



Bioinsumos para nutrição de ruminantes em contribuição ao alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável



***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Agroenergia
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento***

DOCUMENTOS 48

Bioinsumos para nutrição de ruminantes em contribuição ao alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

*Félix Gonçalves de Siqueira
Rodrigo da Costa Gomes
Betania Ferraz Quirino
Giovanna Esperidião dos Santos Pereira
Aparecido Almeida Conceição*

***Embrapa Agroenergia
Brasília, DF
2022***

Embrapa Agroenergia
Parque Estação Biológica (PqEB), s/nº
Ed. Embrapa Agroenergia
Caixa Postal 40315
CEP 70770-901, Brasília, DF
Fone: +55 (61) 3448-1581
Fax: +55 (61) 3448-1589
www.embrapa.br/agroenergia
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações
da Embrapa Agroenergia

Presidente
Patrícia Verardi Abdelnur

Secretária-Executiva
Lorena Costa Garcia Calsing

Membros
*Alexandre Nunes Cardoso, Betulia de Moraes
Souto, João Ricardo Moreira de Almeida,
Leonardo Fonseca Valadares, Melissa Braga,
Patrícia Abrao de Oliveira Molinari, Priscila
Seixas Sabaini*

Revisão de texto
Everaldo Correia da Silva Filho

Normalização bibliográfica
Rejane Maria de Oliveira

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica e Ilustração da capa
Maria Goreti Braga dos Santos

1ª edição
Publicação digital (2022): PDF

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa, Superintendência de Comunicação

Bioinsumos para nutrição de ruminantes em contribuição ao alcance dos
Objetivos de Desenvolvimento Sustentável / Félix Gonçalves de Siqueira
... [et al]. – Brasília, DF : Embrapa Agroenergia, 2022.
PDF (48 p.) : il. color – (Documentos / Embrapa Agroenergia, ISSN 2177-
4439 ; 48)

1. Nutrição animal. 2. Biomassa vegetal. 3. Bovinocultura. I. Gomes,
Rodrigo da Costa. II. Quirino, Betania Ferraz. III. Pereira, Giovanna Esperidião
dos Santos. IV. Conceição, Aparecido Almeida. V. Título. VI. Série.

CDD (21. ed.) 636.0852

Autores

Félix Gonçalves de Siqueira

Biólogo, Ph.D. em Biologia Molecular, Enzimologia, pesquisador da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF

Rodrigo da Costa Gomes

Zootecnista, Ph.D. em Zootecnia, pesquisador da Embrapa Gado de Corte, Campo Grande, MS

Betania Ferraz Quirino

Bióloga, Ph.D. em Biologia Celular e Molecular, pesquisadora da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF

Giovanna Esperidião dos Santos Pereira

Biotechnologista, B.Sc. em Biotecnologia, mestranda em Ciências Genômicas e Biotecnologia, Universidade Católica de Brasília (UCB), Brasília, DF

Aparecido Almeida Conceição

Biotechnologista, M.Sc. em Biociências, doutorando em Biotecnologia e Biodiversidade, Rede Pró-Centro-Oeste, Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT), Brasília, DF

Apresentação

A população global atingiu aproximadamente 8 bilhões de pessoas, o que representa um enorme desafio em termos de disponibilidade de alimentos. O Brasil se destaca mundialmente em pecuária, sendo o segundo maior produtor de gado de corte. Esta atividade é essencial como fornecedora de proteína e outros nutrientes para consumo humano. No entanto, em fóruns internacionais essa atividade tem gerado preocupação do ponto de vista ambiental, uma vez que ruminantes produzem metano como subproduto do seu processo digestivo, sendo este um dos gases do efeito estufa. Neste contexto, esta publicação traz uma análise do tema bioinsumos microbianos para nutrição de ruminantes, uma vez que os esses podem contribuir para que o Brasil alcance uma pecuária não só sustentável, mas também mais eficiente. Os microrganismos e/ou fermentados microbianos podem ser utilizados na dieta nutricional animal como alimento ou aditivo, os quais podem modular a microbiota ruminal, com vários efeitos positivos tanto para os animais quanto para o ambiente.

Em 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU) lançou a Agenda 2030 que elenca 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Esta agenda global visa alinhar os esforços de cada país em torno de objetivos específicos prioritários. Como empresa pública subordinada ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) se soma às várias iniciativas em andamento no Brasil, contribuindo com pesquisa e inovação para o atingimento destes objetivos no setor agropecuário. Esta publicação detalha como o uso de bioinsumos microbianos na agropecuária de ruminantes contribui para o alcance de algumas metas listadas nos ODS 2 (Fome zero e agricultura

sustentável), ODS 12 (Consumo e produção responsáveis), ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima), ODS 14 (Vida na água) e ODS 15 (Vida na terra). Ações que levem ao cumprimento da agenda ODS são essenciais para assegurar o futuro da nossa espécie no planeta Terra.

Alexandre Alonso Alves
Chefe-Geral da Embrapa Agroenergia

Sumário

Autores	5
Apresentação	7
Introdução.....	11
Bioinsumos microbianos.....	13
Potencial dos fermentados de fungos filamentosos para nutrição animal ...	14
Benefícios dos fermentados fúngicos de biomassa vegetal na ração animal	16
Benefícios do uso direto dos fungos para nutrição animal.....	23
Metagenômica e a microbiota ruminal	27
Enzimas como bioinsumos comerciais para bovinocultura	31
Perspectivas para uso de bioinsumos de fermentados de fungos filamentosos na nutrição e sanidade de ruminantes.....	31
Ações da Embrapa vinculadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável para melhoria da nutrição de ruminantes	35
Considerações finais	36
Referências	37

Introdução

A pecuária é a principal fonte de gases de efeito estufa antropogênicos. Os principais gases são o metano (CH_4), com potencial de aquecimento global de 25 vezes, o óxido nitroso (N_2O), com um potencial de 298 vezes, e o dióxido de carbono (CO_2), resultante da fermentação entérica ou do manejo de esterco (Jiménez-Ocampo et al., 2019).

O Brasil é um dos maiores produtores de ruminantes do mundo, tendo atingido, em 2020, a marca de 218,2 milhões de cabeças de bovinos para produção de carne e leite. O País ocupou o segundo lugar entre os maiores produtores de carne bovina em 2020–2021, representando 16,8% da produção mundial, atrás apenas dos Estados Unidos (IBGE, 2020; Estados Unidos, 2021; Malafaia et al., 2021). Quanto a outros ruminantes, ovinos e caprinos, no mesmo ano, foi registrado, respectivamente, 20,6 e 12,1 milhões de cabeças (IBGE, 2020).

