

USO DE INOCULANTES BACTERIANOS E COMPOSTOS BIOATIVOS NA ENSILAGEM DE FORRAGEIRAS TROPICAIS

Natan Teles Cruz¹, Thaynara Cristina dos Santos Paixão^{2*}, Hackson Santos da Silva³, Bárbara Louise Pacheco Ramos⁴, Brenda Emilly Ferreira dos Santos⁵, Nadjane Vieira da Silva⁵, Gladston Rafael de Arruda Santos⁶, Braulio Maia de Lana Sousa⁶

¹Professor Dr. Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC - CEO), Chapecó, SC, Brasil; ²Mestranda, Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, SE, Brasil; ³Pós-Doutorando, Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC - CAV), Lages, SC, Brasil; ⁴Professora Dr.^a, Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), Feira de Santana, BA, Brasil; ⁵Doutoranda Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), Itapetinga, BA, Brasil; ⁶Professor Dr. Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, SE, Brasil.

*E-mail correspondente: thaysantos@academico.ufs.br

RESUMO: A ensilagem é uma das principais estratégias utilizadas para conservação de forragens, sendo amplamente empregada na alimentação de ruminantes. No entanto, fatores relacionados à microbiota epifítica, às características da forrageira e às condições de armazenamento podem comprometer a qualidade fermentativa e a estabilidade aeróbia da silagem. Nesse contexto, objetivou-se revisar os efeitos da utilização de inoculantes bacterianos e compostos bioativos de origem vegetal sobre a fermentação, a conservação e a qualidade de silagens produzidas a partir de forrageiras tropicais. A revisão foi realizada por meio da análise de artigos científicos, livros e documentos técnicos publicados em bases de dados nacionais e internacionais. Os estudos demonstram que bactérias ácido-láticas homo e heterofermentativas favorecem a produção de ácidos orgânicos, reduzem perdas de matéria seca e melhoram a estabilidade aeróbia das silagens. Além disso, compostos bioativos, especialmente óleos essenciais e suas nanoformulações, apresentam atividade antimicrobiana capaz de auxiliar no controle de microrganismos indesejáveis durante o processo fermentativo. Os resultados indicam que a utilização dessas tecnologias pode contribuir para a obtenção de silagens de melhor qualidade, embora sua eficiência dependa da dose utilizada, da composição química dos compostos e das características do material ensilado. Estudos adicionais são necessários para esclarecer os mecanismos de interação entre inoculantes bacterianos e compostos bioativos em sistemas de produção tropical.

Palavras-chave: bactérias ácido-lácticas, estabilidade aeróbia, timol, nanoencapsulação, conservação de forragens.

USE OF BACTERIAL INOCULANTS AND BIOACTIVE COMPOUNDS IN THE ENSILING OF TROPICAL FORAGES

ABSTRACT: *Ensiling is one of the main strategies used for forage conservation and is widely adopted in ruminant feeding systems. However, factors related to epiphytic microbiota, forage characteristics, and storage conditions may compromise silage fermentation quality and aerobic stability. Therefore, this review aimed to evaluate the effects of bacterial inoculants, essential oils, and plant-derived bioactive compounds on the fermentation process, preservation, and quality of silages produced from tropical forages. The review was based on scientific articles, books, and technical publications available in national and international databases. The studies reviewed indicate that homofermentative and heterofermentative lactic acid bacteria enhance organic acid production, reduce dry matter losses, and improve silage aerobic stability. In addition, bioactive compounds, particularly essential oils and their nanoformulations, exhibit antimicrobial activity that may help control undesirable microorganisms during fermentation. The results suggest that these technologies can contribute to improved silage quality; however, their effectiveness depends on factors such as application rate, chemical composition, and characteristics of the ensiled material. Further studies are required to better understand the interactions between bacterial inoculants and bioactive compounds in tropical production systems.*

Keywords: *lactic acid bacteria, aerobic stability, thymol, nanoencapsulation, forage preservation.*

INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa posição de destaque na produção e exportação de proteína animal, sustentado por ampla base territorial, extensas áreas de pastagens cultivadas e condições climáticas favoráveis, que conferem predominância à alimentação a pasto e vantagens competitivas à pecuária nacional. Nesse contexto, a conservação eficiente de forragens assume papel estratégico, impulsionando a busca por tecnologias capazes de reduzir perdas de nutrientes e de matéria seca ao longo do armazenamento.

A ensilagem constitui uma das principais estratégias de conservação de volumosos em regiões tropicais, especialmente em sistemas caracterizados por forte

sazonalidade na produção de forragem. No entanto, silagens produzidas a partir de forrageiras tropicais frequentemente apresentam limitações fermentativas associadas ao elevado teor de umidade, à alta concentração de nitrogênio solúvel e, em muitos casos, à baixa disponibilidade de carboidratos solúveis (MCDONALD et al., 1991; BERNARDES et al., 2018; FREITAS et al., 2025). Essas características comprometem a rápida queda do pH, intensificam a proteólise e reduzem a eficiência fermentativa, resultando em maiores perdas de matéria seca e deterioração do valor nutritivo (JOBIM et al., 2007; GUO et al., 2023).

A degradação proteica excessiva, particularmente em materiais com elevado teor de proteína bruta, como leguminosas arbóreas, favorece o acúmulo de nitrogênio amoniacal (N-NH_3), eleva o pH da silagem e reduz a eficiência de utilização do nitrogênio pelos ruminantes. Esse processo está frequentemente associado ao desenvolvimento de fermentações indesejáveis, resultando em perdas por gases e efluentes e maior atividade de microrganismos deterioradores. Após a abertura dos silos, esse cenário agrava a instabilidade aeróbia, uma vez que leveduras e fungos utilizam compostos formados durante a fermentação, promovendo elevação do pH, aquecimento da massa e deterioração do material conservado (KUNG JR. et al., 2000; WILKINSON & DAVIES, 2013).

