



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
CAMPUS PROFESSORA CINOBELINA ELVAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA TROPICAL

ALECX MIKAEL CARVALHO DA SILVA

**UTILIZAÇÃO DE ENZIMAS FIBROLÍTICAS EM SILAGENS DE PLANTAS
FORRAGEIRAS**

Bom Jesus – PI

2025

ALECX MIKAEL CARVALHO DA SILVA

**UTILIZAÇÃO DE ENZIMAS FIBROLÍTICAS EM SILAGENS DE PLANTAS
FORRAGEIRAS**

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Zootecnia Tropical (PPGZT) da Universidade Federal do Piauí (UFPI), *Campus* Professora Cinobelina Elvas (CPCE), na área de concentração Produção Animal nos Trópicos e linha de pesquisa Produção de Alimentos e Nutrição Animal nos Trópicos, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Zootecnia Tropical.

Orientador: Prof. Dr. Tairon Pannunzio Dias e Silva

Coorientador: Prof. Dr. Antonio Leandro Chaves Gurgel

Bom Jesus - PI

2025

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial Campus Professora Cinobelina Elvas
Setor de Processamento Técnico

S586u Silva, Alecx Mickael Carvalho da.

Utilização de enzimas fibrolíticas em silagens de plantas forrageiras
/ Alecx Mickael Carvalho da Silva. -- 2025.
55 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí. Programa
de Pós-Graduação em Zootecnia Tropical, Bom Jesus, Piauí, 2025.
“Orientador: Prof. Dr. Tairon Panuzzio Dias e Silva”.
“Coorientador: Prof. Dr. Antonio Leandro Chaves Gurgel”.

1. Zootecnia. 2. Plantas forrageiras. 3. Composição química. I. Silva,
Tairon Panuzzio Dias e. II. Gurgel, Antonio Leandro Chaves.
III. Título.

CDD 636

SILAGEM DE CAPIM-ELEFANTE BRS CAPIAÇU COM ADIÇÃO DE BLEND DE ENZIMAS FIBROLÍTICAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Zootecnia Tropical, da Universidade Federal do Piauí, como requisito à obtenção do título de Mestre em Zootecnia Tropical.

Orientador: Prof. Dr. Tairon Pannunzio Dias e Silva

Coorientador: Prof. Dr. Antonio Leandro Chaves Gurgel

Aprovado em 27 de novembro de 2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **TAIRON PANNUNZIO DIAS E SILVA**
Data: 09/12/2025 17:09:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Tairon Pannunzio Dias e Silva
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **ANTONIO LEANDRO CHAVES GURGEL**
Data: 01/12/2025 12:15:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Antonio Leandro Chaves Gurgel
Examinador Interno

Documento assinado digitalmente
 **SHEILA VILARINDO DE SOUSA**
Data: 01/12/2025 16:22:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Sheila Vilarindo de Sousa
Examinador Interno

Documento assinado digitalmente
 **MIGUEL ARCANJO MOREIRA FILHO**
Data: 27/11/2025 17:16:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Miguel Arcanjo Moreira Filho
Examinador Externo

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, Marcos Antonio Morais da Silva e Ana Mary Barbosa de Carvalho da Silva,
por todo o incentivo e apoio durante esta caminhada.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus.

À Universidade Federal do Piauí e ao Programa Pós-graduação em Zootecnia Tropical, por me conceder o título de Mestre em Zootecnia Tropical.

Ao *Campus* Professora Cinobelina Elvas - CPCE, por todo o apoio.

Agradecimento especial ao meu orientador Prof. Dr. Tairon Pannunzio Dias e Silva pela excelente orientação, parceria e experiência trazidas para este trabalho.

Ao meu Coorientador Prof. Dr. Antonio Leandro Chaves Gurgel por todo o apoio, dicas e orientações em momentos chave para a execução desta pesquisa.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia Tropical – PPGZT pelos conhecimentos ensinados.

Aos técnicos de laboratório e funcionários da UFPI - CPCE.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí - FAPEPI pelo auxílio financeiro concedido.

Aos integrantes do Grupo de Estudo e Pesquisa em Nutrição Animal e Avaliação de Alimentos para Ruminantes (RUMINAL - UFPI - CPCE) que contribuíram de forma significativa para a realização desse trabalho.

Aos amigos e colaboradores, como Wesleyson Cristian, Ana Beatriz Duarte, Rayanne Ferreira, Armando Alves, Isadora Osorio, Romilda Rodrigues, Noel Nunes, Joana Carilene, Victor Diogo, Gutierre Araujo, Samara Batista e Sheila Vilarindo, agradeço pela ajuda e amizade. Sempre serei grato a vocês.

A todos vocês, meus mais sinceros agradecimentos. Muito obrigado!

Não se pode criar experiência. É preciso passar por ela.

Albert Camus

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Alecx Mikael Carvalho da Silva – Nascido em Caxias - MA em 26 de agosto de 1998, filho de Marcos Antonio Moraes da Silva e Ana Mary Barbosa de Carvalho da Silva. Em 2015 concluiu o curso de técnico em agropecuária na modalidade integrada ao ensino médio no Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Maranhão - IFMA *Campus* Caxias. Em agosto de 2016 ingressou no ensino superior no curso de bacharelado em Zootecnia, no Instituto Federal do Maranhão de Educação Ciência e Tecnologia do Maranhão - IFMA *Campus* Caxias, concluindo em 2023 com o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado: Potencial Nutricional da Farinha de Folhas de Ora-Pro-Nóbis na Alimentação de Ruminantes sob orientação do professor Doutor Ricardo Abílio Bezerra e Silva.

RESUMO GERAL

Objetivou-se avaliar os efeitos da adição de enzimas fibrolíticas e do tempo de fermentação sobre a composição química e as características fermentativas de plantas forrageiras, por meio de uma revisão sistemática com meta-análise. Também realizou-se um experimento controlado para avaliar o impacto de um *blend* enzimático sobre as características fermentativas, composição química, produção de ácidos orgânicos, estabilidade aeróbica e digestibilidade in vitro da matéria seca (DIVMS) de silagem de capim-elefante BRS Capiáu. A meta-análise foi conduzida com base em protocolo estruturado segundo a estratégia PICOS, reunindo estudos que avaliaram a inclusão de enzimas fibrolíticas em silagens de gramíneas tropicais. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com seis repetições, utilizando doses de 0, 2, 4 e 6 g/kg de matéria seca do *blend* enzimático Fiberzyme®, aplicado à silagem de capim-elefante BRS Capiáu. A meta-análise indicou que a inclusão de enzimas fibrolíticas reduziu o teor de fibra em detergente neutro (FDN), de 579,23 para 515,57 g/kg de matéria seca (MS) ($P = 0,0219$), além de apresentar tendência de redução da fibra em detergente ácido e da hemicelulose. Além disso observou-se que o período de fermentação influenciou a maioria das variáveis de composição química, digestibilidade e perfil fermentativo, com redução progressiva da MS e aumento do nitrogênio amoniacal ($N-NH_3$), indicando intensificação da atividade microbiana ao longo do tempo. No experimento, a inclusão do complexo enzimático mostrou efeito quadrático para a fibra em detergente ácido (FDA) ($P = 0,0386$) e tendência quadrática para a FDN ($P = 0,0859$) e os nutrientes digestíveis totais (NDT) ($P = 0,0875$), com melhores respostas na dose intermediária de 2 g/kg de matéria seca. Concluiu-se que a aplicação de enzimas fibrolíticas promove efeitos dependentes da dose, resultando em melhorias pontuais na composição química da silagem de capim-elefante BRS Capiáu, especialmente pela redução da fração fibrosa, enquanto o tempo de fermentação exerce papel determinante sobre as alterações fermentativas e nutricionais das silagens.

Palavras-chave composição química; degradabilidade; estabilidade aeróbia; gramíneas tropicais; parâmetros fermentativos; regiões tropicais.

GENERAL ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effects of the addition of fibrolytic enzymes and fermentation time on the chemical composition and fermentative characteristics of forage plants through a systematic review with meta-analysis. In addition, a controlled experiment was conducted to assess the impact of an enzymatic blend on the fermentative characteristics, chemical composition, organic acid production, aerobic stability, and in vitro dry matter digestibility (IVDMD) of BRS Capiáu elephant grass silage. The meta-analysis was carried out based on a protocol structured according to the PICOS strategy, compiling studies that evaluated the inclusion of fibrolytic enzymes in tropical grass silages. The experiment was conducted in a completely randomized design with six replications, using doses of 0, 2, 4, and 6 g/kg of dry matter of the enzymatic blend Fiberzyme®, applied to BRS Capiáu elephant grass silage. The meta-analysis indicated that the inclusion of fibrolytic enzymes reduced the neutral detergent fiber (NDF) content from 579.23 to 515.57 g/kg of dry matter (DM) ($P = 0.0219$), with a tendency toward reductions in acid detergent fiber and hemicellulose. In addition, fermentation time influenced most variables related to chemical composition, digestibility, and fermentative profile, promoting a progressive reduction in DM and an increase in ammonia nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$), indicating intensified microbial activity over time. In the experiment, the inclusion of the enzymatic complex showed a quadratic effect on acid detergent fiber (ADF) ($P = 0.0386$) and quadratic tendencies for NDF ($P = 0.0859$) and total digestible nutrients (TDN) ($P = 0.0875$), with the best responses observed at the intermediate dose of 2 g/kg DM. It is concluded that the application of fibrolytic enzymes promotes dose-dependent effects, resulting in specific improvements in the chemical composition of BRS Capiáu elephant grass silage, particularly through the reduction of the fibrous fraction, while fermentation time plays a decisive role in fermentative and nutritional changes in silages.

Keywords: aerobic stability; chemical composition; degradability; fermentative parameters; tropical grasses; tropical regions.

LISTA DE TABELAS

Capítulo I

Tabela 1: Termos utilizados em busca unicruzada e de alta sensibilidade para estudo das silagens tratadas com enzimas fibrolíticas.	20
Tabela 2: Caracterização dos estudos incluídos na meta-análise com silagens tratadas com enzimas fibrolíticas.	24
Tabela 3: Análises descritiva dos dados utilizados na análise de qualidade das silagens tratadas com enzimas fibrolíticas.	25
Tabela 4: Efeito da adição de enzimas fibrolíticas sobre a composição química e os parâmetros fermentativos das silagens.....	28
Tabela 5: Meta-regressão do período de fermentação sobre as características das silagens.....	29

Capítulo II

Tabela 1: Composição química do capim elefante BRS Capiáçu (<i>Pennisetum purpureum</i> Schum.), farelo de trigo e mistura BRS Capiáçu + farelo de trigo antes da ensilagem.	41
Tabela 2: Perdas, recuperação de MS Características fermentativas da silagem de capim-elefante BRS Capiáçu (<i>Pennisetum purpureum</i> Schum.) com adição de enzimas fibrolíticas.	46
Tabela 3: Teor de ácidos orgânicos na silagem de capim-elefante BRS Capiáçu (<i>Pennisetum purpureum</i> Schum.) com adição de enzimas fibrolíticas.	47
Tabela 4: Composição química e digestibilidade in vitro da matéria seca da silagem de capim-elefante BRS Capiáçu (<i>Pennisetum purpureum</i> Schum.) com adição de enzimas fibrolíticas.	48

LISTA DE SÍMBOLOS

% - Percentual

cm - Centímetro

CO₂ - Símbolo da molécula de gás carbônico

g – Grama

kg - Quilograma

g/kg - Grama por quilograma

mEq/Kg – Miligrama equivalente por quilograma

NaOH - Hidróxido de sódio

HCL - Ácido clorídrico

N - Nitrogênio

N-NH₃ - Nitrogênio amoniacal

° - Grau

°C - Grau Celsius

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DIC - Delineamento inteiramente casualizado

PVC - Policloreto de Vinila

TNT - Tecido não tecido

UI - Unidade Internacional

RMS - Recuperação da matéria seca

PG - Perdas por gases

E- Perdas por efluente

EE - Extrato etéreo

FDA - Fibra em detergente ácido

FDN - Fibra em detergente neutro

MM - Matéria mineral

MN - Matéria natural

MO - Matéria orgânica

MS - Matéria seca

PB - Proteína bruta

pH - Potencial hidrogeniônico

SUMÁRIO

Introdução geral	13
CAPÍTULO I	14
1.Introdução	17
2.Metodologia	18
2.1. Protocolo de revisão e questão norteadora	18
2.2. Critérios de Elegibilidade	18
2.3. Fontes de informação	19
2.4. Estratégia de busca e seleção de estudos	19
2.5. Processo de coleta de dados	19
2.6. Avaliação da qualidade metodológica e do risco de viés	21
2.7. Análise estatística	21
3. Resultados	21
4. Discussão	27
5. Conclusão	29
Referencias	29
CAPÍTULO II	35
1. Introdução	38
2. Metodologia	39
3. Resultados	45
4. Discussão	48
5. Conclusão	50
Referencias	50
Considerações gerais	55

Introdução geral

Entre os métodos de conservação de forragens, a ensilagem destaca-se por preservar os nutrientes da planta fresca com mínimas perdas, assegurando alimento de qualidade durante períodos de escassez (Costa *et al.*, 2019; Macêdo *et al.*, 2019). A escolha da forrageira exerce papel decisivo na qualidade da silagem, sendo preferidas espécies adaptadas ao clima tropical, com bom valor nutricional e elevada produtividade.

Nesse contexto, o *Pennisetum purpureum* Schum. BRS Capiáu tem se consolidado como uma das principais opções, combinando elevado potencial produtivo (50–70 t/ha/ano de matéria seca) e boa aceitabilidade (Pereira *et al.*, 2016; Paula *et al.*, 2020). Contudo, o baixo teor de matéria seca (<250 g/kg MN) e a elevada proporção de frações fibrosas estruturais de baixa degradabilidade dificultam a fermentação e podem comprometer a qualidade da silagem.

Para contornar essas limitações, o uso de aditivos como as enzimas fibrolíticas tem se mostrado uma alternativa relevante. Esses aditivos favorecem a degradação das fibras vegetais, liberando açúcares que estimulam o crescimento de bactérias lácticas e promovem melhor acidificação e maior estabilidade da silagem (Jesus *et al.*, 2021).

As enzimas fibrolíticas, como celulase e xilanase, atuam na hidrólise da celulose e da hemicelulose, principais componentes da fração fibrosa das gramíneas. Quando eficazes, reduzem os teores de FDN e FDA, aumentam a liberação de açúcares fermentáveis e melhoram a digestibilidade da fibra (Adesogan *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2024).