A produção de gado de corte brasileira é predominantemente extensiva, sistema no qual o animal é solto em extensas áreas contendo forrageiras, possui pouca eficiência na conversão do alimento em proteína e necessita de vastas áreas de pastagens (Pereira et al., 2020). No entanto, em busca de uma pecuária sustentável e mais eficiente, é observada a transição para outros modelos de produção, como os sistemas semi-intensivo e intensivo. O primeiro sistema mescla o método extensivo com o intensivo, permitindo que o gado se alimente em áreas com forrageiras, complementando a alimentação com rações e concentrados em diferentes estágios de desenvolvimento do animal. No segundo sistema, os animais se alimentam, predominantemente, de rações e minerais balanceados durante todo o ciclo de vida (Moreira, 2016).

Principalmente nos sistemas semi-intensivos e intensivos de produção, o uso de aditivos promotores de crescimento tem sido uma prática comum na busca de melhorias de desempenho produtivo. O uso dos ionóforos monensina, lasalocida, narasina ou salinomicina produzidos pelo fungo *Streptomyces* é recorrente, uma vez que eles podem melhorar o desempenho animal. Os ionóforos são antimicrobianos seletivos para bactérias gram-positivas, o que modula a microbiota ruminal. Entre os benefícios dos ionóforos está o aumento da relação propionato:acetato, a redução da pro-

dução de metano e o aumento do ganho de peso com um menor consumo de grão ou volumoso (Salman et al., 2006). No entanto, com o aumento da preocupação sobre resistência a antibióticos, o uso de tais aditivos tem sido contestado, ou até mesmo proibido em alguns países do mundo (McAllister et al., 2020). Assim, há uma necessidade crescente de novos modelos nutricionais mais adequados às exigências de mercado atuais para uma pecuária sustentável e eficiente, como tem sido preconizado em movimentos como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), promulgados pela Organização das Nações Unidas (ONU).

O uso de microrganismos (fermentados microbianos) na alimentação animal visando à modulação da microbiota ruminal já vem sendo observado, como o uso da levedura *Saccharomyces cerevisiae*, como aditivo probiótico. A levedura modifica a população de microrganismos do rúmen, mudando os padrões da fermentação, sendo observado o aumento dos ácidos graxos voláteis, digestibilidade da fibra e lignina, estabilização do pH ruminal e diminuição da concentração do ácido láctico. Entre os benefícios observados estão os aumentos da produção de leite e da taxa de crescimento, bem como a melhoria da sanidade animal (Alugongo et al., 2017; Mohammed et al., 2018).

Os fungos filamentosos também vêm sendo investigados, por melhorarem os materiais lignocelulósicos, base da alimentação dos ruminantes, e modular a dinâmica do rúmen, conforme pode ser constatado com os estudos apresentados nas Tabelas 1 e 2. Esses microrganismos podem revolucionar a forma de produção de insumos para a nutrição animal com foco para uma pecuária sustentável, no modelo de economia circular. Esses microrganismos e/ou seus metabolitos podem ser aplicados como aditivos, suplementos ou até mesmo como ingredientes para formulação das dietas nutricionais. Uma alimentação adequada dos ruminantes, visando à homeostase dos microrganismos ruminais, tem potencial de melhorar a eficiência da produtividade do animal, bem como reduzir a produção de gases poluentes, como metano (Matthews et al., 2019), que estão entre as preocupações apontadas de forma transversal em muitos dos ODS.

Bioinsumos microbianos

De acordo com o Decreto nº 10.375 (Brasil, 2020), é considerado bioinsumo o produto, processo ou a tecnologia de origem vegetal, animal ou microbiana destinado ao uso na produção, no armazenamento e no beneficiamento de produtos agropecuários, nos sistemas de produção aquáticos ou de florestas plantadas. Dessa maneira, os bioinsumos microbianos são compostos dos microrganismos vivos, ou de partes e produtos, provenientes de microalgas, bactérias e fungos. Os microrganismos são fontes de proteína, carboidratos, lipídeos, vitaminas, minerais e metabólitos bioativos, que podem ser utilizados em diferentes processos, entre eles a alimentação de ruminantes (Seo et al., 2010).

O uso de bioinsumos microbianos na agropecuária de ruminantes alcança diferentes ODS, em que o Brasil pode auxiliar no alcance de forma significativa, uma vez que detém um dos maiores rebanhos de ruminantes do mundo. Tais bioinsumos podem impactar no alcance de algumas metas listadas nos ODS 2 (Fome zero e agricultura sustentável), ODS 12 (Consumo e produção responsáveis), ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima), ODS 14 (Vida na água) e ODS 15 (Vida na terra). Os bioinsumos microbianos são fontes de diversos produtos essenciais para as atividades da indústria e da agropecuária, pois utiliza processos sustentáveis e eficientes que se encaixam na economia circular (Grimm; Wösten, 2018; Di Piazza et al., 2021). A produção de biomateriais a partir do cultivo de microrganismos também é uma realidade sustentável (Cerimi et al., 2019). Por serem organismos decompositores da matéria orgânica, incluindo fungos filamentosos, leveduras e bactérias, são utilizados no biotratamento de resíduos e contaminantes, incluindo os de origens da agropecuária.

Os microrganismos têm o potencial para ser uma fonte nutritiva para ruminantes, que pode ser mais barata, eficiente e sustentável. Tecnologias utilizando microalgas (Madeira et al., 2017; Altomonte et al., 2018), leveduras (Phesatcha et al., 2021), fungos filamentosos ascomicetos (Kong et al., 2021), basidiomicetos (Yousefi et al., 2022) e bactérias (Chen et al., 2020) têm indicado o potencial dessas fontes nutritivas como bioinsumo na integração da alimentação de ruminantes, seja na forma de aditivo, suplemento ou mesmo parte integral da ração (*direct fed microbial* – DFM). O DFM demonstra ser um

potencial modulador do rúmen, uma vez que melhora a eficiência alimentar, a fermentação, bem como reduz oxigênio reativo no rúmen, minimiza a produção de lactato, aumenta a digestibilidade dos alimentos, diminui o desenvolvimento de patógenos e estimula funções do sistema imune, inclusive com potencial de substituir antibióticos (Seo et al., 2010). A suplementação de ruminantes com leveduras (*single cell protein* – SCP) tem demonstrado inúmeros benefícios. As leveduras são capazes de modular a microbiota do rúmen, melhorando a digestibilidade dos alimentos e prevenindo desordens, por exemplo, a acidose. Em consequência do equilíbrio do processo fermentativo e digestivo do animal, há melhoria na produção de leite e carne, além de promover o bem-estar do animal (Elghandour et al., 2020).