Nesse contexto, inoculantes bacterianos à base de bactérias lácticas (LAB) têm sido amplamente utilizados com o objetivo de acelerar a produção de ácido lático e promover rápida acidificação da massa ensilada. Contudo, a eficiência desses inoculantes é altamente dependente da interação com a microbiota epifítica, da disponibilidade de substratos fermentáveis e das condições ambientais disponíveis no momento da ensilagem. Em silagens tropicais, caracterizadas por menor concentração de açúcares solúveis e maior variabilidade microbológica, essas interações podem resultar em respostas inconsistentes ao uso isolado de LAB, podendo limitar o controle simultâneo da proteólise, das perdas fermentativas e da deterioração aeróbia (MUCK et al., 2018; GUO et al., 2023).

Avanços recentes indicam que as LAB desempenham papel central na modulação da sucessão microbiana durante o processo de ensilagem, influenciando,

além do perfil de ácidos orgânicos, a composição metabólica da silagem e sua estabilidade após a exposição ao oxigênio (GUO et al., 2024). Além disso, interações entre metabólitos vegetais e LAB podem favorecer ou inibir populações microbianas específicas, alterando o tipo de fermentação predominante (CHEN et al., 2023a).

Compostos bioativos de origem vegetal têm sido propostos como aditivos capazes de atuar de forma complementar às LAB, especialmente no controle de microrganismos indesejáveis e na redução da proteólise (RAMDANI et al., 2023). Diversos compostos bioativos presentes nos óleos essenciais, incluindo fenóis e terpenoides, apresentam atividade antimicrobiana e antifúngica, atuando principalmente por meio da alteração das membranas celulares e da interferência em processos metabólicos essenciais (GREATHEAD, 2003; BENCHAAR et al., 2008). No entanto, seus efeitos não são uniformes, sendo fortemente dependentes da dose, da composição química e da matriz vegetal, podendo, em concentrações elevadas, inibir também bactérias lácticas e comprometer a produção de ácido lático (CHEN et al., 2023a).

Entre esses compostos, o óleo essencial de alecrim-pimenta (*Lippia sidoides*) tem recebido atenção devido à sua composição química relativamente estável e ao elevado teor de timol, associado à intensa atividade antimicrobiana e antifúngica. Estudos conduzidos com silagens tropicais indicam melhorias no perfil fermentativo, redução da produção de $N-NH_3$ e aumento da estabilidade aeróbia. Entretanto, respostas negativas em doses elevadas evidenciam a necessidade de maior controle sobre a intensidade e a seletividade da ação antimicrobiana durante a fermentação (CERQUEIRA, 2018; SOUSA et al., 2023).

Nesse contexto, a nanoformulação de óleos essenciais surge como alternativa tecnológica para mitigar limitações associadas ao uso convencional desses compostos. A encapsulação em sistemas nanoestruturados pode reduzir perdas por volatilização, aumentar a estabilidade físico-química e promover distribuição mais homogênea na massa ensilada, além de possibilitar liberação gradual dos princípios ativos. Essa dinâmica tende a reduzir picos de concentração antimicrobiana, favorecendo maior seletividade sobre a microbiota fermentativa (CERQUEIRA, 2018).

Evidências recentes sugerem que a nanoformulação pode modular a interação entre compostos bioativos e LAB, influenciando tanto o tipo fermentativo quanto a estabilidade aeróbia da silagem (ZHOU et al., 2025; WANG et al., 2025).

Apesar desses avanços, ainda não está claramente estabelecido se a associação entre compostos bioativos nanoformulados e diferentes categorias de bactérias lácticas resulta em efeitos sinérgicos ou antagônicos em silagens tropicais. A escassez de abordagens que considerem, de forma integrada, a dose do bioativo, o tipo de inoculante e as características da forrageira limita o entendimento dos mecanismos que regulam a fermentação nesses sistemas.

Diante do exposto, objetivou-se relatar os efeitos dos inoculantes bacterianos e dos compostos bioativos, com ênfase em óleos essenciais e nanoformulações, sobre a fermentação, estabilidade aeróbia e qualidade de silagens de forrageiras tropicais.

DESENVOLVIMENTO

Microbiologia da silagem

A ensilagem é um processo de conservação baseado em uma sucessão microbiana dinâmica, no qual a estabilidade do material conservado depende do rápido estabelecimento da anaerobiose e da predominância de microrganismos capazes de direcionar o metabolismo fermentativo para a produção de ácidos orgânicos eficientes na redução do pH. Nesse sentido, a microbiologia da silagem deve ser entendida como um sistema multifatorial, no qual a composição inicial da microbiota, a disponibilidade de substratos fermentáveis e as características físico-químicas da forragem interagem de forma determinante para o sucesso ou fracasso do processo fermentativo (MCDONALD et al., 1991).

As bactérias lácticas (LAB) constituem o principal grupo funcional envolvido na conservação da forragem, uma vez que utilizam carboidratos solúveis para a produção de ácido lático, o ácido orgânico de maior eficiência na redução do pH. A predominância dessa rota fermentativa está associada à rápida acidificação da massa

ensilada e à redução do pH em silagens bem fermentadas, condição considerada fundamental para a inibição da maioria dos microrganismos indesejáveis (MUCK et al., 2018).