No entanto, apesar do potencial das enzimas fibrolíticas em promover a degradação da parede celular vegetal, sua efetividade demonstra variações expressivas em função do tempo de armazenamento da silagem (Spoelstra e Wikselaar, 1992; Chen *et al.*, 2022; Campana *et al.*, 2023). Diante disso, essa dissertação foi estruturada em duas abordagens complementares. Inicialmente, realizou-se uma revisão sistemática com meta-análise, com o objetivo de sintetizar quantitativamente os efeitos da inclusão de enzimas fibrolíticas e do tempo de fermentação na silagem de plantas forrageiras sobre os parâmetros de qualidade fermentativa e composição química.

Em seguida, conduziu-se um experimento para avaliar, de forma controlada, os efeitos da adição de um *blend* enzimático sobre a estabilidade aeróbia, as características fermentativas, a composição química, a digestibilidade *in vitro* da matéria seca e a produção de ácidos orgânicos da silagem de BRS Capiáu. Esta proposta parte da hipótese de que a inclusão de um *blend* enzimático melhora o perfil fermentativo e contribui para o aumento do valor nutritivo da silagem de capim-elefante BRS Capiáu, sem comprometer sua estabilidade aeróbica.

CAPÍTULO I

Impacto da aplicação de enzimas fibrolíticas e do tempo de fermentação sobre a qualidade das silagens de plantas forrageiras: um estudo de meta-análise

RESUMO

Este estudo avaliou, por meio de meta-análise e meta-regressão, os efeitos da aplicação de enzimas fibrolíticas e do tempo de fermentação sobre a composição química, a digestibilidade e o perfil fermentativo de silagens, com base em um protocolo estruturado segundo a estratégia PICOS. Foram selecionados 29 artigos científicos, abrangendo 30 experimentos e 730 observações, envolvendo diferentes espécies forrageiras e resíduos agrícolas submetidos ao tratamento enzimático. A inclusão de enzimas fibrolíticas reduziu significativamente o teor de fibra em detergente neutro (FDN), de 579,23 para 515,57 g/kg de matéria seca (MS) ($P = 0,0219$), além de indicar tendência de redução da fibra em detergente ácido (FDA), de 363,57 para 330,94 g/kg MS ($P = 0,0844$), e da hemicelulose, de 219,84 para 192,00 g/kg MS ($P = 0,0699$). Não foram observados efeitos significativos das enzimas sobre os parâmetros fermentativos avaliados. A meta-regressão demonstrou que o período de fermentação influenciou a maioria das variáveis de composição química, digestibilidade e perfil fermentativo, promovendo redução progressiva da MS e aumento do nitrogênio amoniacal, indicativos da intensificação da atividade microbiana ao longo do processo fermentativo. Conclui-se que a aplicação de enzimas fibrolíticas contribui para a redução da fração fibrosa e melhora potencial da qualidade da silagem, porém seus efeitos são fortemente modulados pelo tempo de fermentação, ressaltando a importância do manejo adequado do período de ensilagem.

Palavras-chave: ácidos orgânicos; carboidratos solúveis; ensilagem; frações fibrosas; preservação nutricional.

ABSTRACT

This study evaluated, through meta-analysis and meta-regression, the effects of fibrolytic enzyme application and fermentation time on the chemical composition, digestibility, and fermentative profile of silages, based on a protocol structured according to the PICOS strategy. A total of 29 scientific articles were selected, encompassing 30 experiments and 730 observations, involving different forage species and agricultural by-products subjected to enzymatic treatment. The inclusion of fibrolytic enzymes significantly reduced neutral detergent fiber (NDF) content from 579.23 to 515.57 g/kg of dry matter (DM) ($P = 0.0219$), and showed a tendency to reduce acid detergent fiber (ADF) from 363.57 to 330.94 g/kg DM ($P = 0.0844$) and hemicellulose from 219.84 to 192.00 g/kg DM ($P = 0.0699$). No significant effects of enzyme application were observed on the evaluated fermentative parameters. Meta-regression analysis demonstrated that fermentation time significantly influenced most variables related to chemical composition, digestibility, and fermentative profile, promoting a progressive reduction in DM and an increase in ammoniacal nitrogen, indicating intensification of microbial activity throughout the fermentation process. It is concluded that the application of fibrolytic enzymes contributes to the reduction of the fibrous fraction and potentially improves silage quality; however, these effects are strongly modulated by fermentation time, highlighting the importance of proper management of the ensiling period.

Keywords: fiber fractions; nutrient preservation; organic acids; silage; soluble carbohydrates.

1.Introdução

A ensilagem é uma das principais estratégias adotadas para conservação de forragem, permitindo o armazenamento do excedente produzido em épocas favoráveis e sua utilização em períodos de escassez. Esse processo garante maior estabilidade do sistema produtivo e contribui para a redução das flutuações na oferta de nutrientes ao longo do ano. Entretanto, a qualidade da silagem obtida em regiões tropicais muitas vezes é limitada pela elevada fração fibrosa das gramíneas, o que resulta em menor aproveitamento dos nutrientes (Furtado *et al.*, 2019; Lemos *et al.*, 2020).

Diante desta problemática, a utilização de aditivos tem sido amplamente estudada como alternativa para potencializar a qualidade nutricional das silagens. Entre eles, destacam-se as enzimas fibrolíticas, cuja função está associada à degradação parcial da parede celular vegetal, visando uma maior disponibilidade de carboidratos fermentescíveis e nutrientes para os microrganismos durante a fermentação (Beauchemin *et al.*, 2004). Diversos estudos têm relatado que a inclusão de enzimas fibrolíticas pode modificar o perfil fermentativo da silagem, favorecendo a maior produção de ácido lático e a redução de perdas por efluentes e gases. (Khota *et al.*, 2016; Jesus *et al.*, 2021; Ding *et al.*, 2022). Do mesmo modo, tais aditivos podem contribuir para o equilíbrio da microbiota responsável pelo processo fermentativo, resultando em melhor conservação da matéria seca e manutenção do valor nutritivo do material ensilado (Muck, 2010; Lemos *et al.*, 2020).

Apesar do potencial teórico das enzimas fibrolíticas na ensilagem, os resultados experimentais apresentam grande variação. Enquanto alguns autores observam reduções significativas nas frações fibrosas e melhoria no perfil fermentativo (Chen *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2024), outros detectam efeitos mínimos nestes mesmos aspectos (Cysneiros *et al.*, 2006; Kozelov *et al.*, 2008). Além disso, embora as enzimas fibrolíticas tenham potencial para degradar a parede celular vegetal e melhorar a fermentação, sua eficácia parece variar significativamente em função do período de armazenamento.

Estudos como os de Chen *et al.* (2022) e Campana *et al.* (2023) relatam que a aplicação de complexos enzimáticos em silagens de capim-elefante promoveu uma fermentação eficiente, com redução do pH, aumento da produção de ácido lático e degradação parcial da fibra em períodos curtos de até 60 dias de fermentação. Por outro lado, pesquisas como a de Spoelstra e Wikselaar (1992) não observaram benefícios consistentes da adição de enzimas em períodos acima de 60 dias de fermentação.

Nesse contexto, investigar o impacto da aplicação de enzimas fibrolíticas e do tempo de fermentação sobre a composição química e as características fermentativas de silagens torna-se

fundamental para compreender seu real potencial como ferramenta tecnológica. O aprofundamento nesse tema pode fornecer subsídios relevantes para estratégias de manejo alimentar que visem maior eficiência produtiva e sustentabilidade dos sistemas pecuários tropicais, fortalecendo o elo entre nutrição animal e conservação de forragens.

Segundo autores como Petticrew *et al.* (2013) e Costa *et al.* (2021), a utilização da meta-análise possibilita reunir resultados de pesquisas primárias em um campo específico, combinando-os com métodos estatísticos modernos que aumentam a exatidão na estimativa dos efeitos observados nos experimentos. Com isso, objetivou-se analisar a influência do uso de enzimas fibrolíticas e do tempo de fermentação em silagens de plantas forrageiras sobre a composição química e características fermentativas, por meio de uma abordagem meta-analítica fundamentada em estudos primários publicados em periódicos científicos.

2. Metodologia

2.1. Protocolo de revisão e questão norteadora

A revisão sistemática foi conduzida com base em um protocolo previamente elaborado, testado e ajustado, de modo a assegurar a correta condução das etapas de busca, extração, análise e organização dos dados. Essa padronização teve como finalidade produzir evidências científicas consistentes, apoiadas em uma estratégia de busca sensível e adequada ao objetivo proposto.

A questão norteadora deste estudo foi definida como “O uso de enzimas fibrolíticas é capaz de melhorar a qualidade química e fermentativa das silagens de plantas forrageiras ao longo do tempo de fermentação?”, cuja formulação da questão baseou-se na estratégia PICOS, em que se definiu como população (P) silagem de plantas forrageiras, enquanto a intervenção (I) correspondeu ao uso de enzimas fibrolíticas. Para o comparador (C), considerou-se a ausência de enzimas, e como desfecho (O) buscou-se identificar os efeitos sobre as características fermentativas e nutricionais. Quanto ao tipo de estudo (S), foram incluídos exclusivamente estudos de caráter experimental.

2.2. Critérios de Elegibilidade

Os critérios de elegibilidade desta revisão contemplaram apenas artigos completos disponíveis em bases de dados eletrônicas, redigidos no formato de estudos experimentais bem delineados, sem restrição de idioma ou período de publicação. Foram excluídos editoriais, cartas ao editor, resumos, opiniões de especialistas, revisões, correspondências, teses,

dissertações, palestras, livros e capítulos de livros. Artigos duplicados foram considerados apenas uma vez. Um estudo foi considerado pertinente quando: (1) configurava pesquisa primária publicada como artigo científico; (2) abordava o uso de enzimas fibrolíticas como aditivo na silagem de plantas forrageiras; e (3) avaliava características fermentativas e nutricionais.

2.3. Fontes de informação

Os estudos foram localizados de forma sistemática por meio de buscas eletrônicas de alta sensibilidade nas bases SCOPUS (Elsevier), Web of Science (Coleção Principal), Wiley Online Library e Science Direct (Elsevier), abrangendo publicações até 20 de fevereiro de 2025. O acesso às bases foi realizado pelo Portal de Periódicos CAPES, utilizando o proxy da Universidade Federal do Piauí (UFPI, Brasil).

2.4. Estratégia de busca e seleção de estudos

Para a busca nas bases de dados com revisão por pares, foi aplicada uma estratégia utilizando termos e operadores booleanos em uma única pesquisa cruzada (Tabela 1). A pesquisa seguiu de forma uniforme em todas as bases de dados, alinhada à estratégia PICOS adotada. Na etapa de triagem, dois revisores avaliaram de forma independente os resultados, examinando títulos, resumos e palavras-chave. Os textos completos dos artigos considerados relevantes foram analisados integralmente e selecionados de acordo com os critérios de elegibilidade. Todo o processo de triagem foi realizado utilizando o software Microsoft Excel®.

2.5. Processo de coleta de dados

Um formulário específico foi elaborado para a extração de dados deste estudo, incluindo informações sobre a identificação da publicação (título do artigo, bases indexadas, autores, país, idioma e ano de publicação), nome do periódico científico, aspectos metodológicos do estudo (descrição do experimento realizado, critérios para composição dos grupos de tratamento e comparações/controles, período experimental, variáveis analisadas e resultados obtidos). As limitações e conclusões dos estudos foram avaliadas de forma independente por dois revisores. Todas as variáveis obtidas após a coleta de dados foram organizadas em tabelas utilizando o software Microsoft Excel®.

Tabela 1. Termos utilizados em busca unicruzada e de alta sensibilidade para estudo das silagens tratadas com enzimas fibrolíticas.

Acronimo	Termos e referencias cruzadas
População (P)	“Forage plant silage” OR “Forage silage” OR “Plant silage” OR “Grass silage” OR “Ensiled forage” OR “Forage conservation” OR “Bulk silage” OR “Fermented forage” OR “Ensiled material” OR “Green forage silage” OR “Green chop silage” OR “Forage crop silage” OR “Ensiled forage plants” OR “Ensiled forage crops” OR “Green fodder silage” OR “Preserved forage” OR “Ensilage” OR “Fermented forage biomass” OR “Conserved forage” OR “Forage conservation” OR “Ensiled feed” OR “Silage feed” OR “Stored forage” AND
Intervenção (I) e Comparação (C)	“Fibrolitic enzymes” OR “Fiber-degrading enzyme” OR “Fiber-breaking enzymes” OR “Fiber-hydrolyzing enzymes” OR “Cell wall-degrading enzymes” OR “Cell wall-decomposing enzymes” OR “Structural carbohydrate-degrading enzymes” OR “Polysaccharide-degrading enzymes” OR “Fiber digestion” OR “Enzymatic hydrolysis of fiber” OR “Enzymatic fiber degradation” OR “Enzymatic treatment of silage” OR “Exogenous fibrolitic enzymes” “Enzyme complexes” OR “Enzyme blends” OR “Multi-enzyme complexes” OR “Enzyme formulations” OR “Enzymatic blends” OR “Enzyme mixtures” OR “Enzymatic complexes” OR “Hemicellulase” OR “Cellulase” OR “Pectinase” OR “Galactosidase” OR “Mannanase” AND
Desfecho (O)	“Fermentative parameters” OR “Fermentative profile” OR “Fermentation dynamics” OR “Silage quality” OR “Fermentation properties” OR “Fermentation quality” OR “Fermentation indicators” OR “Fermentation parameters” OR “Fermentative quality indicators” OR “Fermentative aspects” OR “Fermentative pattern” OR “Fermentation process “ OR “Ensiled feed quality” OR “Preservation quality” OR “Forage quality” OR “Nutritional quality” OR “Nutritional value” OR “Nutritional composition” OR “Nutritional profile” OR “Dietary quality” OR “Chemical composition” OR “Constituent elements” OR “In vitro degradability” OR “In vitro degradation” OR “In vitro digestibility” OR “pH level” OR “Silage pH” “Acidity” OR “Acid content” OR “Acid level” OR “Organic acids” OR “Organic acid production” OR “Organic acid profile” OR “Lactic acid formation” OR “Acetic acid production” OR “Butyric acid production” OR “pH control” OR “Fermentative stability” OR “Aerobic stability” OR “Ethanol and other alcohol production” OR “Gas losses during fermentation” AND
Tipo de estudo (S)	Estudos Experimentais

2.6. Avaliação da qualidade metodológica e do risco de viés

A avaliação da qualidade metodológica e do potencial de viés dos estudos selecionados para a amostra final desta Revisão Sistemática foi realizada utilizando o Critical Skills Assessment Program (CASP 2018), específico para pesquisas experimentais. De maneira geral, os estudos apresentaram risco de viés considerado baixo, refletindo, sobretudo, a clareza e objetividade dos resultados reportados.