Os fungos filamentosos ainda são pouco utilizados na nutrição de ruminantes, no entanto, são crescentes os dados obtidos que demonstram o potencial deles para ruminantes e monogástricos. Bioinsumos a partir desses microrganismos têm a vantagem de serem sustentáveis, necessitam de pouco espaço para produção e permitem um modelo de agropecuária circular, uma vez que os substratos (meio de cultivos microbianos) podem ser formulados a partir de biomassas residuais vegetais e/ou efluentes agroindustriais. Tais fermentados microbianos (bioinsumos) apresentam potencial de transformar passivos ambientais em ativos financeiros e sociais, indo ao encontro, por exemplo, das metas 12.2 (“Até 2030, alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais”) e 12.5 (“Até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso”), previstas no ODS 12 (Consumo e produção responsáveis).

Potencial dos fermentados de fungos filamentosos para nutrição animal

Os fungos são ricos em polissacarídeos, proteínas e metabólitos bioativos, que desempenham diferentes funções no desenvolvimento do animal. Além do fator nutritivo, desempenham, ainda, funções de antioxidante, anti-inflamatório de regulação do sistema imune e da microbiota. Basidiomicetos, como *Pleurotus*, *Lentinula* e *Agaricus*, e ascomicetos, como *Aspergillus* e *Trichoderma*, têm demonstrado potencial como parte da nutrição animal de ruminantes e monogástricos (Chuang et al., 2020). Os benefícios do trata-

mento com fungos compreendem desde a melhoria da digestibilidade de insumos lignocelulósicos até efeitos pré e probióticos (Hartinger; Zebeli, 2021).

Os fungos filamentosos (aeróbicos), ou fermentados fúngicos, podem ser utilizados de diferentes formas para nutrição de ruminantes, podendo ser obtidos de maneiras distintas ou de estruturas microbianas, como: a partir do corpo de frutificação, de expurgos de cogumelos comerciais e/ou aparas de processamento industrial, de fermentado da biomassa vegetal (micélio fúngico com mais material vegetal) ou do resíduo da produção/colheita de cogumelos (*spent mushroom substrate* – SMS). Também podem ser obtidos metabólitos primários (enzimas/proteínas) ou secundários (compostos químicos de baixo peso molecular e com atividade bioativa conhecida), fazendo-se uso de processos de extração aquosa ou alcóolica, por exemplo.

A obtenção do corpo de frutificação dos fungos é um processo mais laborioso e caro para o consumo humano, assim, o uso como aditivo na alimentação animal, até o momento, não é viável, no entanto, estudos com monogástricos têm demonstrado efeitos benéficos aos animais (Abro et al., 2016; Fanhani et al., 2016). Como alternativa à competição com a nutrição humana, podem ser usados resíduos da produção dos cogumelos, as aparas dele, desde que elas possuam valor nutritivo comparável a outras fontes nutritivas (Mahfuz et al., 2019; Baziun et al., 2020). Para produção em larga escala para animais, é profícuo o uso de fermentados (cultivo dos fungos em biomassa vegetal antes da frutificação) e/ou o próprio SMS (resíduo da produção de cogumelos), já que ambos não competem com a nutrição humana, além de haver o reaproveitamento de resíduos e também possuir moléculas bioativas dos fungos. Os metabólitos e as enzimas obtidos com a extração do cultivo dos fungos também podem ser utilizados como aditivos na alimentação de ruminantes, desde que eles possuam atividades biológicas que possam modular o rúmen (Morgavi et al., 2013).

Entre as diversas atividades analisadas dos fungos filamentosos, é possível dividir as ações desses microrganismos em duas partes no beneficiamento da nutrição animal: indireta e direta. A primeira parte relaciona-se às vantagens previstas na biomassa vegetal, material lignocelulósico, que, posteriormente, será utilizado na nutrição animal. A segunda parte relaciona-se aos benefícios referentes, diretamente, ao organismo animal a partir das substâncias, metabólitos primários e secundários dos fungos (Figura 1).

Essa separação é de forma didática apenas, desde que as modificações ocorridas nas biomassas vegetais contendo micélio fúngico, posteriormente, beneficiem o organismo animal.

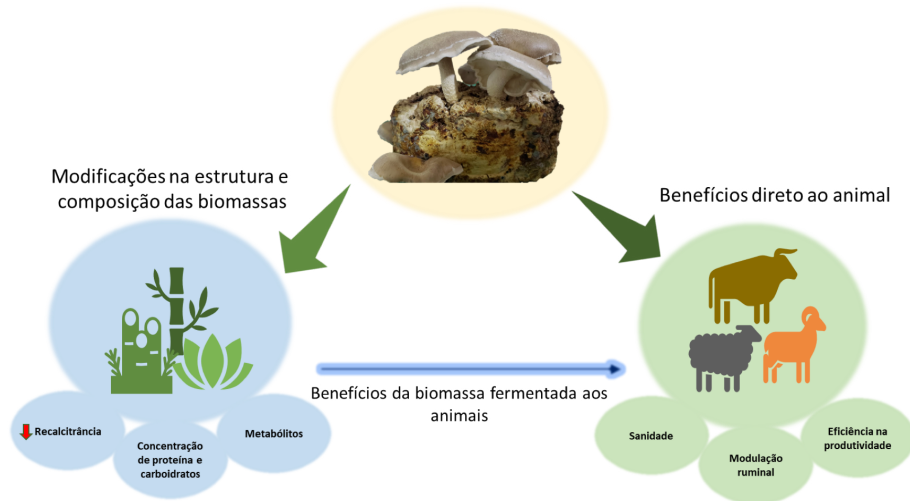


Figura 1. Beneficiamento dos fungos filamentosos nas biomassas vegetais e organismo animal.

