), 1217–1240. 2002. <https://doi.org/10.1093/jaoac/85.6.1217>

MORA-LUNA, R.E., HERRERA-ANGULO, A.M., SIQUEIRA, M.C.B., CONCEIÇÃO, M.G., CHAGAS, J.C.C., MONTEIRO, C.C.F., VÉRAS, A.S.C., CARVALHO, F.F.R.,

- FERREIRA, M.A. Spineless cactus plus urea and Tifton-85 hay: maximizing the digestible organic matter intake, ruminal fermentation and nitrogen utilization of wethers in semi-arid regions. **Animals** 12, 401. 2022. <https://doi.org/10.3390/ani12030401>
- MUNHAMED, J.A., BATISTA, Â.M., MONNERAT, J.P.I.S., MACIEL, M.V., LOPES, L.A., SILVA, T.G.P., CARVALHO, F.F.R., Intake, digestibility, ingestive behavior and performance of goats fed spineless cactus genotypes resistant to carmine cochineal. **Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.** 73(5), 1209–1216. 2021. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-12381>
- NIAZIFAR, M., DANESH MESGARAN, M., VAKILI, A.R., EGHBALSAIED, S., ALIMIRZAEI, M., JAFARI, A., FOROUGH, A.R., Slow-release non-protein nitrogen sources in animal nutrition: A review. **Heliyon** 10, e30543. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30543>
- NICHOLS, K., RAUCH, R., LIPPENS, L., SEYMOUR, D.J., MARTÍN-TERESO, J. Dose response to post-ruminal urea in lactating dairy cattle. **J. Dairy Sci.** 106, 23402. 2023. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23402>
- PASTORELLI, G., SERRA, V., VANNUCCINI, C., ATTARD, E. Opuntia spp. as alternative fodder for sustainable livestock production. **Animals** 12, 1597. 2022. <https://doi.org/10.3390/ani12131597>
- RAMALHO, I.O., SANTOS-SOUZA, W., HOMEM, B.G.C., COSTA-SOARES, S., BORRÉ, J.G., RAMOS, J.V.B., SALGADO, L. Nitrogen metabolism in ruminants and the implications of excess dietary nitrogen in pasture-based livestock farming. **Zootec. Tóp. Atuais Pesq. Cient. Digit.** 5, 62–80. 2024. <https://doi.org/10.37885/240316172>
- RUFINO, L.M.A., DETMANN, E., GOMES, D.Í., REIS, W.L.S., BATISTA, E.D., VALADARES FILHO, S.C., PAULINO, M.F. Intake, digestibility and nitrogen utilization in cattle fed tropical forage and supplemented with protein in the rumen, abomasum, or both. **J. Anim. Sci. Biotechnol.** 7, 11, 2016. <https://doi.org/10.1186/s40104-016-0069-9>
- SAMPAIO, C.B., DETMANN, E., LAZZARINI, I., SOUZA, M.A., PAULINO, M.F., VALADARES FILHO, S.C. Rumen dynamics of neutral detergent fiber in cattle fed low-quality tropical forage and supplemented with nitrogenous compounds. **Rev. Bras. Zootec.** 38, 560–569. 2009. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009000300023>
- SÁNCHEZ, B.M.S., VÉRAS, A.S.C., FREITAS, E.V., FARIAS, L.R., ALBUQUERQUE, J.G.S.S., ALMEIDA, G.A.P., MORA-LUNA, R.E., MONTEIRO, C.C.F., GAMA, M.A.S., FERREIRA, M.A. Partial replacement of sugarcane with cactus (*Opuntia stricta*) cladodes improves milk yield and composition in Holstein dairy cows. **Anim. Prod. Sci.** 62, 691–699. 2022. <https://doi.org/10.1071/AN19648>
- SANTOS, D.C., BATISTA, Â.M.V., VÉRAS, A.S.C., SIQUEIRA, M.C.B., OLIVEIRA, J.S., SIQUEIRA, M.C., MACIEL, M.V., CARVALHO, F.F.R. Sugarcane replaced by cactus cladodes improves the ruminal dynamics of sheep. **Small Rumin. Res.** 213, 106715. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2022.106715>
- SANTOS, S.A., CARVALHO, G.G.P., AZEVÊDO, J.A.G., ZANETTI, D., SANTOS, E.M., PEREIRA, M.L.A., MARIZ, L.D.S. Metabolizable protein: 1. Predicting equations to estimate microbial crude protein synthesis in small ruminants. **Front. Vet. Sci.** 8, 650248. 2021. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.650248>