2.7. Análise estatística

Os dados foram analisados utilizando técnicas de meta-análise para procedimentos mistos usando o software SAS v. 9.3[®] (Cary, North Carolina). O efeito do tempo de fermentação, tratamento e suas interações foram analisadas por ANOVA. A adequação das equações e as melhores estruturas de (co)variância foram avaliadas utilizando autorregressão heterogênea de primeira ordem, simetria composta e poder espacial baseada no critério de informação de Akaike. Foi realizada a análise de variância considerando os efeitos do tempo de fermentação, tratamento (com e sem a adição de enzimas) e da interação tempo $\times$ tratamento sobre as características químicas e fermentativas das silagens.

O efeito das enzimas utilizadas nos diferentes experimentos foi considerado nos parâmetros de regressão. Todos os tempos de fermentação foram ponderados de acordo com o número de repetições em cada estudo. A análise de regressão dos dados foi realizada para cada variável dentro de cada tempo de fermentação. As médias das variáveis para efeito de tratamento foram comparadas pelo teste t de Student. Para as variáveis com significância linear ou quadrática, foram determinadas equações de regressão. Um nível de significância de 5% foi adotado para todas as análises estatísticas.

3. Resultados

A busca inicial identificou 683 documentos, dos quais 586 consistiam em artigos de pesquisa. Desses, 66 manuscritos foram identificados como potenciais fontes de dados de interesse para esta meta-análise; entretanto, 29 foram considerados elegíveis e incluídos devido à robustez metodológica de cada experimento para a extração dos dados (Figura 1).

Os estudos analisados foram publicados entre os anos de 1991 e 2025, incluindo experimentos que utilizaram enzimas fibrolíticas durante a ensilagem. Da amostra final, 19 estudos foram conduzidos na China, três no Brasil, dois na Tailândia, um na Finlândia, um na Indonésia, um no Canadá, um na Holanda e um na Bulgária.

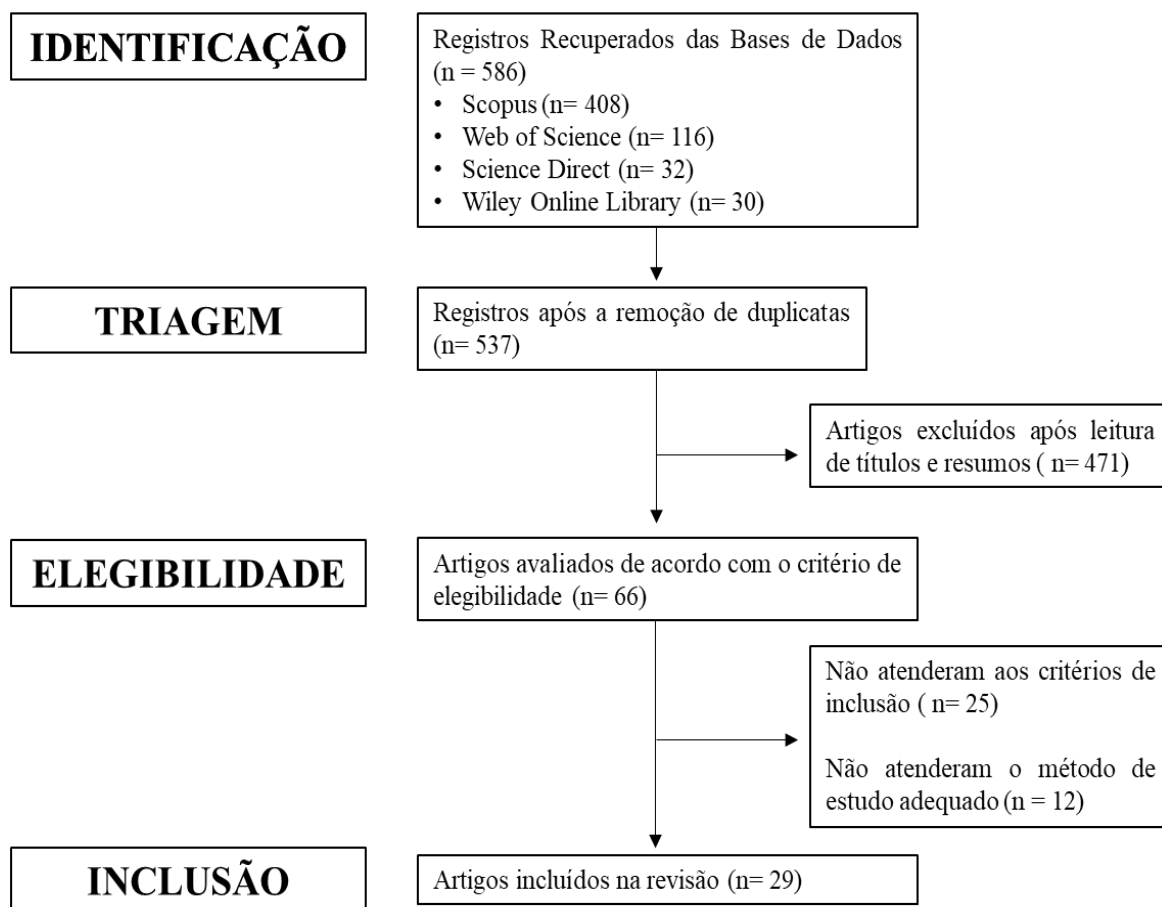


Figura 1. Fluxograma com o processo de seleção da amostra final de silagem para a revisão sistemática.

Os estudos incluídos utilizaram silagens de espécies forrageiras e de resíduos agrícolas, sendo nove com o gênero *Pennisetum*, quatro com Alfafa (*Medicago sativa*), três com milho (*Zea mays* L.), dois com arbusto de ervilha Korshinsk (*Caragana korshinskii* Kom.), um com arbusto de vela (*Cassia Alata*), um com aveia (*Avena sativa* L.), um com grama de centeio chinesa (*Leymus Chinensis*), um com amoreira-do-papel (*Broussonetia papyrifera*), um com cana de açúcar (*Saccharum* spp.), um com sorgo (*Sorghum bicolor*), um com silagem mista de capim Ramie e capim Napier (*Boehmeria nivea* L. Gaud x *Pennisetum purpureum* Schum.), um com cassava (*Manihot esculenta* Crantz), um com silagem mista de amaranto e palha de arroz (*Amaranthus hypochondriacus*), um com *Stylosanthes guianensis*, um com Timothy (*Phleum pratense*), e um com palha de arroz.

O conjunto de 30 experimentos compreendeu uma população de 730 repetições de silagens analisadas entre os grupos experimentais. Os estudos com o gênero *Pennisetum* envolveram 148 repetições; com Alfafa (*Medicago sativa*), 198; com milho (*Zea mays* L.), 30; com arbusto de ervilha Korshinsk (*Caragana korshinskii* Kom.), 38; com arbusto de vela

(*Cassia Alata*), 24; com aveia (*Avena sativa* L.), 24; com grama de centeio chinesa (*Leymus Chinensis*), 6; com amoreira-do-papel (*Broussonetia papyrifera*), 6; com cana de açúcar (*Saccharum* spp.), 50; com sorgo (*Sorghum bicolor*), 50; com silagem mista capim Ramie e capim Napier (*Boehmeria nivea* L. Gaud x *Pennisetum purpureum* Schum.), 80; com cassava (*Manihot esculenta* Crantz), 8; com Silagem mista de amaranto e palha de arroz (*Amaranthus hypochondriacus*), 8; com *Stylosanthes guianensis*, 6; com Timothy (*Phleum pratense*), 4; e com palha de arroz, 50.

Dentre os estudos selecionados 18 utilizaram apenas celulase como tratamento, um utilizou apenas xilanase, oito utilizaram celulase e xilanase, dois utilizaram celulase e hemicelulase, um utilizou celulase, glicosidase, avicelase e xilanase (Tabela 2).

Os períodos de fermentação utilizados nos estudos selecionados foram 1, 2, 3, 5, 6, 7, 14, 15, 21, 27, 30, 40, 45, 60, 65, 70 e 90 dias. Dois estudos utilizaram o tempo de 1 dia de fermentação, um estudo aplicou o período de 2 dias, cinco estudos utilizaram o tempo de 3 dias, um estudo utilizou o tempo de 5 dias, um estudo utilizou o tempo de 6 dias, seis estudos utilizaram o tempo de 7 dias, três estudos utilizaram o tempo de 14 dias, três estudos utilizaram o tempo de 15 dias, dois estudos utilizaram o tempo de 21 dias, um estudo utilizou o tempo de 27 dias, onze estudos utilizaram o tempo de 30 dias, um estudo utilizou o tempo de 40 dias, quatro estudos utilizaram o tempo de 45 dias, treze estudos utilizaram o tempo de 60 dias, um estudo utilizou o tempo de 65 dias, um estudo utilizou o tempo de 70 dias e três estudos utilizaram o tempo de 90 dias.

A análise descritiva evidenciou uma variabilidade elevada nos valores obtidos para composição química e perfil fermentativo das silagens, caracterizada por grande amplitude entre os valores mínimos e máximos em ambos os tratamentos. Essa variabilidade foi observada em diferentes frações nutricionais e nos parâmetros fermentativos avaliados, refletindo a heterogeneidade dos dados incluídos na análise. Os valores médios das variáveis apresentaram dispersão considerável entre os estudos, conforme indicado pelo desvio padrão e pelas amplitudes observadas. Entre as variáveis avaliadas, o pH apresentou menor dispersão relativa dos valores observados entre os estudos, mantendo-se dentro de uma faixa mais restrita quando comparado às demais variáveis (Tabela 3).

Tabela 2: Caracterização dos estudos incluídos na meta-análise com silagens tratadas com enzimas fibrolíticas.

Autor	Espécie / Cultivar	Enzimas	País
Mu <i>et al.</i> (2023)	<i>Medicago sativa</i>	Celulase e xilanase	China
Kozelov <i>et al.</i> (2008)	<i>Medicago sativa</i>	Celulase e xilanase	Bulgaria
Ding <i>et al.</i> (2022)	Palha de Arroz	Celulase e hemicelulase	China
Chen <i>et al.</i> (2022)	<i>P. purpureum</i> schum. cv. Guimu No. 1	Celulase	China
Zhao <i>et al.</i> (2021)	<i>P. purpureum</i> Schum.	Celulase	China
Bai <i>et al.</i> (2023)	<i>C. korshinskii</i> Kom.	Celulase	China
Wu <i>et al.</i> (2025)	<i>P. giganteum</i> z.x.lin	Celulase	China
Xian <i>et al.</i> (2022)	<i>Cassia alata</i>	Celulase	China
Liu <i>et al.</i> (2023)	<i>Avena sativa</i> L.	Celulase e xilanase	China
Xiong <i>et al.</i> (2022)	<i>P. americanum</i> X <i>P. purpureum</i> , HP)	Celulase	China
Guo <i>et al.</i> (2014)	<i>Z. mays</i> L.e H. vulgare L.	Celulase e xilanase	China
Bureenok <i>et al.</i> (2019)	<i>P. purpureum</i> Schum.	Celulase e xilanase	Tailândia
Tian <i>et al.</i> (2014)	<i>Leymus chinensis</i>	Celulase, glicosidase e xilanase	China
Zhang <i>et al.</i> (2022)	<i>B. papyrifera</i> L.	Celulase	China
Mao Li <i>et al.</i> (2014)	<i>P. purpureum</i> Schum.	Celulase	China
Del Valle <i>et al.</i> (2019)	<i>Saccharum</i> spp.	Xilanase	Brasil
Desta <i>et al.</i> (2016)	<i>P. purpureum</i> Schum.	Celulase	China
Mengwei Li <i>et al.</i> (2024)	<i>B. nivea</i> L. Gaud.	Celulase	China
Campana <i>et al.</i> (2023)	<i>Sorghum bicolor</i>	Celulase	Brasil
Kaewpila <i>et al.</i> (2021)	<i>Z. mays</i> L. var. rugose e <i>M. esculenta</i> Crantz	Celulase	Tailândia
Nurjanaa <i>et al.</i> (2011)	<i>P. purpureum</i> Schum.	Celulase	Indonésia
LI Dong-xia <i>et al.</i> (2018)	<i>Medicago sativa</i>	Celulase	China
Jian Ma <i>et al.</i> (2023)	<i>A. hypochondriacus</i> e palha de arroz	Celulase	China
Yixin Zhang <i>et al.</i> (2022)	<i>C. korshinskii</i> Kom.	Celulase	China
Lemos <i>et al.</i> (2020)	<i>P. purpureum</i> Schum.	Celulase e xilanase	Brasil
Mao Li <i>et al.</i> (2017)	<i>Stylosanthes guianensis</i>	Celulase	China
Jaakkola <i>et al.</i> (1991)	<i>Phleum pratense</i>	Celulase e xilanase	Finlândia
Lynch <i>et al.</i> (2014)	<i>Medicago sativa</i>	Celulase e xilanase	Canadá
Spoelstra & Wikselaar (1992)	<i>Zea mays</i> L.	Celulase e hemicelulase	Holanda

Tabela 3. Análise descritiva da composição química e dos parâmetros fermentativos das silagens, com e sem adição de enzimas fibrolíticas.

Variáveis (g/kg MS)	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Tratamento controle				
Matéria seca (g/kg MN)	294,66	89,71	118,0	549,0
Proteína bruta	130,04	58,45	24,40	243,0
Fibra em detergente neutro	591,88	104,09	267,10	812,80
Fibra em detergente ácido	378,29	81,36	166,0	582,67
Celulose	314,70	28,48	281,90	361,0
Hemicelulose	229,42	51,30	116,07	309,10
Carboidratos hidrossolúveis	27,26	21,99	0,84	75,70
Lignina em detergente ácido	69,0	45,41	10,0	158,0
pH	4,48	0,52	3,47	5,91
N-NH ₃ (g/kg NT)	43,31	36,79	0,00035	123,0
Ácido acético	18,22	14,58	0,76	92,20
Ácido lático	39,98	30,22	2,51	105,0
Ácido propiônico	2,18	3,25	0,024	17,0
Ácido butírico	1,94	2,32	1,32	12,0
Tratamento Enzima				
Matéria seca (g/kg MN)	294,26	82,44	105,0	540,0
Proteína bruta	131	63,71	10,30	244,0
Fibra em detergente neutro	546,67	127,95	54,60	776,30
Fibra em detergente ácido	357,0	81,12	31,01	571,6
Celulose	293,77	36,74	222,86	356,0
Hemicelulose	197,47	64,20	100,71	284,5
Carboidratos hidrossolúveis	41,11	29,08	1,99	105,09
Lignina em detergente ácido	75,50	46,53	10,0	202,0
pH	4,33	0,53	3,36	5,98
N-NH ₃ (g/kg NT)	40,82	33,45	0,00032	114,0
Ácido acético	18,77	15,49	0,84	80,70
Ácido lático	41,32	31,17	2,33	143,0
Ácido propiônico	1,94	2,74	0,005	19,55
Ácido butírico	1,56	1,79	0,0	6,88

MN = matéria natural, N-NH₃ = nitrogênio amoniacal, NT = nitrogênio total.