Benefícios dos fermentados fúngicos de biomassa vegetal na ração animal

Os ruminantes são capazes de assimilar diferentes biomassas vegetais como alimento. As mais comuns são forrageiras (gramíneas e leguminosas), materiais residuais da agroindústria (tortas e farelos) e grãos (sorgo, soja e milho). Esses produtos fornecem ao animal polissacarídeos (celulose, hemicelulose e amido), proteínas e ácidos graxos, que são fermentados pela microbiota no rúmen para obtenção de energia, principalmente a partir dos ácidos graxos de cadeia curta. No entanto, a presença de estruturas recalcitrantes na parede celular vegetal, principalmente a lignina e a celulose cristalina, dificulta

o acesso às frações da matéria vegetal (Ferdeş et al., 2020). O rúmen é uma estrutura especializada em desconstruir o complexo lignocelulósico. Para isso, conta com uma microbiota composta de bactérias, fungos, protozoários e arqueias capazes de construir um ambiente de fermentação especializado na conversão dos polissacarídeos vegetais em ácidos graxos de cadeia curta que representa energia para o animal (Bhujbal et al., 2022). Assim, a homeostase da microbiota do ruminante é essencial para o desenvolvimento e sanidade do animal. Além da composição dos microrganismos, a qualidade dos nutrientes ingeridos pelo animal promove alterações na dinâmica da fermentação (Belanche et al., 2012; Li et al., 2019; Matthews et al., 2019).

Os basidiomicetos, principalmente os denominados como fungos de podridão branca, também são conhecidos pela produção de enzimas capazes de desconstruir a lignina presente na parede celular vegetal e de permitir o acesso aos carboidratos celulose e hemicelulose. Durante a colonização, os fungos produzem enzimas, como lacases e peroxidases, que degradam a complexa malha da lignina, melhorando, assim, a digestibilidade do material. Investigações em digestão *in vitro* têm demonstrado melhoria da digestibilidade de vários resíduos lignocelulósicos da agroindústria, como palha de trigo (Nayan et al., 2018a), palha de milho (Zhao et al., 2020; Wang et al., 2021), palha de soja, gramíneas (Wan; Li, 2011), palha de arroz (Khonkhaeng; Cherdthong, 2020), palha de aveia (Zheng et al., 2020), entre outras (Tabela 1). Trabalhos científicos também têm demonstrado que alguns fungos filamentosos são capazes de reduzir a celulose cristalina presente na parede celular vegetal, que oferece um maior grau de recalcitrância desse material (Nuchdang et al., 2015).

O pré-tratamento da matéria vegetal também pode ser feito a partir dos extratos enzimáticos dos fungos, não necessitando da etapa de cultivo direto na biomassa (Azmi et al., 2020). Assim, o biotratamento com fungos filamentosos é capaz de mudar a composição química da estrutura da parede celular vegetal, diminuindo a matéria seca do fermentado e os índices de fibra em detergente neutro e ácido (FDN e FDA). Dependendo da espécie fúngica, a diminuição de hemicelulose e de celulose pode ser mais ou menos acentuada (Niu et al., 2018; Zheng et al., 2020). Os fungos filamentosos também são capazes de solubilizar proteínas presentes na parede celular vegetal, as quais podem ser utilizadas como fonte de aminoácidos pela microbiota do

animal (Nayan et al., 2018b). A degradação da matéria lignocelulósica por fungos filamentosos depende da espécie vegetal (Wan; Li, 2011) e da espécie ou variante fúngica. A espécie fúngica ideal é aquela que degrada preferencialmente a lignina e deixa remanescente livre de celulose e hemicelulose em menor tempo de cultivo (Shrivastava et al., 2014).

Além da mudança da estrutura química do material vegetal, os fungos filamentosos também contribuem com o incremento de novas moléculas provenientes dos metabólitos e micélio fúngico na biomassa. Os fungos filamentosos transformam os nutrientes presentes nas biomassas vegetais em estruturas celulares próprias, como a parede celular fúngica vegetativa, que é composta de quitina, glucanas, melanina e glicoproteínas, além de outras estruturas, como ergosterol, ácidos graxos, proteínas e metabólitos secundários (Rodrigues, 2018; Patel; Free, 2019). Os fungos convertem o nitrogênio vegetal em estruturas próprias, principalmente as proteicas, capazes de alterar a composição de aminoácidos da biomassa, assim o micélio se torna uma rica fonte de proteína para o ruminante (Shrivastava et al., 2014; Wang et al., 2021). As demais estruturas fúngicas também desempenham funções na microbiota dos animais – como a quitina, que, aparentemente, favorece o desenvolvimento dos protozoários, servindo como fonte de energia – bem como contribuem para a produção de ácidos graxos voláteis (Miltko et al., 2015).

Um derivado da quitina, a quitosana, é estudado e usado como agente direcionador do metabolismo do nitrogênio no rúmen, melhorando a absorção de energia e diminuindo a produção de metano (Jiménez-Ocampo et al., 2019). A β -glucana fúngica também melhora a produtividade dos ruminantes, a digestibilidade da matéria seca da ração, bem como modifica a estrutura das vilosidades intestinais em bezerros, diminui infecções por bactérias e ativa o sistema imune do animal, sendo um potencial candidato a substituto de antibióticos comerciais (Ma et al., 2015; Kruger; Werf, 2018). Mesmo com poucas referências sobre os benefícios do ergosterol para o desenvolvimento de ruminantes, esse bioativo desempenha atividade anti-inflamatória e antioxidante (Jeong; Park, 2020). Em monogástricos, tem sido demonstrada a capacidade de conversão em vitamina D sérica, fígado e rins (Baur et al., 2019), e a mesma capacidade foi observada na carne de novilhas alimentadas com cogumelos a fim de se obter carne fortificada com a vitamina D (Duffy et al., 2018).

Outro benefício dos fungos filamentosos à biomassa vegetal é a produção de metabólitos secundários. Os fungos filamentosos são verdadeiras (bio) fábricas de células. Eles são especializados na biotransformação da matéria orgânica com produção de diferentes substâncias (Madhavan et al., 2022). Na alimentação de ruminantes, é observada a produção de diferentes vitaminas: tiamina, riboflavina, piridoxina, ácido fólico e niacina (Wang et al., 2021), assim como a produção de enzimas, como lacases, peroxidases, fitases, xilanases, celulases, amilases e pectinases (Ferreira et al., 2018; Corrêa; Araújo, 2020), além de metabólitos secundários, como a lovastatina. A lovastatina é um metabólito secundário produzido por fungos filamentosos com *Aspergillus terreus* e *Pleurotus ostreatus* (Khonkhaeng; Cherdthong, 2020), como também vem sendo avaliada como potencial aditivo para ruminantes desde que ela demonstrou redução da população de arqueias metanogênicas, levando, conseqüentemente, à diminuição da produção de metano (Ábrego-Gacía et al., 2021).