Entretanto, a eficiência da fermentação láctica está condicionada às condições iniciais do sistema. Em situações caracterizadas por baixa disponibilidade de carboidratos solúveis, elevado teor de umidade ou atraso na instalação da anaerobiose, a atividade das LAB pode ser limitada e favorecer o desenvolvimento de microrganismos competidores. Entre esses, destacam-se as enterobactérias, que atuam nas fases iniciais da fermentação competindo por substratos e convertendo açúcares e aminoácidos em produtos associados a menor eficiência fermentativa, incluindo ácido acético, etanol e CO₂, retardando a queda do pH (PAHLOW et al., 2003; GUO et al., 2023).

As bactérias do gênero *Clostridium* representam uma das principais ameaças à qualidade da silagem, especialmente em materiais com elevado teor de umidade e alta concentração de nitrogênio solúvel. Esses microrganismos anaeróbios obrigatórios promovem fermentações indesejáveis, com produção de amônia e aminas biogênicas, compostos associados à elevação do pH, redução da digestibilidade e queda da palatabilidade da silagem (GIBSON, 1965; KUNG JR. et al., 2018). Além disso, concentrações de ácido butírico superiores a 5 g/kg de matéria seca estão associadas a maiores perdas fermentativas e menor aceitação pelos animais (MCDONALD et al., 1991).

Além dos processos anaeróbios, a estabilidade aeróbia após a abertura dos silos constitui um componente crítico da microbiologia da silagem. Nesse estágio, leveduras e fungos filamentosos assumem papel central na deterioração do material conservado. As leveduras anaeróbicas facultativas, metabolizam o ácido láctico na presença de oxigênio, elevando o pH e criando condições favoráveis ao crescimento de outros microrganismos aeróbios. Esse processo promove intensa atividade metabólica aeróbia, resultando em aquecimento da massa ensilada, perdas adicionais de matéria seca e redução do valor nutritivo. Silagens com maior população inicial de leveduras tendem a apresentar menor tempo para ruptura da estabilidade aeróbia,

mesmo quando apresentam pH adequado ao final da fermentação anaeróbia (KUNG JR. & RANJIT, 2001; MUCK et al., 2018).

A microbiota epifítica das forragens desempenha papel determinante na dinâmica microbiana da ensilagem. Antes da ensilagem, as plantas hospedam comunidades complexas compostas por bactérias, leveduras e fungos, cuja composição varia em função da espécie forrageira, das condições ambientais e das práticas de manejo. Em condições naturais, predominam microrganismos aeróbios e facultativos, que participam das etapas iniciais da fermentação até que a redução da disponibilidade de oxigênio e a acidificação do meio favoreçam o estabelecimento das bactérias lácticas (PAHLOW et al., 2003; GUO et al., 2023). A sucessão microbiana resultante conduz a alterações progressivas na estrutura da comunidade bacteriana, determinando não apenas a eficiência fermentativa, mas também a composição metabólica da silagem e sua estabilidade durante o armazenamento (GUO et al., 2024).

A composição da forrageira exerce influência direta sobre essa dinâmica. Culturas com elevado teor de carboidratos solúveis, como milho e sorgo, favorecem a rápida dominância das LAB, resultando em fermentações mais eficientes. Em contraste, forragens tropicais com baixo teor de açúcares solúveis e elevado teor de umidade, como gramíneas, apresentam maior risco de fermentações lentas e perdas associadas. Em leguminosas tropicais e arbóreas, como a gliricídia (*Gliricidia sepium*), o elevado teor de proteína e a maior capacidade tampão intensificam o desafio entre as interações microbiológicas e fermentativas da massa ensilada (CRUZ et al., 2020). Isso acontece, pois, maiores quantidades de ácido são necessárias para reduzir o pH a níveis inibitórios, aumentando a susceptibilidade à proteólise e à atividade clostridiana (BERNARDES et al., 2018; GUO et al., 2023).

Diante dessa complexidade, práticas de manejo que assegurem rápida instalação da anaerobiose são fundamentais para direcionar a fermentação em favor das bactérias lácticas. O uso de inoculantes microbianos tem sido amplamente adotado com esse objetivo, contudo sua eficácia é altamente dependente da interação com a microbiota epifítica, da disponibilidade de substratos fermentáveis e das

condições ambientais (GUO et al., 2023). Além disso, a resposta aos inoculantes pode variar conforme a forrageira, a composição microbiana natural e as cepas utilizadas, uma vez que os benefícios observados nem sempre são reproduzidos de forma consistente entre diferentes materiais e condições de ensilagem (MUCK et al., 2018). Dessa forma, os efeitos desses aditivos podem diferir entre situações de uso, principalmente em sistemas que existem uma grande variabilidade de plantas forrageiras.

Em síntese, a microbiologia da silagem deve ser interpretada como um sistema regulado pela interação entre substrato, microbiota epifítica e condições físico-químicas. A presença de microrganismos desejáveis, por si só, não garante uma fermentação eficiente, sendo o equilíbrio entre esses fatores o principal determinante da velocidade de acidificação, da proteólise, das perdas fermentativas e da estabilidade aeróbia da silagem. Esse entendimento reforça a necessidade de estratégias integradas de controle microbiano, especialmente em sistemas tropicais caracterizados por elevada variabilidade de forragens e condições ambientais.

Aditivos microbianos na ensilagem

Os inoculantes microbianos constituem uma das principais ferramentas utilizadas para modular a microbiota da silagem e direcionar a fermentação em favor de microrganismos desejáveis. Essas formulações são compostas predominantemente por bactérias ácido-láticas (LAB) homofermentativas, heterofermentativas ou combinações entre esses grupos, podendo também incluir outros microrganismos com potencial de atuação sobre a estabilidade fermentativa e aeróbia da silagem (ZOPOLLATTO et al., 2009; MUCK et al., 2018). O princípio de utilização desses aditivos baseia-se no rápido estabelecimento de populações microbianas desejáveis, capazes de competir com a microbiota epifítica e acelerar a acidificação da massa ensilada, reduzindo perdas fermentativas e proteólise.