Entre as variáveis da composição química somente a FDN apresentou efeito significativo ($P = 0,0219$) reduzindo de 579,23 g/kg MS no tratamento controle para 515,57 g/kg MS no tratamento com enzimas. A variável FDA mostrou uma tendência de redução ($P = 0,0844$) de 363,57 para 330,94 g/kg MS, assim como a hemicelulose ($P=0,0699$) que reduziu de 219,84 para 192,00 g/kg MS. Não foram observados efeitos significativos relacionados as variáveis de parâmetros fermentativos (Tabela 4).

Tabela 4: Efeito da adição de enzimas fibrolíticas sobre a composição química e os parâmetros fermentativos das silagens.

Variáveis g/kg MS	Tratamento		EPM	Valor de P
	Controle	Enzima		
Matéria seca g/kg MN	298,03	300,92	14,35	0,8874
Proteína bruta	146,76	151,58	10,86	0,7554
Fibra em detergente neutro	579,23*	515,57	19,33	0,0219
Fibra em detergente ácido	363,57	330,94	13,21	0,0844
Celulose	316,61	296,69	9,43	0,1477
Hemicelulose	219,84	192,00	10,59	0,0699
Carboidratos hidrossolúveis	27,45	34,02	4,14	0,2693
Lignina em detergente ácido	64,4914	63,3564	7,26	0,9124
pH	4,5071	4,3735	0,08	0,8874
Nitrogênio amoniacal g/kg NT	45,8216	42,2483	4,51	0,6166
Ácido acético	20,6137	20,8918	1,92	> 0,05
Ácido Lático	49,8110	52,0643	4,49	> 0,05
Ácido Propiônico	1,6192	1,5620	0,50	> 0,05
Ácido Butírico	1,4817	1,3381	0,34	> 0,05

* Indica diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade pelo t de Student.

A análise de meta-regressão demonstrou que o período de fermentação influenciou significativamente a maioria das variáveis de composição química, digestibilidade e do perfil fermentativo da silagem. A FDN não apresentou resposta significativa ($P = 0,8774$), assim como o EE ($P = 0,8472$), CEL ($P = 0,6523$), pH ($P = 0,77329$) e o AL ($P = 0,6396$) (Tabela 5).

Tabela 5. Meta-regressão do período de fermentação sobre as características das silagens.

Variáveis g/kg MS	X	Intercepto	Parâmetro linear estimado	EPM	Valor de P	Parâmetro quadrático estimado	EPM	Valor de P
MS g/kg MN	P.F.	343,19	-2,73	15,74	0,0028	-2,73	0,90	0,0188
MO	P.F.	695,47	9,65	1,84	<0,0001	-0,090	0,02	0,0007
CHS	P.F.	54,87	-0,64	3,84	<0,0001	-	-	-
PB	P.F.	170,74	-2,78	0,79	0,0007	0,033	0,010	0,0025
FDN	P.F.	553,23	20,06	0,22	0,8574	0,0025	0,016	0,8774
FDA	P.F.	350,24	1,69	0,83	0,0422	-0,024	0,010	0,0243
MM	P.F.	225,68	-1,78	0,29	<0,0001	-	-	-
EE	P.F.	16,92	0,31	0,86	0,7237	-0,002	0,011	0,8472
CEL	P.F.	308,98	-0,42	0,71	0,5562	0,004	0,009	0,6523
LDA	P.F.	47,49	2,30	0,56	<0,0001	-0,029	0,007	<0,0001
aFDN	P.F.	1186,51	-12,50	1,79	<0,0001	-	-	-
CNF	P.F.	177,78	0,81	0,95	0,0442	-	-	-
DIVMS	P.F.	1372,32	-48,06	19,90	0,0234	0,60	0,224	0,0129
pH	P.F.	4,44	-0,003	0,005	0,6198	0,00002	0,00006	0,77329
AL	P.F.	41,25	-0,11	0,31	0,7258	0,002	0,003	0,6396
AA	P.F.	11,92	0,21	1,82	<0,0001	-	-	-
AB	P.F.	0,78	0,039	0,010	0,0002	-	-	-
N-NH ₃ g/kg NT	P.F.	0,63	0,033	0,007	<0,0001	-	-	-
AL/AA	P.F.	27,10	1,72	0,882	0,0426	-	-	-

P.F. = Período de fermentação, EPM = erro padrão da média, MS = matéria seca, MO = matéria orgânica, CHS = carboidratos hidrossolúveis, PB = proteína bruta, FDN = fibra em detergente neutro, FDA = fibra em detergente ácido, MM = matéria mineral, EE = extrato etéreo, CEL = celulose, LDA = lignina em detergente ácido, aFDN = fibra em detergente ácido corrigido para amido, CNF = Carboidratos não fibrosos, DIVMS = digestibilidade *in vitro* da matéria seca, AL = ácido lático, AA = ácido acético, AB = ácido butírico, N-NH₃ = nitrogênio amoniacal, AL/AA = relação lactato/acetato.

4. Discussão

As enzimas fibrolíticas empregadas nos estudos analisados compreenderam, principalmente, celulasas, xilanases e hemicelulasas, utilizadas isoladamente ou em combinação, formando complexos enzimáticos de ação complementar sobre os constituintes da parede celular vegetal. A celulase foi o aditivo mais recorrente, presente em 18 dos experimentos avaliados, seguida pela associação celulase + xilanase, utilizada em oito estudos. Essa predominância reflete o amplo uso dessas enzimas em estudos com silagens, em função

de sua reconhecida capacidade de hidrolisar polímeros estruturais da parede celular, convertendo celulose e hemicelulose em açúcares simples passíveis de fermentação microbiana.

As xilanases atuam sobre as ligações β -1,4-xilosídicas da hemicelulose, promovendo a liberação de xilose e oligossacarídeos solúveis, enquanto as celulasas degradam as cadeias de celulose cristalina, reduzindo a integridade da matriz fibrosa e favorecendo a ação de microrganismos fermentadores (Elghandour *et al.*, 2015; Mu *et al.*, 2023; Qiu *et al.*, 2024). Nos experimentos em que as enzimas foram combinadas, observou-se a intenção de ampliar o espectro de ação sobre os polímeros constituintes da parede celular. Esse efeito sinérgico entre enzimas é frequentemente relatado na literatura como fundamental para aumentar a eficiência de hidrólise e a liberação de açúcares fermentescíveis (Hu *et al.*, 2013; Wanmolee *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2024; Qiu *et al.*, 2024).

A adição de enzimas fibrolíticas promoveu alterações positivas nos carboidratos fibrosos da silagem, a redução dos teores de FDN, FDA, celulose e hemicelulose sugere maior degradação da parede celular, liberando frações mais digestíveis e potencialmente aumentando a disponibilidade de energia para os animais (Li *et al.*, 2023; Qiu *et al.*, 2024). O incremento na variável CHO reforça essa interpretação, pois indica maior concentração de açúcares fermentescíveis resultantes da ação enzimática.

Do ponto de vista fermentativo, a redução do pH associada ao aumento do ácido lático e à redução do ácido butírico e do $N-NH_3$ sugere que a aplicação de enzimas contribuiu para uma fermentação mais eficiente (Liu *et al.*, 2023). O menor acúmulo de nitrogênio amoniacal indica menor degradação proteica, o que preserva a qualidade nutricional da silagem (Mu *et al.*, 2023). Assim, os resultados indicam que o uso de enzimas fibrolíticas foi eficaz para reduzir a fração fibrosa e melhorar a fermentação das silagens estudadas.

Os resultados obtidos demonstram que o período de fermentação desempenha papel crucial na determinação da qualidade final da silagem. A redução progressiva da matéria seca, associada ao aumento do nitrogênio amoniacal, evidencia a degradação de compostos solúveis e a intensificação da atividade microbiana ao longo do processo fermentativo. Os processos proteolíticos de origem vegetal e microbiana promovem alterações qualitativas nos compostos nitrogenados das silagens, resultando na conversão de proteína verdadeira em formas nitrogenadas mais solúveis. Nesse contexto, a fermentação leva ao aumento do nitrogênio solúvel, que pode representar entre 55 e 60% do nitrogênio total, bem como do nitrogênio amoniacal, geralmente inferior a 10–15% do nitrogênio total (Kung Jr. *et al.*, 2018). Embora variáveis como a proteína bruta apresentem efeitos quadráticos indicando certa estabilização em etapas posteriores da fermentação, esses resultados sugerem predominantemente

modificações na forma do nitrogênio, associadas às perdas de matéria seca, mais do que reduções quantitativas do nitrogênio total ao longo do tempo.

No que se refere às frações fibrosas, o aumento da FDA e da lignina, em contraste com a ausência de alteração na FDN, sugere concentração relativa de componentes estruturais menos degradáveis, o que contribui para a queda da digestibilidade. Esse resultado é corroborado pela redução da DIVMS, refletindo a menor disponibilidade de nutrientes para os ruminantes à medida que a fermentação se prolonga.

Do ponto de vista fermentativo, a elevação dos ácidos acético, láctico e butírico revela a atividade intensa da microbiota ao longo da ensilagem. O destaque para a relação AL/AA, que aumentou linearmente, indica melhora no perfil fermentativo, uma vez que ainda segundo Kung jr *et al.* (2018), a predominância de ácido láctico é desejável para a rápida redução do pH e estabilização da silagem. Apesar disso, o aumento simultâneo do ácido butírico, embora em menor magnitude, pode sinalizar fermentações secundárias indesejáveis quando o tempo de ensilagem é excessivamente prolongado.

5. Conclusão

A interação entre o tempo adequado de fermentação e o uso de complexos enzimáticos representa estratégia eficaz para otimizar a qualidade fermentativa e a composição química das silagens. A adição de enzimas fibrolíticas reduziu a fração fibrosa da silagem, especialmente a FDN, indicando maior degradação da parede celular e melhor disponibilidade de carboidratos fermentescíveis, com reflexos positivos no perfil fermentativo. A meta-regressão demonstrou que o tempo de fermentação é determinante da qualidade da silagem, promovendo perdas de matéria seca, alterações qualitativas nas frações nitrogenadas e redução da digestibilidade com o avanço da fermentação. Assim, os benefícios das enzimas fibrolíticas estão diretamente condicionados ao adequado manejo do período de ensilagem.

Referencias

- BAI, B. et al. Effects of cellulase and lactic acid bacteria on ensiling performance and bacterial community of *Caragana korshinskii* silage. *Microorganisms*, v. 11, p. 337, 2023. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020337>.
- BEAUCHEMIN, K. A.; COLOMBATTO, D.; MORGAVI, D. P.; YANG, W. Z.; RODE, L. M. Mode of action of exogenous cell wall degrading enzymes for ruminants. *Canadian Journal of Animal Science*, v. 84, n. 1, p. 13–22, 2004. <https://doi.org/10.4141/A02-102>.

BUREENOK, S. et al. Effects of fibrolytic enzymes and lactic acid bacteria on fermentation quality and in vitro digestibility of Napier grass silage. *Italian Journal of Animal Science*, v. 18, n. 1, p. 1438–1444, 2019. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2019.1681910>.

CAMPANA, M. et al. Fibrolytic enzymes increase fermentation losses and reduce fiber content of sorghum silage. *Annals of Animal Science*, v. 23, n. 1, p. 165–172, 2023. <https://doi.org/10.2478/aoas-2022-0038>.

CHEN, C. et al. Effects of Acremonium cellulase and heat-resistant lactic acid bacteria on lignocellulose degradation, fermentation quality, and microbial community structure of hybrid elephant grass silage in humid and hot areas. *Frontiers in Microbiology*, v. 13, p. 1066753, 2022. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1066753>.

COSTA, C. M. et al. Grazing intensity as a management strategy in tropical grasses for beef cattle production: a meta-analysis. *Animal*, v. 15, p. 100192, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100192>.

CYSNEIROS, C. S. S. et al. Efeito de enzimas fibrolíticas sobre a composição bromatológica de silagens de capins tropicais. *Ciência Animal Brasileira*, v. 7, n. 1, p. 1–10, 2006. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/vet/article/view/393>. Acesso em: 10 dez. 2025.

DEL VALLE, T. A. et al. Effects of xylanase on the fermentation profile and chemical composition of sugarcane silage. *The Journal of Agricultural Science*, v. 156, p. 1123–1129, 2018. <https://doi.org/10.1017/S0021859618001090>.

DESTA, S. T.; YUAN, X.; LI, J.; SHAO, T. Ensiling characteristics, structural and nonstructural carbohydrate composition and enzymatic digestibility of Napier grass ensiled with additives. *Bioresource Technology*, v. 221, p. 447–454, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.068>.

DING, H. et al. Effect of fibrolytic enzymes, cellulolytic fungi and lactic acid bacteria on fermentation characteristics, structural carbohydrate composition and in vitro digestibility of rice straw silage. *Fermentation*, v. 8, p. 709, 2022. <https://doi.org/10.3390/fermentation8120709>.

DONG-XI, L. et al. Influence of lactic acid bacteria, cellulase, cellulase-producing *Bacillus pumilus* and their combinations on alfalfa silage quality. *Journal of Integrative Agriculture*, v. 17, n. 12, p. 2768–2782, 2018. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62060-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62060-X).

ELGHANDOUR, M. M. M. Y. et al. Influence of individual or mixed cellulase and xylanase mixture on in vitro rumen gas production kinetics. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences*, v. 39, p. 435–442, 2015.

FURTADO, R. N. et al. Fermentative losses and chemical composition of elephant grass silage added with castor bean hull. *Revista Ciência Agronômica*, v. 50, n. 1, p. 140–147, 2019. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20190017>.

GUO, G. et al. Effects of fibrolytic enzymes, molasses and lactic acid bacteria on fermentation quality of mixed silage. *Grassland Science*, v. 60, p. 240–246, 2014. <https://doi.org/10.1111/grs.12060>.

HU, J. et al. The synergistic action of accessory enzymes enhances the hydrolytic potential of a cellulase mixture. *Biotechnology for Biofuels*, v. 6, p. 112, 2013. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-112>.

JAAKKOLA, S.; HUHTANEN, P.; HISSA, K. The effect of cell wall degrading enzymes or formic acid on fermentation quality and digestion of grass silage by cattle. *Grass and Forage Science*, v. 46, p. 75–87, 1991. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1991.tb02209.x>.