Entre outros metabólitos, alguns possuem funções como antioxidantes, anti-inflamatórios, antiparasitários, antifúngicos e antibacterianos. Tais fungos podem produzir diversos ácidos orgânicos, como ácido cítrico, glucônico, itacônico, málico, fumárico e láctico (Ruijter et al., 2002). Esses ácidos orgânicos são produzidos por diferentes espécies de fungos e podem interferir no pH da microbiota (Mao et al., 2021). No entanto, a suplementação com ácido cítrico, por exemplo, demonstrou ser capaz de modificar a dinâmica da microbiota ruminal com o aumento da produção de ácido graxos voláteis, o aumento de cálcio (Ca) e fósforo sérico, bem como proporcionou o aumento da produção de leite em vacas leiteiras suplementadas com o ácido (Chandrika et al., 2022). O tratamento prévio da ração (milho) com ácido cítrico proporcionou uma diminuição na produção de gás e na degradação da matéria seca, também diminuiu a produção de CH_4 e CO_2 , no entanto, o padrão fermentativo favoreceu a produção de acetato in vitro (Shen et al., 2019).

Mesmo sendo uma fonte de diversos metabólitos bioativos (Sanchez; Demain, 2017; Hoeksma et al., 2019), essas substâncias ainda são pouco estudadas no tocante aos benefícios para ruminantes. Nesse viés, mais estudos são necessários para elucidar o potencial dessas moléculas na modulação da microbiota ruminal, bem como no sistema imune do animal. Muitos estudos têm demonstrado que o incremento de fermentados de fungos fila-

mentos na alimentação animal pode contribuir na melhoria da sanidade e produtividade deles, entretanto, o mecanismo de ação de possíveis metabólitos secundários ainda não foi esclarecido (Liu et al., 2015; Sucu et al., 2019; Hassan et al., 2020).

O fungo filamentososo tem a capacidade de (bio)acumular e/ou metabolizar macro e microminerais. A capacidade de bioacumulação de minerais depende da espécie fúngica e pode ser utilizada como método de disponibilização como suplemento. Micélio rico em selênio tem potencial para suprir a necessidade do elemento para bezerros com benefícios para eles (Muszyńska et al., 2020). Outros microelementos, como o ferro (Fe), também podem ser acumulados e utilizados com o micélio (Scheid et al., 2020). Outros minerais também são investigados, por exemplo, o lítio (Lopes et al., 2022) e o zinco (Zn), fósforo (P) e potássio (K) (Yan; Chang, 2012; Vieira et al., 2013).

Algumas biomassas vegetais possuem características adequadas para a nutrição animal, mas possuem fatores antinutricionais ou tóxicos que impedem sua utilização. Os fungos filamentosos têm demonstrado serem eficazes na biodestoxificação dessas biomassas, permitindo a utilização delas para nutrição animal, como é o caso da torta de *Jatropha curcas* (Sharath et al., 2014; Guimarães et al., 2022). Micotoxinas presentes em rações e que são fatores antinutricionais para os ruminantes podem ser tratadas a partir dos fungos filamentosos (Kim; Vujanovic, 2017).

Tabela 1. Melhorias em biomassas lignocelulósicas a partir do cultivo de fungos filamentosos com potencial uso na nutrição de ruminantes.

Fungo	Biomassa	Enzima ou metabólito	Benefício	Referência
<i>Ceriporiopsis subvermispora</i> , <i>Lentinula edodes</i> , <i>Pleurotus eryngii</i>	Palha de trigo	-	Aumento da digestibilidade ruminal in vitro	(Nayan et al., 2018a)
<i>Pleurotus ostreatus</i> , <i>Lentinula edodes</i> , <i>Hericium erinaceus</i> , <i>Pleurotus eryngii</i> , <i>Flammulina filiformis</i>	Palha de milho	Lignina e manganês, peroxidases, lacase, CMCase e FPase	Redução da produção de metano; deslignificação	(Zhao et al., 2020)
<i>Pleurotus djamor</i> , <i>Pleurotus eryngii</i> , <i>Pleurotus sajor-caju</i> , <i>Pleurotus citrinopileatus</i>	Palha de milho	-	Incremento de proteína; aumento da digestibilidade in vitro	(Wang et al., 2021)
<i>Ceriporiopsis subvermispora</i>	Palha de milho, palha de trigo, palha de soja gramínea e madeira de lei	Lacase e manganês, peroxidase	Aumento do rendimento de açúcar disponível	(Wan; Li, 2011)
<i>Pleurotus ostreatus</i> , <i>Volvariella volvacea</i>	Palha de arroz	Lovastatina	Redução de metano; aumento da digestibilidade in vitro	(Khonkhaeng; Cherdthong, 2020)
<i>Phanerochaete chrysosporium</i> , <i>Pleurotus ostreatus</i> , <i>Irpex lacteus</i>	Palha de trigo	-	Aumento da digestibilidade in vitro	(Niu et al., 2018)
<i>Phanerochaete chrysosporium</i> , <i>Pleurotus ostreatus</i> , <i>Irpex lacteus</i> , <i>Phlebia acerina</i>	Palha de aveia	-	Deslignificação; melhoria nos parâmetros nutritivos	(Zheng et al., 2020)
<i>Ganoderma lucidum</i>	Cacho de frutas vazio de palma de óleo	-	Aumento da digestibilidade in vitro	(Nur-Nazratul et al., 2021)

Continua...

Tabela 1. Continuação.