As LAB homofermentativas, como *Lactobacillus plantarum*, *Pediococcus* spp., *Enterococcus faecium* e *Lactococcus lactis*, destacam-se pela elevada eficiência na

conversão de carboidratos solúveis em ácido láctico, promovendo rápida queda do pH e menores perdas iniciais de matéria seca (MCDONALD et al., 1991). Em condições favoráveis de substrato, a inoculação com essas cepas resulta em acidificação acelerada nas fases iniciais da fermentação, limitando o desenvolvimento de enterobactérias e clostrídios. Além disso, a via homofermentativa apresenta maior eficiência energética, uma vez que não há produção significativa de CO₂ associada ao metabolismo microbiano.

Entretanto, a predominância exclusiva de LAB homofermentativas nem sempre resulta em silagens mais estáveis após a abertura dos silos. Silagens com grande presença de fermentação por bactérias homofermentativa podem apresentar menor estabilidade aeróbia após a abertura dos silos, uma vez que o ácido láctico, embora eficiente na redução do pH durante a fermentação, possui atividade antifúngica limitada e pode ser utilizado como substrato por leveduras na presença de oxigênio. Jin et al. (2024) observaram que a inoculação exclusiva com *L. plantarum* reduziu a estabilidade aeróbia da silagem em 24,1%, enquanto *L. buchneri* aumentou essa variável em 58,6%. Isso demonstra que a rápida produção de ácido láctico não necessariamente resulta em maior resistência à deterioração após a exposição ao oxigênio.

Os inoculantes heterofermentativos, especialmente *Lactobacillus buchneri*, favorecem a produção de ácido acético, composto com maior capacidade de inibir microrganismos deterioradores e prolongar a estabilidade aeróbia da silagem. Em uma meta-análise, Arriola et al. (2021) verificaram que inoculantes à base de *L. buchneri* aumentaram significativamente as concentrações de ácido acético e propionato, reduziram as contagens de leveduras e fungos e promoveram aumento expressivo da estabilidade aeróbia das silagens, evidenciando a importância da heterofermentação para a preservação da qualidade da massa após a exposição ao oxigênio. Corroborando esse mecanismo, Mohammadzadeh et al. (2012) observaram que silagens de milho submetidas à geada inoculadas com formulações contendo *Lactobacillus buchneri* apresentaram maior estabilidade aeróbia e maior concentração

de ácido acético do que silagens tratadas com inoculantes predominantemente homofermentativos.

Nesse contexto, *Lactobacillus buchneri* passou a ser amplamente incorporado a inoculantes comerciais devido à sua capacidade de converter parte do ácido láctico em ácido acético, contribuindo para a inibição de leveduras e para o aumento da estabilidade aeróbia da silagem (PAHLOW et al., 2003). O principal mecanismo envolve a conversão parcial do ácido láctico em ácido acético e 1,2-propanodiol, reduzindo a disponibilidade de substrato para leveduras e ampliando a estabilidade aeróbia da silagem (OUDE ELFERINK et al., 2001). Ranjit e Kung Jr. (2000) relataram aumento no tempo para deterioração aeróbia em silagens de milho inoculadas com *L. buchneri*. Por outro lado, os benefícios associados à fermentação heterofermentativa são acompanhados por menor eficiência durante a fase anaeróbia, uma vez que essa via metabólica envolve produção de CO₂, resultando em maiores perdas fermentativas iniciais de matéria seca. Pedroso et al. (2008) demonstraram que, embora a inoculação com *L. buchneri* tenha reduzido as perdas associadas à deterioração aeróbia, as perdas inerentes ao processo fermentativo não foram completamente eliminadas. Esses resultados demonstram que a maximização da qualidade fermentativa inicial nem sempre coincide com a maximização da estabilidade aeróbia, sendo necessário considerar o balanço entre ambos os processos na seleção de inoculantes para diferentes condições de ensilagem.

Com o objetivo de conciliar rápida acidificação e maior estabilidade após a abertura dos silos, inoculantes comerciais têm adotado combinações de LAB homofermentativas e heterofermentativas, além da inclusão de bactérias do gênero *Propionibacterium*. O ácido propiônico, produzido por esses microrganismos, apresenta reconhecida atividade antifúngica, superior à do ácido acético, atuando principalmente por meio da acidificação intracelular e da inibição de processos metabólicos em leveduras (CHEN et al., 2023a; CHEN et al., 2023b).

A inclusão de *Propionibacterium acidipropionici* em algumas formulações visa potencializar o controle de leveduras e fungos deterioradores por meio do aumento da produção de ácido propiônico, que atravessa a membrana celular de fungos e

leveduras, promovendo acidificação intracelular e elevado gasto energético para manutenção da homeostase, resultando na inibição do crescimento microbiano (LAMBERT & STRATFORD, 1999; DAVIDSON, 2007). No entanto, o desempenho desses inoculantes depende fortemente da adaptação das cepas às condições do silo, da disponibilidade de substratos e da competição com a microbiota epifítica (ZOPOLLATTO et al., 2009).

De forma geral, embora os inoculantes microbianos representem uma ferramenta importante para o controle da fermentação, sua eficácia em sistemas tropicais permanece variável, refletindo a complexidade das interações entre substrato, microbiota e ambiente. Nesse cenário, abordagens que integrem o uso de inoculantes bacterianos com outros agentes moduladores da microbiota, como compostos bioativos de origem vegetal, têm potencial para serem utilizados com alternativas para aumentar a eficiência do processo fermentativo.