JESUS, M. A. et al. Effects of microbial inoculant and fibrolytic enzymes on fermentation quality and nutritional value of BRS Capião grass silage. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 42, n. 3, supl. 1, p. 1837–1852, 2021. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2021v42n3Supl1p1837>.

KAEWPILA, C.; THIP-UTEN, S.; CHERDTHONG, A.; KHOTA, W. Impact of cellulase and lactic acid bacteria inoculant to modify ensiling characteristics and in vitro digestibility of sweet corn stover and cassava pulp silage. *Agriculture*, v. 11, p. 66, 2021. <https://doi.org/10.3390/agriculture11010066>.

KHOTA, W.; PHOLSEN, S.; HIGGS, D.; CAI, Y. Natural lactic acid bacteria population of tropical grasses and their fermentation factor analysis of silage prepared with cellulase and inoculant. *Journal of Dairy Science*, v. 99, p. 9768–9781, 2016. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11180>.

KOZELOV, L. K.; ILIEV, F.; HRISTOV, A. N.; ZAMAN, S.; MCALLISTER, T. A. Effect of fibrolytic enzymes and an inoculant on in vitro degradability and gas production of low-dry matter alfalfa silage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 88, p. 2568–2575, 2008. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3393>.

KUNG JR., L.; SHAVER, R. D.; GRANT, R. J.; SCHMIDT, R. J. Silage review: interpretation of chemical, microbial, and organoleptic components of silages. *Journal of Dairy Science*, v. 101, p. 4020–4033, 2018. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13909>.

LEMOS, M. F. et al. Nutritional value, fermentation losses and aerobic stability of elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum.) silage treated with exogenous fibrolytic enzymes. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, v. 42, e48272, 2020. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v42i1.48272>.

LI, L.; XIE, X.; ZHAO, G.; HE, J.; ZHANG, Y. The effects of applying cellulase and laccase on fermentation quality and microbial community in mixed silage containing corn stover and wet brewer's grains. *Frontiers in Plant Science*, v. 15, p. 1441873, 2024. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1441873>.

LI, M. et al. Fibrolytic enzymes and lactic acid bacteria improve the ensiling characteristics of ramie and elephant grass mixed silage. *Agriculture*, v. 14, p. 1746, 2024. <https://doi.org/10.3390/agriculture14101746>.

LI, M.; ZHOU, H.; ZI, X.; CAI, Y. Silage fermentation and ruminal degradation of stylo prepared with lactic acid bacteria and cellulase. *Animal Science Journal*, v. 88, p. 1531–1537, 2017. <https://doi.org/10.1111/asj.12795>.

LI, M. et al. Effects of sucrose, glucose, molasses and cellulase on fermentation quality and in vitro gas production of king grass silage. *Animal Feed Science and Technology*, v. 197, p. 206–212, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.06.016>.

LIU, W. et al. Effects of cellulase and xylanase addition on fermentation quality, aerobic stability, and bacteria composition of low water soluble carbohydrates oat silage. *Fermentation*, v. 9, p. 638, 2023. <https://doi.org/10.3390/fermentation9070638>.

LYNCH, J. P. et al. The effect of exogenous fibrolytic enzymes and a ferulic acid esterase-producing inoculant on the fibre degradability, chemical composition and conservation characteristics of alfalfa silage. *Animal Feed Science and Technology*, v. 193, p. 21–31, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.03.013>.

MA, J. et al. Lactic acid bacteria and cellulase improve the fermentation characteristics, aerobic stability and rumen degradation of mixed silage prepared with amaranth and rice straw. *Fermentation*, v. 9, p. 853, 2023. <https://doi.org/10.3390/fermentation9090853>.

- MU, L. et al. Effects of cellulase and xylanase on fermentative profile, bacterial diversity, and in vitro degradation of mixed silage of agro-residue and alfalfa. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, v. 10, p. 24, 2023. <https://doi.org/10.1186/s40538-023-00409-4>.
- MUCK, R. E. Silage microbiology and its control through additives. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 39, p. 183–191, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010001300021>.
- NURJANAA, D. J.; SUHARTI, S.; SURYAHADI. Improvement of Napier grass silage nutritive value by using inoculant and crude enzymes from *Trichoderma reesei* and its effect on in vitro rumen fermentation. *Media Peternakan*, v. 39, n. 1, p. 46–52, 2016. <https://doi.org/10.5398/medpet.2016.39.1.46>.
- PETTICREW, M. et al. Synthesizing evidence on complex interventions: how meta-analytical, qualitative, and mixed-method approaches can contribute. *Journal of Clinical Epidemiology*, v. 66, p. 1230–1243, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2013.06.005>.
- RIBEIRO, D. M. et al. The application of omics in ruminant production: a review in the tropical and sub-tropical animal production context. *Journal of Proteomics*, v. 227, p. 103905, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2020.103905>.
- SPOELSTRA, S. F.; VAN WIKSELAAR, P. G. The effects of ensiling whole crop maize with a multi-enzyme preparation on the chemical composition of the resulting silages. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 60, p. 223–228, 1992. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740600210>.
- TIAN, J. et al. Effects of lactic acid bacteria inoculants and cellulase on fermentation quality and in vitro digestibility of *Leymus chinensis* silage. *Grassland Science*, v. 60, p. 199–205, 2014. <https://doi.org/10.1111/grs.12059>.
- WANMOLEE, W. et al. Biochemical characterization and synergism of cellulolytic enzyme system from *Chaetomium globosum* on rice straw saccharification. *BMC Biotechnology*, v. 16, p. 82, 2016. <https://doi.org/10.1186/s12896-016-0312-7>.
- WU, Z. et al. Effects of cellulase and *Lactiplantibacillus plantarum* on chemical composition, fermentation characteristics, and bacterial community of *Pennisetum giganteum* silage. *Agriculture*, v. 15, p. 97, 2025. <https://doi.org/10.3390/agriculture15010097>.

XIAN, Z. et al. Effects of cellulase and *Lactiplantibacillus plantarum* on the fermentation parameters, nutrients, and bacterial community in *Cassia alata* silage. *Frontiers in Microbiology*, v. 13, p. 926065, 2022. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.926065>.

XIONG, H. et al. Effects of cellulase, *Lactobacillus plantarum*, and sucrose on fermentation parameters, chemical composition, and bacterial community of hybrid *Pennisetum* silage. *Fermentation*, v. 8, p. 356, 2022. <https://doi.org/10.3390/fermentation8080356>.

ZHANG, Y. et al. Lignocellulose conversion of ensiled *Caragana korshinskii* facilitated by *Pediococcus acidilactici* and cellulases. *Microbial Biotechnology*, v. 16, p. 432–447, 2022. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14130>.

ZHANG, Y.-C. et al. Effects of microbial inoculants on fermentation quality and aerobic stability of paper mulberry silages prepared with molasses or cellulase. *Fermentation*, v. 8, p. 167, 2022. <https://doi.org/10.3390/fermentation8040167>.

ZHAO, G. et al. Effects of applying cellulase and starch on the fermentation characteristics and microbial communities of Napier grass (*Pennisetum purpureum* Schum.) silage. *Journal of Animal Science and Technology*, v. 63, n. 6, p. 1301–1313, 2021. <https://doi.org/10.5187/jast.2021.e107>.

CAPÍTULO II

Blend de enzimas fibrolíticas na ensilagem de capim-elefante BRS Capiçu

RESUMO

Objetivou-se avaliar o efeito da adição de um *blend* de enzimas fibrolíticas sobre a composição química, o perfil fermentativo, a estabilidade aeróbica e a digestibilidade *in vitro* da matéria seca (DIVMS) da silagem de capim-elefante BRS Capiçu. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com seis repetições, utilizando doses de 0, 2, 4 e 6 g/kg de matéria seca (MS) do complexo enzimático Fiberzyme®. O capim foi colhido aos 90 dias de rebrota e ensilado em minisilos de PVC. A inclusão do complexo enzimático não alterou a maioria das variáveis avaliadas ($P > 0,05$). No entanto, observou-se resposta quadrática para a fibra em detergente ácido (FDA) ($P = 0,0386$) e tendência quadrática para a fibra em detergente neutro (FDN) ($P = 0,0859$) e os nutrientes digestíveis totais (NDT) ($P = 0,0875$), com melhores resultados na dose intermediária de 2 g/kg MS. Conclui-se que a aplicação do complexo de enzimas fibrolíticas até 0,2% da matéria seca promove melhorias pontuais na qualidade da silagem de capim-elefante BRS Capiçu, especialmente pela redução das frações fibrosas e tendência de aumento do valor energético, sem comprometer o perfil fermentativo ou a estabilidade aeróbica.

Palavras-chave: ácidos orgânicos; celulase; composição química; digestibilidade da fibra; hemicelulase; teor de fibra; *Pennisetum purpureum* Schum.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effect of adding a blend of fibrolytic enzymes on the chemical composition, fermentative profile, aerobic stability, and in vitro dry matter digestibility (IVDMD) of BRS Capiacu elephant grass silage. The experiment was conducted in a completely randomized design with six replicates, using enzyme complex (Fiberzyme®) doses of 0, 2, 4, and 6 g/kg of dry matter (DM). The forage was harvested at 90 days of regrowth and ensiled in PVC mini silos. The inclusion of the enzyme complex did not affect most of the evaluated variables ($P > 0.05$). However, a quadratic response was observed for acid detergent fiber (ADF) ($P = 0.0386$), as well as a quadratic trend for neutral detergent fiber (NDF) ($P = 0.0859$) and total digestible nutrients (TDN) ($P = 0.0875$), with the best results observed at the intermediate dose of 2 g/kg DM. It is concluded that the application of the fibrolytic enzyme complex up to 0.2% of dry matter promotes specific improvements in the quality of BRS Capiacu elephant grass silage, particularly through the reduction of fiber fractions and a trend toward increased energy value, without compromising the fermentative profile or aerobic stability.

Keywords: cellulase; chemical composition; fiber content; fiber digestibility; hemicellulose; organic acids; *Pennisetum purpureum* Schum.

1. Introdução

As condições climáticas das regiões tropicais impactam diretamente a produção de ruminantes, baixos índices pluviométricos com distribuição desuniforme dificultam o estabelecimento de grande parte das culturas agrícolas tradicionais (Cordeiro *et al.*, 2021). Esta característica concentra a disponibilidade e a qualidade do alimento em pequena parte do ano.

Uma alternativa aplicável, a fim de se lidar com estes déficits sazonais de disponibilidade de alimentos, é a conservação do excedente forrageiro, sendo a técnica de ensilagem a mais usual (Wilkinson & Rinne, 2017; Cordeiro *et al.*, 2021). Para tanto, é importante que o processo de ensilagem do material seja eficiente para que ocorra uma fermentação desejável e ampla preservação de valor nutricional após a abertura do silo (McDonald *et al.*, 1991; Abreu *et al.*, 2024)

O capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) apresenta-se como uma forrageira de destaque em regiões tropicais e subtropicais, em função de seu alto potencial de produção de matéria seca (MS) (30 - 50 t/ha⁻¹ ao ano), bom valor nutritivo, boa aceitabilidade pelos animais, vigor e persistência (Alcântara *et al.*, (1980); Filho *et al.*, (2000); Santos *et al.*, (2001) Pereira *et al.*, 2021).

Entre os clones de capim-elefante, a cultivar BRS Capiáu tem se destacado pelo alto acúmulo de biomassa, com produtividade anual que em condições ideais varia de 50 a 72 t ha⁻¹ de MS ou aproximadamente 300 t ha⁻¹ de matéria verde, considerando três cortes ao ano. Esses números superam em cerca de 30% os rendimentos de outras cultivares do mesmo gênero (Monção *et al.*, 2019; Jesus *et al.*, 2021; Pereira *et al.*, 2021).

Gramíneas tropicais são reconhecidas como materiais de difícil ensilagem, principalmente em função da baixa concentração de matéria seca (< 300 g/kg de MS) e do reduzido teor de carboidratos solúveis em água disponíveis para a fermentação em muitas situações de manejo (< 40 g/kg de MS) (Piltz *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2025).

De maneira semelhante, o capim-elefante BRS Capiáu apresenta limitações para a produção de silagens de alta qualidade, destacando-se os baixos teores de matéria seca no momento do corte, frequentemente em torno de 20%, valor inferior ao intervalo considerado ideal para uma ensilagem eficiente (28–34%) (Retore *et al.*, 2020). Embora valores de carboidratos solúveis em água entre 60 e 90 g/kg de MS tenham sido reportados para o BRS Capiáu em determinadas condições de cultivo (Lelis *et al.*, 2025), a elevada umidade da forragem e a alta proporção de parede celular podem comprometer a utilização eficiente desses açúcares durante a fermentação.

Além disso, gramíneas oriundas de zonas tropicais e subtropicais geralmente apresentam altos teores de lignina e celulose, frações que apresentam digestibilidade bastante limitada (McDonald *et al.*, 1991; Zhao *et al.*, 2021). Por isso, torna-se recomendável a aplicação de aditivos que favoreçam a fermentação anaeróbica e contribuam para melhorar o valor nutricional da silagem produzida (Furtado *et al.*, 2019; Lemos *et al.*, 2020).

Nesse cenário, o uso de aditivos biotecnológicos como as enzimas fibrolíticas na nutrição de ruminantes tem se tornado uma prática frequente, dado seu potencial de aumentar a digestibilidade da fibra e, conseqüentemente, a ingestão de energia digestível pelos animais (Beauchemin *et al.*, 2003; Bureenok *et al.*, 2019). Assim, o uso de enzimas como aditivos na ensilagem surge como uma alternativa promissora para melhorar as características fermentativas e nutricionais da silagem. A adição de enzimas fibrolíticas durante a ensilagem tem sido proposta com o objetivo de otimizar a degradação da fração fibrosa da forragem, aumentando a disponibilidade de substratos fermentescíveis para o crescimento e atividade das bactérias ácido-láticas (Dehghani *et al.*, 2012; Desta *et al.*, 2016).

Com isso surge a hipótese de que a adição de enzimas fibrolíticas até a dose de 6g/kg MS no processo de ensilagem aumenta a degradação da fibra, melhorando desta forma o padrão fermentativo e a qualidade nutricional da silagem produzida. Para testar essa ideia, a pesquisa foi desenvolvida com o objetivo de avaliar o efeito da adição de um *blend* enzimático sobre a qualidade da silagem de capim-elefante BRS Capiacu, nas características fermentativas, composição química, produção de ácidos orgânicos, estabilidade aeróbica e digestibilidade *in vitro* da matéria seca (DIVMS).