Fungo	Biomassa	Enzima ou metabólito	Benefício	Referência
<i>Pleurotus ostreatus</i> , <i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Palha de arroz	-	Designificação	(Datsomor et al., 2022)
<i>Trichoderma reesei</i> , <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Caulões de <i>Moringa oleifera</i>	-	Melhoria nos parâmetros nutritivos	(Kewan et al., 2017)
<i>Phanerochaete chrysosporium</i> , <i>Trichoderma koningiopsis</i> , <i>Trichoderma asperellum</i>	Resíduo de semente de <i>Camellia</i>	-	Designificação	(Yang et al., 2019)
<i>Beauveria bassiana</i> , <i>Fusarium flocciferum</i> , <i>Rhizodiscina cf. lignyota</i> , <i>Aspergillus niger</i>	Torta de azeitona	Xilanase, lacase, peroxidases, celulases	Diminuição de compostos fenólicos	(Chebaibi et al., 2019)
<i>Pleurotus sajor-caju</i>	Bagaço de cana-de-açúcar	-	Melhoria nos parâmetros nutritivos	(Sirisan et al., 2019)
<i>Pleurotus florida</i>	Bagaço de cana-de-açúcar	-	Diminuição da matéria seca, fibra de detergente neutra e ácida; aumento da proteína bruta, matéria orgânica e cinzas	(Kermani et al., 2019)
<i>Aspergillus terreus</i> , <i>Ganoderma lucidum</i> , <i>Panus lecomtei</i> , <i>Pleurotus pulmonarius</i> , <i>Fistulina hepatica</i>	Grão de sorgo, milho e aveia, feijão guandu, moringa, coast-moringa, palha de arroz.	Lovastatina, beta-glucana, lacase	Aumento da concentração de proteína e valor nutracêutico nos fermentados	(Conceição et al., 2022)

Benefícios do uso direto dos fungos para nutrição animal

Os microrganismos que habitam o rúmen contribuem diretamente para a sanidade e eficiência da produção do animal de corte ou leite (Matthews et al., 2019). A composição da microbiota ruminal difere a partir da genética de cada animal (Li et al., 2019; Mcloughlin et al., 2020), que também sofre alterações nos padrões fermentativos e na composição de microrganismos a partir do tipo de nutrientes fornecidos ao animal. Por exemplo, o aumento de fibras na ração promove o aumento da diversidade de bactérias e fungos, eleva a concentração de microrganismos celulolíticos, incluindo protozoários, fungos anaeróbicos e metanogênicos, quando comparada a uma ração rica em amido (Belanche et al., 2012). Assim, a garantia de uma microbiota ruminal funcional é fator essencial para uma pecuária eficiente e sustentável.

Os fungos filamentosos podem ser considerados alimentos funcionais para os ruminantes (Tabela 2). Esses microrganismos desempenham função de prebiótico, modulando a microbiota ruminal e os parâmetros fermentativos, e de probiótico, desde que sejam capazes de desempenhar funções benéficas diretamente ao animal, como inibir a ação de micotoxinas, produzir enzimas celulolíticas e modular a expressão de diferentes genes relacionados ao sistema imune. No entanto, ambos os mecanismos ainda não são totalmente elucidados, necessitando de mais estudos (Oyeleke; Okusanmi, 2008; Ekwemalor, 2015; Mohammed et al., 2018).

A modificação da produção de ácidos graxos voláteis pela microbiota do rúmen é observada quando se adiciona fermentados à base de fungos filamentosos na alimentação. Observa-se alteração na produção de acetato, propionato, isobutirato, butirato, isovalerato e valerato, e na mesma proporção entre eles. Por exemplo, um experimento de digestão *in vitro* utilizando-se o fermentado de *Phanerochaete chrysosporium* e *Pleurotus ostreatus* em palha de trigo foi capaz de diminuir a relação acetato:propionato em comparação à biomassa vegetal sem tratamento, indicando que o fermentado tem potencial para beneficiar a absorção de energia provinda do alimento pelo animal (Niu et al., 2018). Os ácidos graxos são resultantes da atividade metabólica da microbiota do rúmen, bem como são absorvidos e convertidos em energia para o animal. O balanço da produção dos ácidos graxos voláteis contribui para

o desenvolvimento do animal, por exemplo, o aumento da proporção de propionato em relação ao acetato tende a uma melhor conversão da energia do alimento para o desenvolvimento de carcaça do animal ou produção de leite (Moloney, 1998; Penner, 2014). No entanto, essa proporção (acetato:propionato) é variável de acordo com o fermentado utilizado (tipo de substrato e espécie fúngica), assim, avaliações *in vitro* e *in vivo* são necessárias para determinar o desempenho do animal e a produção de gases, sempre que for utilizado novo lote de fermentado.

No animal, a suplementação da ração com produtos fermentados à base de fungos filamentosos tem mostrado uma melhoria na produção de leite e na sua composição (gordura, proteína, lactose), um aumento do peso corporal, além de parâmetros fisiológicos, como o aumento de glicose no sangue. Diferentes alterações nos parâmetros fisiológicos também são notadas, como o aumento de ureia e glicose sanguíneos e HDL, ferro e do hormônio testosterona em ruminantes (Park et al., 2012). Os cogumelos também demonstram efeito anti-inflamatório, e alguns ruminantes apresentaram uma diminuição da concentração de enzimas, como a fosfatase alcalina, o que indica um fígado mais saudável (Yousefi et al., 2022). Grãos fermentados com micélios cogumelos, tidos como medicinais, demonstraram ter potencial antiparasitário intestinal e foram associados a melhorias na produção de leite de cabras com a tendência ao aumento da produção, bem como aumento da concentração de caseína. Os derivados do leite também demonstraram cor mais intensa e menor oxidação lipídica, com maior capacidade antioxidante (Bonanno et al., 2019). As alterações fisiológicas do animal dependem da concentração de fermentado utilizado para a formulação da ração (Sirisan et al., 2019), o que exige avaliações direcionadas ao animal para determinação da quantidade de fermentado a ser incluso na alimentação.

Trabalhos de digestão *in vitro* também têm demonstrado que a fermentação com fungos filamentosos tem potencial para diminuir a produção de metano durante a fermentação (Zhao et al., 2020). O mecanismo pelo qual se dá a redução do gás de efeito estufa ainda não é bem determinado, no entanto, percebe-se que alguns metabólitos produzidos pelos fungos, tais como a lovastatina, possuem atividade inibitória contra bactérias metanogênicas (Khonkhaeng; Cherdthong, 2020). Além disso, a redução da proporção acetato:propionato observada na modulação ruminal com a suplementação com

fungos filamentosos pode ser um fator contribuinte para a mitigação do gás metano (CH_4), desde que o direcionamento das moléculas H_2 para a produção do ácido propiônico ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$) diminua a disponibilidade para a via do metano (Patra et al., 2017).

Tabela 2. Benefícios da suplementação das rações com fungos filamentosos para ruminantes.