Óleos essenciais e nanoformulações

Óleos essenciais vêm sendo estudados como aditivos na ensilagem por serem misturas naturais complexas, compostas por metabólitos secundários voláteis, com potencial de ação antimicrobiana e antifúngica. Essa característica os torna candidatos a auxiliar no controle de microrganismos associados a perdas fermentativas e deterioração após a abertura, sobretudo em materiais onde a estabilidade aeróbia é um gargalo (CALLAWAY et al., 2008). Além disso, a composição química dos óleos essenciais pode variar amplamente entre espécies, genótipos e condições de cultivo, o que explica por que respostas zootécnicas e microbiológicas nem sempre são consistentes quando se muda a origem do óleo ou a matriz vegetal (BLANK et al., 2015).

Dentro desse contexto, timol e carvacrol são citados como compostos com ação antimicrobiana expressiva, pela presença do grupo hidroxila em estrutura fenólica, associado à maior capacidade de desorganizar membranas e comprometer o desenvolvimento microbiano (GILL & HOLLEY, 2006). Entre as plantas produtoras de óleo essencial, o alecrim-pimenta (*Lippia sidoides*) tem destaque por ser nativo do

Nordeste brasileiro e por apresentar perfil químico frequentemente associado ao timol como constituinte majoritário (cerca de 62%) (OLIVEIRA et al., 2017). Esse perfil sustenta seu potencial bactericida e fungicida, com interesse para situações em que leveduras, fungos e outros microrganismos possam causar perdas e deterioração (VERAS et al., 2012; GOMES et al., 2014).

Os efeitos dos óleos essenciais na ensilagem apresentam variabilidade, mesmo quando compostos quimicamente semelhantes são avaliados. Em silagens de milho, Kung Jr. et al. (2008) relataram que a inclusão de um blend de óleos essenciais contendo timol, eugenol, vanilina e limoneno, em doses entre 40 e 80 mg/kg de forragem fresca, não alterou as populações de leveduras, fungos, bactérias ácido-láticas e enterobactérias, e nem a estabilidade aeróbia da silagem. Isso indica que a atividade antimicrobiana observada para esses compostos em culturas puras nem sempre é reproduzida no ambiente complexo da massa forrageira ensilada.

Em contraste, Chaves et al. (2012) observaram que óleos essenciais de canela, orégano e laranja doce, aplicados a 400 mg/kg de massa fresca (equivalente a 120 mg/kg de matéria seca), reduziram significativamente as populações de leveduras durante a exposição aeróbia de silagens de cevada, indicando potencial para o controle de microrganismos associados à deterioração da silagem pós-abertura. De forma complementar, Silva et al. (2025) verificaram que a inclusão de óleo essencial de laranja doce aumentou a concentração de ácido acético e promoveu maior estabilidade aeróbia da silagem de milho quando aplicado na dose de 600 mg/kg de massa fresca ensilada. Esses resultados indicam que a eficácia dos óleos essenciais está intimamente relacionada à composição química dos compostos utilizados, à dose aplicada, às características da forrageira e à microbiota predominante no sistema de ensilagem. Além disso, as divergências entre os estudos podem estar também às doses empregadas, que variaram de 80 mg/kg de forragem fresca em Kung Jr. et al. (2008) a 400 e 600 mg/kg de massa fresca nos estudos de Chaves et al. (2012) e Silva et al. (2025), respectivamente. Assim, a resposta aos óleos essenciais em silagens não pode ser generalizada, sendo resultado da interação entre dose aplicada, matriz vegetal e alvo microbiano predominante em cada sistema fermentativo.

Nesse contexto, a nanoformulação de óleos essenciais tem sido proposta como alternativa tecnológica capaz de mitigar parte dessas restrições. Sistemas nanoestruturados permitem o encapsulamento dos compostos bioativos, reduzindo perdas por volatilização, aumentando a estabilidade físico-química e favorecendo distribuição mais homogênea na matriz vegetal. Além disso, a redução do tamanho das partículas amplia a área específica e pode alterar a cinética de liberação dos princípios ativos, favorecendo sua disponibilização gradual ao longo do armazenamento e da fermentação (GONZÁLEZ et al., 2014; GONZÁLEZ et al., 2015). Essas características podem aumentar a persistência dos compostos bioativos e contribuir para uma ação mais prolongada ao longo do armazenamento quando comparadas às formulações convencionais.

Estudos indicam que a forma de apresentação dos compostos bioativos pode influenciar sua eficácia durante a ensilagem. Cerqueira (2018), ao avaliar o uso de óleo essencial nanoformulado de *Lippia sidoides* em silagem de milho, observou redução das populações de *Clostridium*, fungos e leveduras, especialmente na dose de 700 mg/kg de forragem fresca, sem comprometimento do perfil fermentativo da silagem. De forma semelhante, Sousa et al. (2023), avaliando óleo essencial de *Lippia sidoides* e timol nanoformulados em silagens consorciadas de sorgo (*Sorghum bicolor*) com capim Paiaguás (*Urochloa* syn: *Brachiaria brizantha* cv. BRS Paiaguás), verificaram melhorias no controle de microrganismos indesejáveis e aumento da estabilidade aeróbia, particularmente nos tratamentos contendo timol nanoformulado.

Esses resultados sugerem que nanoformulações podem representar uma alternativa promissora para aumentar a eficiência de compostos bioativos na conservação de silagens, embora os efeitos observados dependam do composto utilizado, da dose aplicada e das características do material ensilado. Além disso, o uso de óleo essencial e timol nanoformulados podem promover benefícios distintos durante a ensilagem. Isso indica a necessidade de compreender a ação dos compostos bioativos dos óleos essenciais nanoformulados sobre a microbiologia e fermentação da silagem. Essa distinção é relevante, visto que compostos fenólicos apresentam diferentes formas de ação antimicrobiana e interações específicas com

bactérias lácticas, podendo resultar em efeitos contrastantes conforme a forragem utilizada e a microbiota envolvida (CHEN et al., 2023b).