- SHI, R., DONG, S., MAO, J., WANG, J., CAO, Z., WANG, Y., LI, S., ZHAO, G. Dietary neutral detergent fiber levels impacting dairy cows' feeding behavior, rumen fermentation, and production performance during the period of peak lactation. *Animals* 13, 2876. 2023. <https://doi.org/10.3390/ani13182876>
- SILVA, A.E.M., FRANCO, A.M., SOLOMON, J.K.Q., DA FREIRIA, L.B., DE MOURA, F.H., MAZZA, P.H.S., BIRKENSTOCK, B., BEZERRA, L.R., SHENKORU, T., FONSECA, M.A. Cactus (*Opuntia ficus-indica*) diets reduce voluntary water intake, water footprint and enteric methane production improving ruminal fermentation in steers. *J. Arid Environ.* 227, 105311. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2024.105311>
- SIQUEIRA, M.C., CHAGAS, J.C., MONNERAT, J.P.I., MONTEIRO, C.C., MORA-LUNA, R.E., FELIX, S.B., FERREIRA, M.A. Cactus cladodes (*Opuntia* or *Nopalea*) and by-products of low nutritional value as solutions to forage shortages in semiarid areas. *Animals* 12, 3182. 2022. <https://doi.org/10.3390/ani12223182>
- SIQUEIRA, T.D.Q., MONNERAT, J.P.I., CHAGAS, J.C., CONCEIÇÃO, M.G., SIQUEIRA, M.C.B., VIANA, T.B.L., FERREIRA, M.A. Cactus cladodes associated with urea and sugarcane bagasse: an alternative to conserved feed in semi-arid regions. *Trop. Anim. Health Prod.* 51, 1975–1980. 2019. <https://doi.org/10.1007/s11250-019-01895-1>
- SOUZA, N.K.P., DETMANN, E., VALADARES FILHO, S.C., COSTA, V.A.C., PINA, D.S., GOMES, D.I., QUEIROZ, A.C., MANTOVANI, H.C. Accuracy of the estimates of ammonia concentration in rumen fluid using different analytical methods. *Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.* 65, 1752–1758. 2013. <https://doi.org/10.1590/S0102-09352013000600021>
- VAN SOEST, P.J. **Nutritional ecology of the ruminant**. 2nd ed. Cornell University Press, Ithaca, NY, USA. 1994.
- VAN SOEST, P.J., ROBERTSON, J.B., LEWIS, B.A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *J. Dairy Sci.*, 74, 3583–3597. 1991. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
- WEISS, W.P., CONRAD, H.R., ST. PIERRE, N.R. A theoretically based model for predicting total digestible nutrient values of forages and concentrates. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 39, 95–110. 1992. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(92\)90034-4](https://doi.org/10.1016/0377-8401(92)90034-4)
- ZHANG, J., ZHENG, N., SHEN, W., ZHAO, S., WANG, J. Synchrony degree of dietary energy and nitrogen release influences microbial community, fermentation, and protein synthesis in a rumen simulation system. *Microorganisms* 8, 231. 2020. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8020231>
- ZHANG, T., ZHAO, X., LI, Y., LIU, H., XU, G., CHEN, L. Effects of dietary fiber levels on ruminal fermentation characteristics, microbial community and nutrient digestibility in sheep. *Small Rumin. Res.* 238, 107289. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2024.107289>