2. Metodologia

2.1 Local do experimento

O experimento foi conduzido no município de Bom Jesus, estado do Piauí, Brasil, localizado na região sul do estado, na microrregião do Alto-Médio Gurguéia. A área experimental situa-se nas coordenadas geográficas de 09°04'28" de latitude sul, 44°21'31" de longitude oeste, a uma altitude de 277 m. De acordo com a classificação climática proposta por Holanda e Medeiros (2019), o clima da região é do tipo Aw, caracterizado como tropical, com estação seca bem definida no período de inverno. A gramínea forrageira utilizada no estudo foi colhida em uma área de pastagem pertencente à Fazendinha do Colégio Técnico de Bom Jesus (CTBJ).

2.2. Tratamentos e desenho experimental

Adotou-se um delineamento inteiramente casualizado (DIC), com quatro tratamentos e seis repetições. Os tratamentos consistiram na aplicação de diferentes doses do complexo enzimático comercial Fiberzyme® (Zeus Biotech, Índia), nas doses de 0, 2, 4 e 6 g/kg MS. O produto apresenta, por quilograma, a seguinte composição: 8×10^6 unidades internacionais (UI) de hemicelulase, 2×10^5 UI de celulase, 5×10^5 UI de pectinase, 5×10^5 UI de galactosidase e 5×10^5 UI de mananase.

2.3. Produção da silagem

A gramínea foi colhida manualmente após 90 dias de rebrota, e em seguida reduzida a partículas de aproximadamente 2 cm em ensiladeira estacionária. Após esse processo foi adicionado farelo de trigo ao material na proporção de 11,1% da matéria natural ensilada, como aditivo sequestrante de umidade para aumentar o teor de MS do Capiáçu até 30%.

Tabela 1. Composição química do capim elefante BRS Capiáçu (*Pennisetum purpureum* Schum.), farelo de trigo e mistura BRS Capiáçu + farelo de trigo antes da ensilagem

Variáveis (g/kg MS)	BRS Capiáçu	Farelo de trigo	BRS Capiáçu + Farelo de trigo
Matéria seca (g/kg MN)	226,7	956,7	307,7
Matéria Mineral	58,24	57,37	58,1
Proteína bruta	57,65	164,9	69,6
Fibra em detergente neutro	761,1	422,2	723,5
Fibra em detergente ácido	554,2	132,7	507,4
Nutrientes digestíveis totais	638,3	758,6	651,7

MS = matéria seca, MN = matéria natural

Realizou-se a pesagem de cada dose do *blend* enzimático que em seguida foram espalhadas ainda em pó sobre o material fresco de cada tratamento. Em seguida, a mistura foi acondicionada em minisilos experimentais de PVC, com dimensões de 40 cm de altura e 10 cm de diâmetro. No fundo de cada minisilo foi adicionado 400g de areia, separado da forragem por um tecido de TNT e telas de polímero 100% em polipropileno, para captação do efluente proveniente do material ensilado. O processo de compactação para retirada do oxigênio foi

realizado manualmente com o auxílio de bastões compactadores feitos de madeira. A densidade foi de 800 kg de matéria natural por m³.

Amostras da matéria *in natura* foram colhidas e conservadas para análises. Os silos foram abertos após 76 dias e coletou-se amostras da silagem produzida para análises posteriores.

2.4 Perdas e recuperação da matéria seca da silagem

Para a realização dos cálculos de perdas de MS os silos foram pesados vazios e sem vedação, para que logo em seguida fossem preenchidos com a forragem e fechados hermeticamente, sendo pesados novamente após a vedação. A recuperação e perdas de MS na silagem (% da MS inicial) como gás e efluente foram determinadas conforme descrito por Jobim *et al.* (2007).

A recuperação da MS foi calculada utilizando a Equação 1:

$$RMS = \frac{(M_{Fab} \times MS_{ab})}{(M_{Ffe} \times MS_{fe})} \times 100$$

Onde M_{Fab} é a massa de forragem na abertura; MS_{ab} é o teor de MS na abertura; M_{Ffe} é a massa de forragem no fechamento, e MS_{fe} é o teor de MS da forragem no fechamento.

As perdas por gases (% da MS inicial) foram calculadas utilizando a Equação 2:

$$PG = \frac{[(PS_f - PS_a)]}{M_{Ff} \times MS_f} \times 100$$

Onde PS_f é o peso do silo na ensilagem; PS_a é o peso do silo na abertura; M_{Ff} é a massa de forragem na ensilagem; MS_f é o teor de MS da forragem na ensilagem.

As perdas por efluente (kg/t de massa verde) foram calculadas utilizando a Equação 3:

$$E = \frac{(P_{ab} - P_{en})}{(MV_{fe})} \times 1000$$

Onde P_{ab} é o peso do conjunto (silo + areia + pano + tela) na abertura do silo (kg); P_{en} é o Peso do conjunto (silo + areia + pano + tela) na ensilagem (kg), e MV_{fe} é a massa verde de forragem ensilada (kg).

2.5. pH, capacidade tampão, nitrogênio amoniacal e ácidos orgânicos

A determinação do pH foi realizada coletando-se 10 g de amostra do material ensilado de cada tratamento, o qual é adicionado em 90 mL de água destilada. Após 1 hora, realizou-se a leitura com potenciômetro, de acordo com a metodologia descrita por Bolsen *et al.* (1992).

A determinação da capacidade tampão (CT) da silagem foi realizada utilizando a metodologia descrita por Playne e McDonald (1966) e Mizubuti *et al.* (2009). Os valores finais foram obtidos pela equação 4:

$$CATP = \frac{0,1 * (Va - Vb)}{PA} * 100$$

Em que CATP é a capacidade tampão em e.mg NaOH/100 g MS, 0.1 é a normalidade do NaOH, Va é o volume de NaOH gasto para mudar o pH da amostra de 4,0 para 6,0, Vb é o volume de NaOH gasto para mudar o pH do branco de 4,0 para 6,0, PA peso da amostra seca = [(peso da amostra * MS) /100].

Para a determinação de N-NH₃ das amostras, foi utilizada a metodologia de destilação em vapor (método N007/2) conforme Detmann *et al.* (2021). Os valores finais foram obtidos pela equação 5:

$$N - NH_3 = \frac{V * Fc * 0,00028}{PA} * 100$$

Em que N-NH₃ é o Nitrogênio amoniacal em %, Fc é o fator de correção do H₂SO₄, PA é o peso da amostra seca (g) em 2mL, 0,00028 é o equivalente de H₂SO₄ correspondente ao nitrogênio.

O valor de PA foi obtido pela equação 6:

$$PA = \frac{MS(\%) * (peso da amostra em 2ml)}{100}$$

Em que MS é a matéria seca total da amostra em %, peso da amostra em 2mL é o peso da amostra fresca (g)/60 mL x 2mL. O resultado do nitrogênio amoniacal é dado em função da porcentagem do nitrogênio total.

As concentrações dos ácidos orgânicos foram obtidas de acordo com a metodologia descrita por Kung e Ranjit (2001), onde foram pesados 10 g de cada amostra de silagem, que foram adicionados em 90 ml de água destilada, homogeneizados em liquidificador por 1 minuto e posteriormente filtrados utilizando uma peneira. Em seguida, retirou-se 10 ml de cada filtrado, aos quais foram adicionados 50 uL de ácido sulfúrico a 50%. A mistura foi acondicionada em tubos do tipo *falcon*.

Em tubos *epENDORF* foram pipetados 2mL da solução e adicionado 1mL de solução de ácido metafosfórico a 20%. A mistura foi então submetida à centrifugação por 15 minutos a 13.000 rpm.

Após a centrifugação, os sobrenadantes foram filtrados em filtro de seringa PVDF com porosidade de 0,22 µm enquanto eram transferidos para frascos do tipo *vial* de 1,5 ml e

armazenados em refrigerador. Visando à quantificação dos ácidos orgânicos por meio da técnica de cromatografia líquida de alto desempenho (HPLC; SHIMADZU, SPD-10A VP), conforme descrito por Siegfried *et al.* (1984). O sistema de HPLC utilizou um detector por ultravioleta utilizando um comprimento de onda de 210 nm, acoplado a uma coluna HPX-87H (BIORAD, CA, EUA), com fase móvel composta por água em 0,005 MM de ácido sulfúrico.

2.6. Composição química

As amostras para determinação da composição química foram pré-secas em estufa de circulação forçada de ar, em temperatura de 60 ± 5 °C, até alcançar peso constante. Foram realizadas as determinações do teor de MS, matéria mineral (MM), proteína bruta (PB) e extrato etéreo (EE) segundo os métodos descritos pela AOAC (2005); a fibra em detergente neutro (FDN) e fibra em detergente ácido (FDA) segundo Van Soest; Robertson; Lewis, (1991). Carboidratos não fibrosos (CNF) foram estimados seguindo a metodologia proposta por Sniffen *et al.* (1992). O teor de nutrientes digestíveis totais (NDT) foi determinado com base nas recomendações da NRC (2001).

Para se determinar a concentração de carboidratos solúveis totais (CST), utilizou-se o método do ácido sulfúrico concentrado, descrito por Dubois *et al.* (1956), com adaptações de Corsato *et al.* (2008), posteriormente, ajustado com base na matéria seca de cada amostra utilizada.

Inicialmente, foi preparada uma solução de etanol, obtida pela diluição de 800 mL de álcool absoluto em 200 mL de água destilada, utilizando-se uma proveta de 1000 mL. Em seguida, amostras de silagem, foram pesadas (0,050 g) e transferidas para balões volumétricos de 50 mL, os quais tiveram seu volume completado com a solução etanólica a 80% até a marca. Os balões foram vedados com tampas plásticas e protegidos com filme plástico para evitar volatilização, sendo posteriormente submetidos a banho-maria por 30 minutos a 80 °C.

Após o aquecimento, o conteúdo foi homogeneizado e filtrado com auxílio de tecido não tecido (TNT), sendo o filtrado transferido para uma proveta de 100 mL, com posterior adição de água destilada até completar o volume. O extrato etanólico obtido foi transferido para frascos com tampa, a fim de evitar perdas por volatilização. Na sequência, alíquotas de 1 mL do extrato etanólico foram transferidas para tubos de ensaio com tampa rosqueável, aos quais se adicionaram 0,5 mL de solução de fenol a 5% e 2,5 mL de ácido sulfúrico concentrado. A manipulação desses reagentes foi realizada em capela de exaustão e com o uso de equipamentos de proteção individual. Após a adição dos reagentes, os tubos foram homogeneizados em vórtex e mantidos em repouso até resfriamento à temperatura ambiente.

Para a quantificação dos carboidratos solúveis, foi construída uma curva padrão utilizando-se soluções de glicose a 0,01%, em concentrações crescentes (0; 0,0015; 0,0030; 0,0045; 0,0060; 0,0075; 0,0090; 0,0105 g/100 mL). As leituras de absorbância foram realizadas em espectrofotômetro a 490 nm.

2.7. Estabilidade Aeróbia

Após a abertura dos silos, as silagens dos diferentes tratamentos foram acondicionadas em baldes plásticos e levados para uma sala fechada com controle térmico, cuja temperatura (25°C) foi averiguada com auxílio de termômetro posicionado próximo a silagem. Para a avaliação da estabilidade aeróbica, foi conferida a temperatura superficial e do interior da massa das silagens nos tempos 0, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44, 48, 56, 64, 72, 80, 88 e 96 horas após a abertura dos silos.

A temperatura superficial da silagem foi aferida com auxílio de termômetro infravermelho (Formis, FOR-400), enquanto a temperatura interna foi obtida com um termômetro digital tipo espeto (Incoterm, 9791.16.2.01), inserido a 10 cm no centro da silagem. A estabilidade aeróbica foi calculada como o tempo observado para que a silagem, após exposição ao ar, apresente aumento de 2 °C em relação à temperatura ambiente, de acordo com Kung jr e Ranjit (2001) e Taylor *et al.* (2002).

2.8. Digestibilidade *in vitro* da matéria seca (DIVMS)

As análises foram realizadas no Laboratório de Nutrição Aplicada da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS). A digestibilidade *in vitro* da MS (DIVMS) foi determinada de acordo com a metodologia de Tilley e Terry (1963), adaptada ao sistema Ankom Daisy (Ankom Technology Corp., Macedon, NY, EUA).

2.9. Análise estatística

A análise dos dados foi realizada no software SAS v. 9.3[®] (Cary, Carolina do Norte) utilizando um modelo misto (PROC MIXED). Os dados foram submetidos à análise de variância levando em consideração o modelo:

$$Y_{ij} = \mu + D_i + \varepsilon_{ij}$$

Onde Y_{ij} = valor observado na dose de inclusão do complexo enzimático i , na repetição j ; μ = efeito médio geral; D_i = dose de inclusão do complexo enzimático ($i = 0, 2, 4$ e 6 g/Kg MS); ε_{ij} = erro aleatório, associado a cada observação i e j .

As médias foram analisadas por regressão de primeiro grau: $y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon_{ij}$, e segundo grau: $y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \varepsilon_{ij}$. Onde y_{ij} = valor observado; β_0 , β_1 e β_2 = parâmetros da equação; X = doses de inclusão do complexo enzimático; ε_{ij} = erro aleatório associado a cada valor observado i e j . Adotou-se significativo quando $P < 0,05$ e tendência quando $P > 0,05$ e $< 0,1$ em todas as variáveis analisadas.

3. Resultados

Para as variáveis CT, perdas e recuperação da MS, não foram observados efeitos significativos dos tratamentos. No entanto observou-se tendência de redução linear do pH ($P=0,0588$) e do N-NH₃ ($P=0,0940$) com o aumento das doses do *blend* de enzimas fibrolíticas (Tabela 2).

Tabela 2. Perdas, recuperação de MS e características fermentativas da silagem de capim-elefante BRS Capiacu (*Pennisetum purpureum* Schum.) com adição de enzimas fibrolíticas

Variáveis	Dose (g/kg MS)				EPM	Valor de P	
	0	2	4	6		L	Q
Perdas por efluentes (kg/t MV)	37,32	52,16	29,42	60,68	29,78	0,5256	0,4417
Perdas por gases (% da MS inicial)	9,62	12,45	7,42	8,94	4,91	0,5093	0,4896
Recuperação da MS (%)	86,88	82,84	89,76	85,40	3,66	0,7544	0,7951
pH	3,51	3,50	3,47	3,46	0,042	0,0588	0,1748
N-NH ₃ (% N Total)	3,17	3,34	2,58	2,90	0,405	0,0940	0,1381
CT (mEq/kg MS)	46,93	49,55	48,25	46,15	5,197	0,7036	0,5044

EPM: erro padrão da média; Valor de P: probabilidade de efeito significativo para as equações lineares (L) e quadráticas (Q); MV: massa verde; MS: matéria seca; N-NH₃: nitrogênio amoniacal; CT: Capacidade tampão.