Além disso, a maioria dos estudos disponíveis avalia inoculantes bacterianos e compostos bioativos de forma independente, havendo escassez de trabalhos que investiguem a interação entre esses aditivos durante o processo de ensilagem. Essa limitação dificulta o entendimento de possíveis efeitos sinérgicos ou antagônicos entre bactérias ácido lácticas e compostos antimicrobianos de origem vegetal, especialmente quando estes são apresentados na forma nanoencapsulada. A compreensão dessas interações torna-se ainda mais relevante diante da ampla variabilidade observada entre forrageiras quanto à composição química, teor de matéria seca, capacidade tampão e microbiota epifítica, fatores que influenciam diretamente a dinâmica fermentativa e podem modificar a resposta aos aditivos utilizados.

Revisões recentes destacam que essas interações podem resultar tanto em sinergismo quanto em antagonismo microbiano, dependendo da dose, do grupo funcional das bactérias lácticas e das condições fermentativas (GUO et al., 2023; RAMDANI et al., 2023). Dessa forma, a nanoformulação surge como uma estratégia promissora para aumentar a eficácia dos óleos essenciais durante a ensilagem, favorecendo a proteção e a liberação gradual dos compostos bioativos e ampliando seu potencial de interação com a microbiota fermentativa.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de inoculantes bacterianos e compostos bioativos de origem vegetal no processo de ensilagem representa uma estratégia promissora para melhorar a fermentação e a estabilidade aeróbia de silagens tropicais. As bactérias lácticas homo e heterofermentativas exercem funções complementares no processo de conservação, enquanto compostos bioativos, especialmente na forma nanoformulada, podem contribuir para o controle de microrganismos deterioradores e para a manutenção da qualidade da silagem. No entanto, a magnitude dessas

respostas depende de fatores como dose aplicada, composição do bioativo, características da forrageira e microbiota associada ao processo fermentativo. Além disso, permanecem limitadas as informações sobre a interação entre inoculantes bacterianos e compostos bioativos nanoformulados, bem como sobre a contribuição relativa dos compostos bioativos presentes nos óleos essenciais para os efeitos observados em silagens. Dessa forma, estudos que integrem essas abordagens podem contribuir para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes e previsíveis para a conservação de forrageiras tropicais

REFERÊNCIAS

- ARRIOLA, K. G.; OLIVEIRA, A. S.; JIANG, Y.; KIM, D.; SILVA, H. M.; KIM, S. C.; AMARO, F. X.; OGUNADE, I. M.; SULTANA, H.; PECH CERVANTES, A. A.; FERRARETTO, L. F.; VYAS, D.; ADESOGAN, A. T. Meta-analysis of effects of inoculation with *Lactobacillus buchneri*, with or without other bacteria, on silage fermentation, aerobic stability, and performance of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, v. 104, n. 7, p. 7653–7670, 2021. DOI: 10.3168/jds.2020-19647.
- BENCHAAR, C.; CALSAMIGLIA, S.; CHAVES, A. V.; FRASER, G. R.; COLOMBATTO, D.; MCALLISTER, T. A.; BEAUCHEMIN, K. A. A review of plant-derived essential oils in ruminant nutrition and production. *Animal Feed Science and Technology*, v. 145, n. 1-4, p. 209–228, 2008. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2007.04.014.
- BERNARDES, T. F.; DANIEL, J. L. P.; ADESOGAN, A. T.; MCALLISTER, T. A.; DROUIN, P.; NUSSIO, L. G.; HUHTANEN, P.; TREMBLAY, G. F.; BÉLANGER, G.; CAI, Y. Silage review: Unique challenges of silages made in hot and cold regions. *Journal of Dairy Science*, v. 101, n. 5, p. 4001–4019, 2018. DOI: 10.3168/jds.2017-13703.
- BLANK, A. F.; CAMÊLO, L. C. A.; ARRIGONI-BLANK, M. F.; PINHEIRO, J. B.; ANDRADE, T. M.; NICULAU, E. S.; ALVES, P. B. Chemical diversity in *Lippia alba*

(Mill.) N. E. Brown germplasm. The Scientific World Journal, v. 2015, p. 1–11, 2015. DOI: 10.1155/2015/321924.

CALLAWAY, T. R.; CARROLL, J. A.; ARTHINGTON, J. D.; EDRINGTON, T. S.; ANDERSON, R. C.; GALYEAN, M. L.; RICKE, S. C.; CRANDALL, P. G.; NISBET, D. J. Citrus products decrease growth of *Escherichia coli* O157 and *Salmonella typhimurium* in pure culture and in fermentation with mixed ruminal microorganisms in vitro. Foodborne Pathogens and Disease, v. 5, n. 5, p. 621–627, 2008. DOI: 10.1089/fpd.2008.0088.

CERQUEIRA, A. S. Nanoformulação do óleo essencial de alecrim-pimenta (*Lippia sidoides*) aplicada à ensilagem. 2018. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018.

CHAVES, A. V.; BAAH, J.; WANG, Y.; MCALLISTER, T. A.; BENCHAAR, C. Effects of cinnamon leaf, oregano and sweet orange essential oils on fermentation and aerobic stability of barley silage. Journal of the Science of Food and Agriculture, v. 92, n. 4, p. 906–915, 2012. DOI: 10.1002/jsfa.4669.