Fungo	Biomassa/fermentado	Animal	Benefício	Referência
<i>Lentinula edodes</i>	Palha de milho	Cordeiro	Melhoria na qualidade da carne; diminuição de nematóides gastrointestinais	(Xiang et al., 2020)
<i>Pleurotus sajor-caju</i>	Bagaço de cana-de-açúcar	Vacas leiteiras	Melhorias na qualidade do leite; melhorias nos parâmetros sanguíneos	(Sirisan et al., 2019)
<i>Crinipellis</i> sp. RCK-1	Palha de trigo	Bezerros bubalinos	Ganho de peso	(Shrivastava et al., 2014)
<i>Ganoderma balabacense</i>	Extrato aquoso do SMS de <i>Ganoderma balabacense</i>	Vacas leiteiras	Aumento da produtividade; concentração de proteína e triglicérides no leite	(Liu et al., 2015)
<i>Aspergillus oryzae</i>	<i>Aspergillus oryzae</i> comercial	Vacas leiteiras	Aumento da produtividade do leite	(Sucu et al., 2019)
<i>Cordyceps militaris</i>	SMS de <i>Cordyceps militaris</i>	Bodes	Melhoria no consumo de energia; diminuição de colesterol e triglicérides plasmáticos	(Chanjula; Cherdthong, 2018)
<i>Agaricus bisporus</i>	10% e 20% de aparas de <i>Agaricus bisporus</i> na ração total/mixed ration (TMR)	Cordeiros	Lenta degradabilidade ruminal e fermentação; redução do custo da dieta de cordeiro; aumento do nível de proteína no sangue	(Yousefi et al., 2022)
<i>Lentinula edodes</i> , <i>Cordyceps</i> spp., <i>Ganoderma lucidum</i> e <i>Pleurotus ostreatus</i>	Grãos de sorgo fermentados	Ovelhas	Diminuição da contagem de parasitas intestinais; tendência para o aumento da produção de leite; leite contendo antioxidante	(Bonanno et al., 2019)
<i>Pleurotus eryngii</i>	SMS de <i>Pleurotus eryngii</i>	Cervos	Aumento na concentração de glicose, HDL e ureia (N) sanguíneos; aumento de ferro e testosterona sérica	(Park et al., 2012)
<i>Lentinula edodes</i>	Micélio de <i>Lentinula edodes</i> em cultivo líquido enriquecido com Se(IV)	Bezerros	Aumento de selênio sérico e do peso corporal	(Muszyńska et al., 2020)

Metagenômica e a microbiota ruminal

A comunidade microbiana presente no rúmen é bastante diversa, sendo constituída de bactérias (10^{10} a 10^{11} células por mililitro), de arqueias (10^6 a 10^8 células por mililitro), de fungos (10^3 a 10^6 zoósporos por mililitro), de protozoários ciliados (10^4 a 10^6 células por mililitro) e de bacteriófagos (10^7 a 10^9 partículas por mililitro) (Matthews et al., 2019). Entre esses componentes, as bactérias são as melhores caracterizadas e os vírus são os menos. Estima-se que apenas aproximadamente 11% das bactérias ruminais foram cultivadas em laboratório (Edwards et al., 2004), o que indica que as técnicas da microbiologia tradicional baseadas em cultivo não são adequadas para se obter informações completas sobre esse ambiente.

Metagenômica é uma estratégia utilizada para estudar os microrganismos presentes em amostras ambientais – como o ambiente ruminal –, sem a necessidade de cultivá-los. Ela é realizada pela extração direta do DNA da comunidade microbiana e com protocolos de biologia molecular. A metagenômica tem sido utilizada para estudar a microbiota ruminal de diferentes ruminantes, como bovinos (Brulc et al., 2009), búfalos (Sun et al., 2021), cabras (Cunha et al., 2011), dromedários (Hinsu et al., 2021), iaques (Dai et al., 2012), ovelhas e veados (Glendinning et al., 2021).

Mamíferos herbívoros não são capazes de produzir celulases para digerir o material ingerido, sendo a microbiota ruminal quem faz esse papel. Assim, a microbiota ruminal desses animais tem a habilidade de converter carboidratos da parede celular vegetal em carne e leite. Tal capacidade é resultado de uma simbiose entre bactérias, arqueias metanogênicas, fungos anaeróbicos e protozoários capazes de converter a biomassa lignocelulósica ingerida pelo animal em proteínas microbianas e ácidos graxos voláteis (VFAs: acetato, butirato e propionato), que são absorvidos pelo epitélio do animal e usados para a manutenção e crescimento do animal. Com os custos recentemente reduzidos para sequenciamento, essa microbiota altamente especializada do rúmen tem sido objeto de inúmeros estudos, não só para caracterizá-la, mas também para entender como modificações nela impactam na eficiência alimentar do animal (Gruninger et al., 2019) e na produção do gás de efeito estufa metano (Li et al., 2021). Além disso, há interesse nas enzimas codifica-

das por esses microrganismos ruminais e como elas atuam para desconstruir a biomassa lignocelulósica, o que tem potenciais aplicações industriais.

Em termos de informações sobre as comunidades microbianas ruminais, alguns projetos grandes foram concluídos. O censo ruminal global (Henderson et al., 2015) foi publicado em 2015. Nesse projeto, a composição das comunidades microbianas do rúmen e as porções anteriores do intestino de 32 espécies de 35 países foram determinadas. As amostras analisadas eram provenientes de vacas, bisões, búfalos, ovinos, caprinos, veados, alpacas, guanacos e lhamas. A composição microbiana ruminal foi analisada por sequenciamento de amplicons de genes codificadores de 16S rRNA para bactérias e arqueias, e 18S rRNA para protozoários ciliados. Embora tenham sido encontradas variações associadas principalmente à dieta, foi possível identificar algumas bactérias e arqueias dominantes amplamente distribuídas nas amostras, de maneira a caracterizar um microbioma ruminal “core” (núcleo central) universal. Já as populações de protozoários se mostraram mais variáveis.

Outro projeto grande concluído foi o Hungate 1.000 (Seshadri et al., 2018), que se propôs a sequenciar 1.000 genomas de microrganismos ruminais de diferentes partes do mundo. Esse projeto sequenciou o genoma de 410 bactérias e arqueias cultivadas, com representantes de todas as famílias bacterianas e de arqueias ruminais cultivadas.