A adição de enzimas fibrolíticas à silagem de capim-elefante BRS Capiacu não resultou em diferenças nos teores de ácidos orgânicos ($P > 0,05$) (Tabela 3).

No que se refere à composição química da silagem, não houve influência do *blend* de enzimas fibrolíticas na maioria das variáveis ($P > 0,05$). Entretanto observou-se efeito de redução quadrática sobre o EE ($P = 0,0255$), com ponto máximo no tratamento com 2 g/kg MS (28,1 g/kg MS) e mínimo no tratamento com 6 g/kg MS (24,8 g/kg MS). De maneira

semelhante, a FDA apresentou efeito quadrático de aumento ($P = 0,0386$), com ponto máximo no tratamento com 6 g/kg MS (280,6 g/kg MS) e mínimo no tratamento com 2 g/kg MS (257,0 g/kg MS).

Tabela 3. Teor de ácidos orgânicos na silagem de capim-elefante BRS Capiacu (*Pennisetum purpureum* Schum.) com adição de *blend* enzimático.

Item (g/kg MS)	Dose (g/kg MS)				EPM	Valor de P	
	0	2	4	6		L	Q
Ácido láctico	18,81	20,76	22,05	20,77	2,737	0,2535	0,2649
Ácido acético	6,25	6,54	6,99	6,04	1,028	0,9472	0,5117
Ácido propiônico	2,65	2,59	2,73	2,55	0,867	0,9460	0,9899
Ácido butírico	1,08	1,10	0,70	0,92	1,627	0,7199	0,7446
Relação acetato:propionato	2,75	2,74	2,62	2,45	0,732	0,5456	0,8201
Relação lactato:acetato	3,07	3,20	3,20	3,49	0,535	0,2953	0,5614

EPM: erro padrão da média; Valor de P: probabilidade de efeito significativo para as equações lineares (L) e quadráticas (Q).

As variáveis FDN e NDT apresentaram tendências quadráticas de elevação e de redução respectivamente ($P = 0,0859$; $P = 0,0875$). No tratamento com adição de 2 g/kg MS observou-se os menores valores para FDN (479,4 g/kg MS) e FDA (257,0 g/kg MS). Simultaneamente, essa dose proporcionou concentrações mais elevadas de CNF (364,7 g/kg MS) e NDT (627,6 g/kg MS) (Tabela 4).

Não foi observado efeito ($P > 0,05$) das doses do *blend* enzimático sobre a estabilidade aeróbia das silagens. É importante destacar que, em nenhum dos níveis enzimáticos, houve elevação da temperatura da massa ensilada superior a 2 °C em relação à temperatura ambiente ao longo do período de exposição (Figura 1).

Tabela 4. Composição química e digestibilidade *in vitro* da matéria seca da silagem de capim-elefante BRS Capiáu (Pennisetum purpureum Schum.) com adição de *blend* enzimático.

Variáveis (g/Kg de MS)	Dose (g/kg MS)				EPM	Valor de P	
	0	2	4	6		L	Q
Matéria seca (% da MN)	284,9	272,7	288,9	283,7	7,277	0,7772	0,7205
Matéria Mineral	59,6	61,8	61,1	61,1	0,741	0,3272	0,5884
Proteína bruta	65,6	65,7	67,7	65,1	0,698	0,8833	0,7644
Extrato etéreo	28,0	28,1	25,7	24,8	1,084	0,0257	0,0255
Fibra em detergente neutro	488,0	479,4	494,7	499,3	6,385	0,1270	0,0859
Fibra em detergente ácido	259,9	257,0	273,8	280,6	8,067	0,0449	0,0386
Carboidratos não-fibrosos	358,7	364,7	350,6	349,6	6,555	0,1923	0,1715
Carboidratos solúveis totais	92,8	101,5	50,0	103,8	13,75	0,9431	0,7059
Nutrientes digestíveis totais	621,0	627,6	615,8	612,4	4,879	0,1287	0,0875
DIVMS	710,3	646,2	724,5	712,9	2,334	0,5476	0,2390

EPM: erro padrão da média; MS: matéria seca; MN: matéria natural; L: equações lineares; Q: equações quadráticas; DIVMS: digestibilidade *in vitro* da matéria seca.

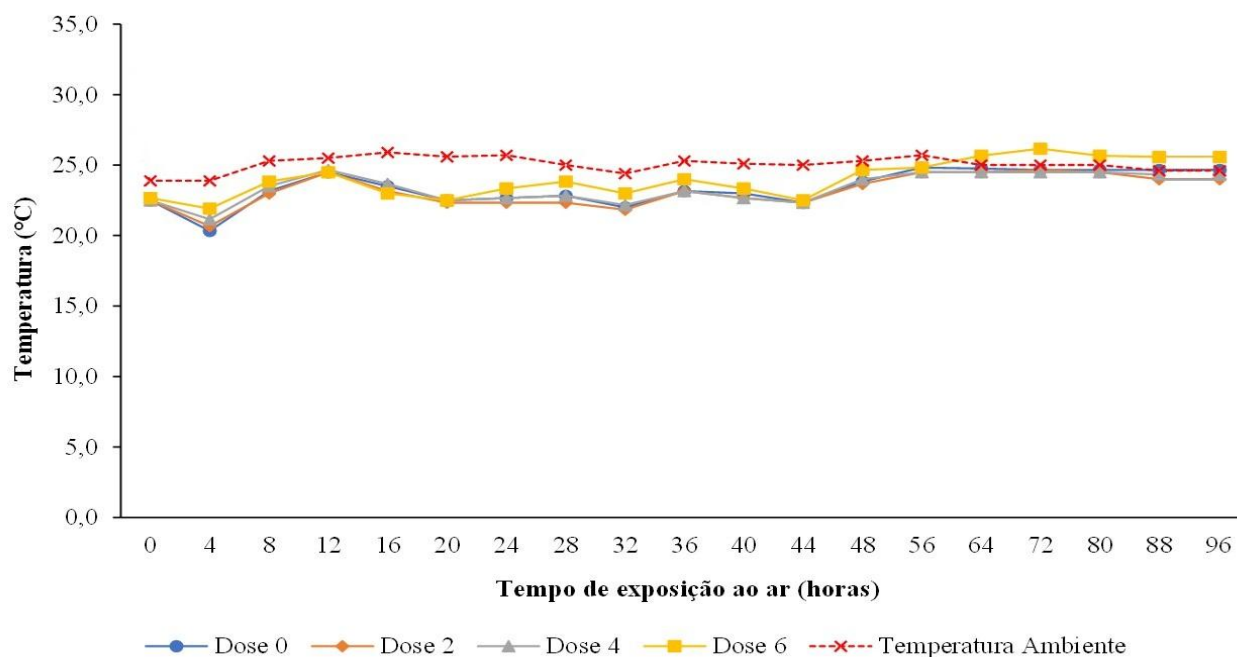


Figura 1. Estabilidade aeróbia da silagem de capim-elefante BRS Capiáu com adição de diferentes doses de enzimas fibrolíticas.

4. Discussão

As perdas de MS durante a ensilagem são indesejáveis; contudo, em silagens de gramíneas tropicais, é comum observar valores próximos de 80 kg/t⁻¹ MN (Monção *et al.*, 2024). Nos resultados apresentados observa-se que as perdas por efluentes oscilaram entre 29,4 e 60,7 kg/t⁻¹ MN. Segundo Monção *et al.* (2020) e Alencar *et al.* (2023), a maior quantidade de água livre na silagem de BRS Capiacu, pode resultar em maiores perdas por efluentes. O teor de matéria seca do material ($\approx 30\%$), obtido com 11 % de farelo de trigo, deveria restringir o exsudato, no entanto, a variabilidade sugere diferenças pontuais de compactação ou retenção de água na matriz fibrosa. O valor máximo no tratamento com 6 g/kg MS (60,7 kg/t⁻¹) ainda é inferior ao limite empírico de 80 kg/t⁻¹ MN considerado aceitável para gramíneas tropicais de alta umidade.

Driehuis e Van Wikselaar (2000) relataram perdas de matéria seca associadas à fermentação láctica de aproximadamente 24,4 g kg⁻¹ DM, enquanto que, em fermentações heteroláticas essa perda foi de 62,8 g kg⁻¹ DM. Em revisão sistemática, Wróbel *et al.* (2023) confirmam que essas perdas costumam variar entre 2 - 4%, sendo representativas das emissões de CO₂ da fermentação láctica. No presente estudo, os valores de perdas por gases de 7,4 - 12,5% indicam uma fermentação eficiente, predominantemente láctica, com possíveis pequenas contribuições heteroláticas ou volatilizações adicionais, mas sem comprometer a conservação da matéria seca.

Valores de recuperação de matéria seca (RMS) acima de 80% são amplamente aceitos como indicativo de boa conservação em silagens de gramíneas tropicais (Rotz e Muck, 1994; 2006; Zanine *et al.*, 2006). No presente estudo, a RMS variou de 82,8 % a 89,8 %, sem efeito da adição das enzimas fibrolíticas. Esses índices confirmam que o protocolo adotado manteve o balanço da massa, preservando a matéria seca com eficiência.

A baixa capacidade tampão, muito inferior aos valores usualmente reportados para gramíneas tropicais (250–450 mEq NaOH/kg MS) (McDonald *et al.*, 1991; Mizubuti *et al.*, 2009), reduziu a resistência da massa ensilada à acidificação, favorecendo uma rápida queda do pH, que se manteve baixo em todos os tratamentos (3,51 → 3,46). Esse ambiente ácido limitou a atividade de microrganismos indesejáveis, refletindo-se nos baixos teores de nitrogênio amoniacal (N-NH₃ < 3,5% do N total), valores inferiores ao limite de 12% proposto como indicativo de fermentações eficientes e de proteólise mínima (McDonald *et al.*, 1991). Concomitantemente, a relação lactato:acetato próxima de 3,0, indica predominância da fermentação láctica, condição desejável para a rápida estabilização da silagem.

A combinação entre baixo pH, limitada degradação proteica e perfil fermentativo favorável explica a manutenção da estabilidade aeróbica das silagens durante a exposição ao ar, independentemente da inclusão do *blend* enzimático. Esses resultados destacam o papel do pH reduzido e do adequado balanço de ácidos orgânicos na inibição de microrganismos deterioradores e na preservação da silagem (Muck, Kung Jr. e Collins, 2020; Cordeiro *et al.*, 2021).

Os teores de ácidos orgânicos observados situaram-se dentro dos intervalos considerados adequados para uma fermentação de boa qualidade. O ácido láctico predominou em relação aos demais ácidos, caracterizando uma fermentação homolática eficiente, condição essencial para a rápida redução do pH e para a inibição de microrganismos indesejáveis, como bactérias dos grupos Enterobacteriaceae e Clostridia (Kung *et al.*, 2018; Alencar *et al.*, 2023). Embora não tenham sido observadas diferenças expressivas entre os tratamentos quanto à concentração desse ácido, os valores obtidos são compatíveis com aqueles reportados para silagens de gramíneas tropicais do gênero Pennisetum tratadas com enzimas fibrolíticas, geralmente variando entre 1 e 12% da matéria seca (Chen *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2025).

O ácido acético esteve presente em concentrações moderadas, compatíveis com o intervalo recomendado para silagens bem fermentadas (10–30 g/kg de MS), indicando um perfil fermentativo equilibrado (Bundesarbeitskreis Futterkonservierung, 2012; Kung *et al.*, 2018; Gerlach *et al.*, 2021). Em contrapartida, os ácidos propiônico e butírico foram detectados em baixas concentrações, o que é característico de silagens de boa qualidade fermentativa. A ausência ou presença mínima desses ácidos sugere limitada atividade de microrganismos clostridiais, cuja atuação está associada a fermentações indesejáveis, elevadas perdas de matéria seca e redução da eficiência do processo fermentativo (Pahlow *et al.*, 2003; Kung *et al.*, 2018).

A composição química da silagem foi moderadamente influenciada pelas doses de enzimas fibrolíticas, com efeitos mais evidentes sobre as variáveis extrato etéreo (EE) e fibra em detergente ácido (FDA). A redução linear do teor de EE com o aumento das doses ($P = 0,0257$) pode estar associada a alterações na proporção relativa dos constituintes da matéria seca, uma vez que incrementos nas frações estruturais tendem a diluir componentes presentes em menor proporção, como os lipídios, sem necessariamente implicar redução absoluta de seu conteúdo.

O comportamento quadrático da FDA ($P = 0,0386$) indica uma resposta dose-dependente à aplicação das enzimas, com menor valor observado na dose intermediária 2 g/kg MS, sugerindo maior eficiência da ação enzimática nesse nível de inclusão. Resposta semelhante foi observada para a FDN, que apresentou tendência quadrática ($P = 0,0859$), reforçando a

existência de um ponto ótimo de atuação, no qual ocorre maior solubilização parcial da parede celular e aumento da disponibilidade de carboidratos solúveis. Esse efeito refletiu-se no aumento da disponibilidade de CNF, uma vez que a degradação parcial das frações estruturais favorece a liberação de açúcares solúveis e oligossacarídeos, como evidenciado pelo maior teor de CST na dose de 2 g/kg MS.

Nas doses mais elevadas, a ausência de respostas adicionais e o aumento relativo das frações fibrosas indicam que o efeito das enzimas não é linear. A tendência de redução do NDT acompanha o aumento de FDN e FDA, refletindo menor digestibilidade potencial da silagem. Esses resultados estão de acordo com estudos que demonstram maior efetividade das enzimas fibrolíticas em níveis adequados de inclusão, associados à redução da fração fibrosa, sem benefícios adicionais em doses elevadas (Kung Jr., 2000; Loures *et al.*, 2005).

5. Conclusão

A adição do *blend* enzimático até o nível de 0,2% da matéria seca promove melhorias na qualidade da silagem de capim-elefante BRS Capiçu, evidenciadas pela redução da fibra em detergente ácido e pela tendência de diminuição da fibra em detergente neutro, além da tendência de aumento dos nutrientes digestíveis totais. Esses resultados indicam maior eficiência na utilização da fração fibrosa e melhor potencial nutritivo da silagem nesse nível de inclusão.