CHEN, L.; WANG, Y.; LI, X.; MACADAM, J. W.; ZHANG, Y. Interaction between plants and epiphytic lactic acid bacteria that affect plant silage fermentation. Frontiers in Microbiology, v. 14, 2023a. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1164904.

CHEN, L.; LI, X.; WANG, Y.; GUO, Z.; WANG, G.; ZHANG, Y. The performance of plant essential oils against lactic acid bacteria and adverse microorganisms in silage production. Frontiers in Plant Science, v. 14, 2023b. DOI: 10.3389/fpls.2023.1285722.

CRUZ, N. T.; PIRES, A. J. V.; SANTOS, A. P. S.; RAMOS, B. L. P.; ALMEIDA, B. T.; SANTOS, D. C.; FRIES, D. D. Produção de leguminosas para ensilagem: uma revisão. Revista Científica Rural, Bagé, v. 22, n. 1, 2020. DOI: 10.30945/rcr-v22i1.3143.

DAVIDSON, P. M. Chemical preservatives and natural antimicrobial compounds. In: DOYLE, M. P.; BEUCHAT, L. R. (Eds.). Food Microbiology: Fundamentals and Frontiers. Washington: ASM Press, 2007. p. 713–745.

FREITAS, I. O. M. A.; GURGEL, A. L. C.; ARAÚJO, M. J.; DIAS-SILVA, T. P.; MARTINS, E. V. F.; MIRANDA, R. S.; ÍTAVO, L. C. V.; DIFANTE, G. S.; EMERENCIANO NETO, J. V. Agro-Industrial Residues as Additives in Tropical Grass Silage: An Integrative Review. *Grasses*, v. 4, n. 3, art. 38, 2025. DOI: 10.3390/grasses4030038.

GIBSON, T. Clostridia in silage. *Journal of Applied Bacteriology*, v. 28, p. 56–64, 1965.

GILL, A. O.; HOLLEY, R. A. Disruption of *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* and *Lactobacillus sakei* cellular membranes by plant oil aromatics. *International Journal of Food Microbiology*, v. 108, n. 1, p. 1–9, 2006. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2005.10.009.

GOMES, G. A.; MONTEIRO, C. M. O.; JULIÃO, L. S.; MATURANO, R.; SENRA, T. O. S.; ZERINGÓTA, V.; CALMON, F.; MATOS, R. S.; DAEMON, E.; CARVALHO, M. G. Acaricidal activity of essential oil from *Lippia sidoides* on unengorged larvae and nymphs of *Rhipicephalus sanguineus* and *Amblyomma cajennense*. *Experimental Parasitology*, v. 137, p. 41–45, 2014. DOI: 10.1016/j.exppara.2013.12.003.

GONZÁLEZ, J. O. W.; GUTIÉRREZ, M. M.; FERRERO, A. A.; FERNÁNDEZ BAND, B. Essential oils nanoformulations for stored-product pest control: characterization and biological properties. *Chemosphere*, v. 100, p. 130–138, 2014. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.11.056.

GONZÁLEZ, J. O. W.; STEFANAZZI, N.; MURRAY, A. P.; FERRERO, A. A.; FERNÁNDEZ BAND, B. Novel nanoinsecticides based on essential oils to control the German cockroach. *Journal of Pest Science*, v. 88, n. 2, p. 393–404, 2015. DOI: 10.1007/s10340-014-0607-1.

GREATHEAD, H. Plants and plant extracts for improving animal productivity. *Proceedings of the Nutrition Society*, v. 62, p. 279–290, 2003.

GUO, X.; XU, D.; LI, F.; BAI, J.; SU, R. Current approaches on the roles of lactic acid bacteria in crop silage. *Microbial Biotechnology*, v. 16, n. 1, p. 67–87, 2023. DOI: 10.1111/1751-7915.14184.

GUO, Y.; HUANG, R. Z.; NIU, Y.; ZHANG, W. Chemical characteristics, antioxidant capacity, bacterial community, and metabolite composition of mulberry silage ensiled with lactic acid bacteria. *Frontiers in Microbiology*, v. 15, art. 1363256, 2024. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1363256.

JIN, Y.; WANG, P.; LI, F.; YU, M.; DU, J.; ZHAO, T.; YI, Q.; TANG, H.; YUAN, B. The effects of *Lactobacillus plantarum* and *Lactobacillus buchneri* on the fermentation quality, in vitro digestibility, and aerobic stability of *Silphium perfoliatum* L. silage. *Animals*, v. 14, n. 15, art. 2279, 2024. DOI: 10.3390/ani14152279.

JOBIM, C. C.; NUSSIO, L. G.; REIS, R. A.; SCHMIDT, P. Metodologia para avaliação da qualidade da silagem. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 36, supl. esp., p. 120–135, 2007.

KUNG JR., L.; ROBINSON, J. R.; RANJIT, N. K.; CHEN, J. H.; GOLT, C. M.; PESEK, J. D. Microbial populations, fermentation end-products, and aerobic stability of corn silage treated with ammonia or a propionic acid-based preservative. *Journal of Dairy Science*, v. 83, n. 7, p. 1479–1486, 2000. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(00)75020-X.

KUNG JR., 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, n. 5, p. 1149–1155, 2001.

KUNG JR., L.; WILLIAMS, P.; SCHMIDT, R. J.; HU, W. A blend of essential plant oils used as an additive to alter silage fermentation or used as a feed additive for lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, v. 91, n. 12, p. 4793–4800, 2008. DOI: 10.3168/jds.2008-1402.

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, n. 5, p. 4020–4033, 2018. DOI: 10.3168/jds.2017-13909.

LAMBERT, R. J. W.; STRATFORD, M. Weak-acid preservatives: modelling microbial inhibition and response. *Journal of Applied Microbiology*, v. 86, p. 157–164, 1999.

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

MOHAMMADZADEH, H.; KHORVASH, M.; GHORBANI, G. R.; YANG, W. Z. Frosted corn silage with or without bacterial inoculants in dairy cattle ration. *Livestock Science*, v. 145, n. 1–3, p. 180–186, 2012. DOI: 10.1016/j.livsci.2012.01.011.

MUCK, R. E.; NADEAU, E. M. G.; MCALLISTER, T. A.; CONTRERAS-GOVEA, F. E.; SANTOS, M. C.; KUNG JR., L. Silage review: Recent advances and future uses of silage additives. *Journal of Dairy Science*, v. 101, n. 5, p. 3980–4000, 2018. DOI: 10.3168/jds.2017-13839.

OLIVEIRA, A. P.; SANTANA, A. S.; SANTANA, E. D. R.; LIMA, A. P. S.; FARO, R. R. N.; NUNES, R. S.; LIMA, A. D.; BLANK, A. F.; ARAÚJO, A. P. A.; CRISTALDO, P. F.; BACCI, L. Nanoformulation prototype of the essential oil of *Lippia sidoides* and thymol to population management of *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). *Industrial Crops and Products*, v. 107, p. 198–205, 2017. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.05.046.

OUDE ELFERINK, S. J. W. H.; KROONEMAN, J.; GOTTSCHAL, J. C.; SPOELSTRA, S. F.; FABER, F.; DRIEHUIS, F. Anaerobic conversion of lactic acid to acetic acid and 1,2-propanediol by *Lactobacillus buchneri*. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 67, n. 1, p. 125–132, 2001. DOI: 10.1128/AEM.67.1.125-132.2001.

PAHLOW, G.; MUCK, R. E.; DRIEHUIS, F.; OUDE ELFERINK, S. J. W. H.; SPOELSTRA, S. F. *Microbiology of ensiling*. In: BUXTON, D. R.; MUCK, R. E.; HARRISON, J. H. (Eds.). *Silage Science and Technology*. Madison: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America e Soil Science Society of America, 2003. p. 31–93.

PEDROSO, A. F.; NUSSIO, L. G.; LOURES, D. R. S.; PAZIANI, S. F.; RIBEIRO, J. L.; MARI, L. J.; ZOPOLLATTO, M.; SCHMIDT, P.; MATTOS, W. R. S.; HORII, J. Fermentation, losses, and aerobic stability of sugarcane silages treated with chemical

or bacterial additives. *Scientia Agricola*, v. 65, n. 6, p. 589–594, 2008. DOI: 10.1590/S0103-90162008000600004.

RAMDANI, D.; YUNIARTI, E.; JAYANEGARA, A.; CHAUDHRY, A. S. Roles of essential oils, polyphenols, and saponins of medicinal plants as natural additives and anthelmintics in ruminant diets: a systematic review. *Animals*, v. 13, n. 4, art. 767, 2023. DOI: 10.3390/ani13040767.

RANJIT, N. K.; KUNG JR., L. The effect of *Lactobacillus buchneri*, *Lactobacillus plantarum*, or a chemical preservative on the fermentation and aerobic stability of corn silage. *Journal of Dairy Science*, v. 83, n. 3, p. 526–535, 2000. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(00)74912-5.

SILVA, R. T.; SOUZA, L. L.; SILVA, M. C.; COSTA, R. F.; ROCHA, N. S.; CAMPOS, M. M.; OLIVEIRA, F. G. Evaluation of sweet orange essential oil on fermentation and aerobic stability of corn silage. *Scientia Agricola*, v. 82, e20230217, 2025. DOI: 10.1590/1678-992X-2023-0217.

SOUSA, B. M. L.; SANTOS, S. J.; BACKES, A. A.; SILVA, C. M.; FAGUNDES, J. L.; BLANK, A. F.; SANTOS FILHO, J. R. Óleo essencial nanoformulado de alecrim-pimenta (*Lippia sidoides*) como aditivo em silagens consorciadas. *Ciência Animal Brasileira*, v. 24, e-73623P, 2023. DOI: 10.1590/1809-6891v24e-73623P.

VERAS, H. N. H.; RODRIGUES, F. F. G.; COLARES, A. V.; MENEZES, I. R. A.; COUTINHO, H. D. M.; BOTELHO, M. A.; COSTA, J. G. M. Synergistic antibiotic activity of volatile compounds from the essential oil of *Lippia sidoides* and thymol. *Fitoterapia*, v. 83, n. 3, p. 508–512, 2012. DOI: 10.1016/j.fitote.2011.12.024.

WANG, H.; LIU, W.; LI, S.; JIA, S.; WANG, X. Screening of lactic acid bacteria tolerant to antimicrobial substances and their effects on the quality of *Cyperus esculentus* silage. *Microorganisms*, v. 13, n. 12, art. 2833, 2025. DOI: 10.3390/microorganisms13122833.

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

ZHOU, T.; LEI, X.; LUO, Y.; OU, Y.; TIAN, S.; XIE, Y.; ZHENG, Y.; SUN, H.; YANG, F. High temperatures and antibacterial plant additives change the fermentation quality, free amino acids and lactic acid bacteria fermentation type in *Caragana korshinskii* silage. *BMC Microbiology*, v. 25, n. 1, art. 437, 2025. DOI: 10.1186/s12866-025-04153-7.

ZOPOLLATTO, M.; DANIEL, J. L. P.; NUSSIO, L. G. Aditivos microbiológicos em silagens no Brasil: revisão dos aspectos da ensilagem e do desempenho de animais. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 38, supl. esp., p. 170–189, 2009. DOI: 10.1590/S1516-35982009001300018.