Referencias

- ABREU, J. G.; KAZAMA, D. C. S.; PEIXOTO, W. M.; MATTER, E.; CABRAL, L. S.; BALBINOT, E.; FERREIRA, E. A. Uso da tecnologia NIRS para predição do valor nutritivo da silagem de capins tropicais enriquecida com coprodutos do etanol de milho e em consórcio com o milho. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 46, n. 1, p. 71–92, 2025. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2025v46n1p71>.
- ALCÂNTARA, P. B.; ALCÂNTARA, V. B. G.; ALMEIDA, J. E. Estudo de vinte e cinco prováveis variedades de capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.). *Boletim de Indústria Animal*, v. 37, n. 2, p. 279–309, 1980.
- ALENCAR, A. M. S. et al. Quality of mixed silages of sorghum, BRS Capiçu grass, and cactus pear in a semiarid region of Brazil. *Journal of Applied Animal Research*, v. 51, p. 719–728, 2023. <https://doi.org/10.1080/09712119.2023.2277256>.
- ALVES DE BRITO, C. J. F.; RODELLA, R. A.; DESCHAMPS, F. C. Perfil químico da parede celular e suas implicações na digestibilidade de *Brachiaria brizantha* e *Brachiaria humidicola*. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 32, n. 6, supl. 2, p. 1835–1844, 2003. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982003000800005>.

AOAC. Official methods of analysis of AOAC International. 18. ed. Rockville: AOAC International, 2005.

BEAUCHEMIN, K. A.; COLOMBATTO, D.; MORGAVI, D. P.; YANG, W. Z. Use of fibrolytic enzymes to improve feed utilization by ruminants. *Journal of Animal Science*, v. 81, supl. 2, p. E37–E47, 2003.

BOLSEN, K. K. et al. Effect of silage additives on the microbial succession and fermentation process of alfalfa and corn silages. *Journal of Dairy Science*, v. 75, p. 3066–3083, 1992. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(92\)78070-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(92)78070-9).

BUNDESARBEITSKREIS FUTTERKONSERVIERUNG. Handbuch Futter- und Substratkonservierung. 8. ed. Frankfurt am Main: DLG-Verlags GmbH, 2012.

BUREENOK, S. et al. Effects of fibrolytic enzymes and lactic acid bacteria on fermentation quality and in vitro digestibility of Napier grass silage. *Italian Journal of Animal Science*, v. 18, n. 1, p. 1438–1444, 2019. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2019.1681910>.

CAI, Y.; BENNO, Y.; OGAWA, M.; KUMAI, S. Effect of applying lactic acid bacteria isolated from forage crops on fermentation characteristics and aerobic deterioration of silage. *Journal of Dairy Science*, v. 82, p. 520–526, 1999. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(99\)75263-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(99)75263-X).

CHEN, C. et al. Effects of Acremonium cellulase and heat-resistant lactic acid bacteria on lignocellulose degradation, fermentation quality, and microbial community structure of hybrid elephant grass silage. *Frontiers in Microbiology*, v. 13, e1066753, 2022. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1066753>.

CORDEIRO, M. W. S.; ROCHA JÚNIOR, V. R.; MONÇÃO, F. P.; CORDEIRO, A. F. S. Silagens de forrageiras tropicais adaptadas às condições do semiárido. *Nucleus Animalium*, v. 13, n. 1, p. 5–25, 2021. <https://doi.org/10.3738/21751463.3726>.

CORSATO, C. E.; SCARPARE FILHO, J. A.; SALES, E. C. J. Teores de carboidratos em órgãos lenhosos do caquizeiro em clima tropical. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 30, n. 2, p. 414–418, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452008000200025>.

DETMANN, E. et al. Métodos para análise de alimentos. 2. ed. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2021.

DRIEHUIS, F.; WIKSELAAR, P. G. The occurrence and prevention of ethanol fermentation in high-dry-matter grass silage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 80, p. 711–718, 2000. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(20000501\)80:6<711:AID-SFA593>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(20000501)80:6<711:AID-SFA593>3.0.CO;2-6).

DUBOIS, M. et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Biochemistry*, v. 28, n. 3, p. 350–356, 1956.

FILHO, J. L. Q.; NASCIMENTO, I. S. Produção de matéria seca e qualidade do capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) cultivar Roxo em diferentes idades de corte. *Revista*

Brasileira de Zootecnia, v. 29, n. 1, p. 69–74, 2000. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982000000100010>.

GERLACH, K. et al. A data analysis on the effect of acetic acid on dry matter intake in dairy cattle. *Animal Feed Science and Technology*, v. 272, p. 114782, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114782>.

GOULARTE, S. R. et al. Ácidos graxos voláteis no rúmen de vacas alimentadas com diferentes teores de concentrado na dieta. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, v. 63, n. 6, p. 1479–1486, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0102-09352011000600027>.

HOLANDA, R. M.; MEDEIROS, R. M. Classificação climática pelo método de Köppen e Thornthwaite em Bom Jesus do Piauí, Brasil. *Revista Pantaneira*, v. 16, p. 57–68, 2019. <https://doi.org/10.52719/bjas.v1i2.2648>.

JESUS, M. A. et al. Effects of microbial inoculant and fibrolytic enzymes on fermentation quality and nutritional value of BRS Capião grass silage. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 42, n. 3, supl. 1, p. 1837–1852, 2021. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2021v42n3Supl1p1837>.

KHOTA, W.; PHOLSEN, S.; HIGGS, D.; CAI, Y. Natural lactic acid bacteria population of tropical grasses and their fermentation factor analysis of silage prepared with cellulase and inoculant. *Journal of Dairy Science*, v. 99, n. 12, p. 9768–9781, 2016. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11180>.

KUNG JÚNIOR, L. Microbial and chemical additives for silage – effects on fermentation and animal response. In: *WORKSHOP SOBRE MILHO PARA SILAGEM*, 2., 2000, Piracicaba. Anais. Piracicaba: FEALQ, 2000. p. 53–73.

KUNG JÚNIOR, L. et al. Silage review: interpretation of chemical, microbial, and organoleptic components of silages. *Journal of Dairy Science*, v. 101, p. 4020–4033, 2018. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13909>.

KUNG JÚNIOR, L.; RANJIT, N. K. The effect of *Lactobacillus buchneri* and other additives on the fermentation and aerobic stability of barley silage. *Journal of Dairy Science*, v. 84, p. 1149–1155, 2001. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(01\)74575-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(01)74575-4).

LELIS, D. L. et al. Biomass production and silage quality of ensiled BRS Capião elephant grass at different regrowth ages and residue heights. *Scientific Reports*, v. 15, n. 1, p. 4016, 2025.

LOURES, D. R. S. et al. Efeito de enzimas fibrolíticas e do teor de matéria seca em silagens de capim Tanzânia sobre os parâmetros ruminiais, o comportamento ingestivo e a digestão de nutrientes em bovinos. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 34, n. 3, p. 736–745, 2005. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982005000300004>.

MCDONALD, P.; HENDERSON, A. R.; HERON, S. J. E. *The biochemistry of silage*. 2. ed. Marlow: Chalcombe Publications, 1991. 340 p.

MIZUBUTI, I. Y. et al. Métodos laboratoriais de avaliação de alimentos para animais. Londrina: Eduel, 2009. v. 1.

MONÇÃO, F. P. et al. Nutritional value of BRS Capiçu grass (*Pennisetum purpureum*) silage associated with cactus pear. *Iranian Journal of Applied Animal Science*, v. 10, n. 1, p. 25–29, 2020.

MONÇÃO, F. P.; COSTA, M. A. M. S.; RIGUEIRA, J. P. S.; SALES, E. C. J.; LEAL, D. B.; SILVA, M. F. P.; ROCHA JÚNIOR, V. R. Productivity and nutritional value of BRS Capiçu grass (*Pennisetum purpureum*) managed at four regrowth ages in a semiarid region. *Tropical Animal Health and Production*, v. 52, n. 1, p. 235–241, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11250-019-02012-y>.

MONÇÃO, F. P. et al. Impact of mixed forage silage with BRS Capiçu grass, ground corn, and varying forage palm levels on aerobic stability, fermentation profile, chemical composition, and digestibility. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 53, e20240122, 2024. <https://doi.org/10.37496/rbz5320240122>.

MUCK, R. E. et al. Silage review: recent advances and future uses of silage additives. *Journal of Dairy Science*, v. 101, n. 5, p. 3980–4000, 2018. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13839>.

MUCK, R. E.; KUNG JÚNIOR, L.; COLLINS, M. Silage production. In: MOORE, K. J. et al. *Forages: the science of grassland agriculture*. 7. ed. Hoboken: Wiley, 2020. cap. 42, p. 767–787.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Nutrient requirements of dairy cattle. 7. rev. ed. Washington, DC: National Academies Press, 2001.

PAHLOW, G. et al. Microbiology of ensiling. In: BUXTON, D. R.; MUCK, R. E.; HARRISON, J. H. (ed.). *Silage science and technology*. Madison: American Society of Agronomy, 2003. p. 31–93.

PEREIRA, A. V.; LÉDO, F. J. S.; MACHADO, J. C. BRS Kurumi and BRS Capiçu: new elephant grass cultivars for grazing and cut-and-carry systems. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, v. 17, n. 1, p. 59–62, 2017. <https://doi.org/10.1590/1984-70332017v17n1c9>.

PEREIRA, A. V. et al. BRS Capiçu e BRS Kurumi: cultivo e uso. Brasília, DF: Embrapa, 2021.

PILTZ, J. W. et al. Fermentation quality of silages produced from wilted sown tropical perennial grass pastures with or without a bacterial inoculant. *Agronomy*, v. 12, p. 1721, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071721>.

PLAYNE, M. J.; MCDONALD, P. The buffering constituents of herbage and silage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 17, n. 6, p. 264–268, 1966. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740170609>.

RETORE, M.; ALVES, J. P.; JÚNIOR, M. A. P. O.; MENDES, S. S. Qualidade da silagem do capim-elefante BRS Capiçu. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 4 jun. 2024.

- ROTZ, C. A.; MUCK, R. E. Changes in forage quality during harvest and storage. In: FAHEY, G. C. (ed.). Forage quality, evaluation, and utilization. Madison: American Society of Agronomy, 1994. cap. 20. <https://doi.org/10.2134/1994.foragequality.c20>.
- SANTOS, E. A.; SILVA, D. S.; FILHO, J. L. Q. Aspectos produtivos do capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) cv. Roxo no Brejo Paraibano. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 30, n. 1, p. 31–36, 2001. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982001000100006>.
- SIEGFRIED, V. R.; RUCKEMANN, H.; STUMPF, G. Method for the determination of organic acids in silage by high performance liquid chromatography. *Landwirtschaftliche Forschung*, v. 37, n. 3, p. 298–304, 1984.
- SILVA, D. J.; QUEIROZ, A. C. *Análise de alimentos: métodos químicos e biológicos*. 3. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2002. 235 p.
- SILVA, M. I. M. et al. Fermentative profile, chemical composition and in situ rumen degradability of Capião elephant grass silage wilted or with added cornmeal. *Applied Sciences*, v. 15, p. 12001, 2025. <https://doi.org/10.3390/app152212001>.
- SNIFFEN, C. J. et al. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: II. Carbohydrate and protein availability. *Journal of Animal Science*, v. 70, p. 3562–3577, 1992. <https://doi.org/10.2527/1992.70113562x>.
- SUTTON, J. D. et al. Effect of method of application of a fibrolytic enzyme product on digestive processes and milk production in Holstein-Friesian cows. *Journal of Dairy Science*, v. 86, n. 2, p. 546–556, 2003. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73633-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73633-9).
- TAYLOR, C. C. et al. The effect of treating whole-plant barley with *Lactobacillus buchneri* on silage fermentation, aerobic stability, and nutritive value for dairy cows. *Journal of Dairy Science*, v. 85, p. 1793–1800, 2002. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74253-7](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74253-7).
- TILLEY, J. M. A.; TERRY, R. A. A two-stage technique for the in vitro digestion of forage crops. *Grass and Forage Science*, v. 18, p. 104–111, 1963. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1963.tb00335.x>.
- 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. *Journal of Dairy Science*, v. 74, p. 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).
- VICINI, J. L. et al. Effect of feeding supplemental fibrolytic enzymes or soluble sugars with malic acid on milk production. *Journal of Dairy Science*, v. 86, n. 2, p. 576–585, 2003. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73636-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73636-4).
- WILKINSON, J. M.; RINNE, M. Highlights of progress in silage conservation and future perspectives. *Grass and Forage Science*, v. 73, n. 1, p. 40–52, 2017. <https://doi.org/10.1111/gfs.12327>.

WILKINSON, J. M.; DAVIES, D. R. The aerobic stability of silage: key findings and recent developments. *Grass and Forage Science*, v. 68, p. 1–19, 2013. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2012.00891.x>.

WRÓBEL, B. et al. Dry matter losses in silages resulting from epiphytic microbiota activity. *Agronomy*, v. 13, p. 450, 2023. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020450>.

WU, Z. et al. Effects of cellulase and *Lactiplantibacillus plantarum* on chemical composition, fermentation characteristics, and bacterial community of *Pennisetum giganteum* silage. *Agriculture*, v. 15, p. 97, 2025. <https://doi.org/10.3390/agriculture15010097>.

ZANINE, A. M. et al. Efeito do farelo de trigo sobre as perdas, recuperação da matéria seca e composição bromatológica de silagem de capim-mombaça. *Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science*, v. 43, n. 6, p. 803–810, 2006. <https://doi.org/10.11606/issn.1678-4456.bjvras.2006.26560>.

ZHAO, G. et al. Effects of applying cellulase and starch on the fermentation characteristics and microbial communities of Napier grass (*Pennisetum purpureum* Schum.) silage. *Journal of Animal Science and Technology*, v. 63, n. 6, p. 1301–1313, 2021. <https://doi.org/10.5187/jast.2021.e107>.

Considerações gerais

Esta dissertação demonstrou que a utilização de enzimas fibrolíticas na ensilagem de plantas forrageiras promove redução significativa da fração fibrosa, especialmente da FDN, conforme evidenciado pela meta-análise, embora os efeitos sobre os parâmetros fermentativos sejam modulados pelo tempo de fermentação. No experimento com silagem de capim-elefante BRS Capiacu, observou-se efeito quadrático para FDA e tendências para FDN e NDT, com melhores respostas na dose de 2 g/kg de matéria seca, indicando que a eficiência do blend enzimático é dependente da dose aplicada.

Do ponto de vista científico, o estudo integra evidências globais e valida resultados em condição experimental controlada, contribuindo para o avanço do conhecimento sobre o uso de enzimas fibrolíticas em gramíneas tropicais. Como limitações, destacam-se a heterogeneidade dos estudos incluídos na meta-análise e a condução experimental em ambiente controlado. Na prática, o uso de enzimas mostra-se uma estratégia promissora, desde que associado ao manejo adequado da dose e do tempo de fermentação, sendo recomendados estudos futuros que avaliem diferentes combinações enzimáticas e seus efeitos sobre o desempenho animal em condições de campo.