Diferenças na eficiência alimentar são, em parte, atribuídas à microbiota gastrointestinal dos animais ruminantes. Assim, nessa linha, há trabalhos relacionando a comunidade microbiana ruminal à eficiência alimentar de bovinos (Li; Guan, 2017; Delgado et al., 2019; Auffret et al., 2020). Em um estudo usando-se metagenômica (Li; Guan, 2017), foi reportado que vacas com maior eficiência alimentar apresentaram maior abundância de *Bacteroidetes* e *Prevotella*. Já em outro estudo em gado de corte com metatranscriptômica (Delgado et al., 2019) foi revelado um “core” de microrganismos ativos no microbioma ruminal que inclui seis filos bacterianos (*Proteobacteria*, *Firmicutes*, *Bacteroidetes*, *Spirochaetes*, *Cyanobacteria* e *Synergistetes*), oito famílias bacterianas (*Succinivibrionaceae*, *Prevotellaceae*, *Ruminococcaceae*, *Lachnospiraceae*, *Veillonellaceae*, *Spirochaetaceae*, *Dethiosulfovibrionaceae* e *Mogibacteriaceae*) e quatro grupos de arqueias (*Methanomassiliicoccales*, *Methanobrevibacter ruminantium*, *Methanobrevibacter gottschalkii* e

Methanosphaera), além de 112 vias metabólicas e 126 enzimas ativas em carboidratos (CAZymes). Diferenças entre bovinos de alta e baixa eficiência alimentar foram expostas: 32 vias metabólicas e 12 CAZymes têm expressão diferente. De maneira geral, encontrou-se que o microbioma ruminal de animais com baixa eficiência alimentar possui maior diversidade de atividades do que aqueles de animais com alta eficiência alimentar. Já outro estudo recente (Auffret et al., 2020) reportou que bovinos de corte com alta eficiência alimentar têm, em sua microbiota ruminal, várias espécies capazes de formar biofilmes e de produzir metabólitos, como butirato e propionato, que têm maior capacidade de contribuir para a produção de energia do que o acetato.

Segundo Jackson et al. (2020), as arqueias ruminais podem ser responsáveis pela produção de 27% do metano (CH₄) antropogênico. O metano é um dos gases do efeito estufa que tem potencial de aquecimento global 25 vezes maior que o CO₂ (Stocker et al., 2013). A complexa comunidade microbiana ruminal atua em conjunto para digerir em condições anaeróbicas o material lignocelulósico ingerido pelo animal. São as arqueias que utilizam o hidrogênio (H₂) do ambiente ruminal para reduzir o CO₂ a metano (CH₄). Especificamente, a reação química que ocorre é $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$. Bioquimicamente, no seu processo de produção de adenosina trifosfato (ATP), as arqueias metanogênicas do rúmen utilizam o CO₂ como acceptor final de elétrons na cadeia de transporte de elétrons para respirar na ausência de oxigênio (O₂) (ambiente anaeróbico), gerando metano. Algumas arqueias ruminais usam o H₂ para reduzir o metanol, em vez do CO₂, ($\text{CH}_3 - \text{OH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$), também gerando metano.

Uma das maneiras de mitigar a produção de metano por ruminantes é por meio da manipulação da sua dieta. Nesse contexto, em um trabalho recente, sistemas de alimentação foram relacionados à produção de metano e também à composição da microbiota ruminal (Bharanidharan et al., 2021). A presença de um microbioma ruminal “core” universal e pouco diverso abre a possibilidade da sua manipulação por estratégias que tenham como alvo as arqueias metanogênicas dominantes (Henderson et al., 2015). Nesse sentido, recentemente foi publicado um trabalho (Li et al., 2021) em que, usando-se técnicas de fermentação ruminal in vitro (*rusitec*, *rumen simulation technique*), foi determinada a influência de colina na produção de metano pela microbiota ruminal. Verificou-se que a suplementação de 200 mM de cloreto de colina

ou de bicarbonato de colina foi capaz de inibir a produção de metano em 97% a 100% após 15 dias. Os autores reportaram que essa redução na produção de metano está associada a altos níveis de etanol. Curiosamente, o sequenciamento do metagenoma mostrou que a parcela metanogênica da comunidade foi praticamente dizimada. Note-se que alguns microrganismos podem utilizar a colina convertendo-a em lactato, etanol ou formato, que são drenos de hidrogênio no metabolismo ruminal, e que houve enriquecimento para esses microrganismos. Verificou-se que os grupos mais fortemente associados com a mitigação de metano foram *Megasphaera elsdenii* e *Denitrobacterium detoxificans*, ambos capazes de consumir lactato, um produto intermediário, atuando como dreno de hidrogênios. Assim, aparentemente o aumento de grupos taxonômicos capazes de utilizar lactato, atuando como dreno de hidrogênios, levou a uma indisponibilização deles para produção de metano por arqueias. Infelizmente, os experimentos também apontaram características indesejáveis para o desempenho de animais, como a redução na digestibilidade de fibras e o aumento dos níveis de amônia ruminal.

Em síntese, estudos de metagenômica, bem como genômica e outras ômicas realizados nos últimos 10 anos, têm ampliado, significativamente, o conhecimento sobre a microbiota ruminal. Esses estudos diferem daqueles do passado por possibilitarem uma visão global das comunidades microbianas ruminais. Outro ponto importante é que a metagenômica não depende do cultivo de microrganismos, trazendo informações mais completas. Assim, tendo em vista o papel central da microbiota ruminal para vários aspectos de importância econômica dos ruminantes, espera-se que esses estudos contribuam para que se consiga obter resultados mais rápidos e expressivos na manipulação favorável dessa microbiota.

No que concerne aos ODS, levando-se em consideração a grande importância dos ruminantes como fonte de proteína de alta qualidade para humanos (carne e leite), avanços na produção de bovinos no Brasil via intervenções no microbioma ruminal monitoradas por estratégia metagenômica contribuirão sobremaneira para atingir as metas/ODS: Meta 2.4 do ODS 2 (Fome zero e agricultura sustentável); Metas 12.2 e 12.4 do ODS 12 (Consumo e produção responsáveis); Meta 13.1 do ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima); e Meta 15.3 do ODS 15 (Vida terrestre).

Enzimas como bioinsumos comerciais para bovinocultura

Há em diversos países bioinsumos baseados em enzimas desenvolvidos por diferentes empresas para a bovinocultura. Esses produtos visam modificar a digestão ruminal para se obter melhor aproveitamento dos nutrientes, gerando melhor produtividade. Como exemplos, pode-se citar a Alltech Inc., uma empresa americana que conta com uma grande linha de enzimas para bovinocultura, sendo elas: Amaize, que contém enzimas amilolíticas, e Fribozyme, coquetel de enzimas celulolíticas, como celulasas e hemicelulasas. A Quimtia é uma empresa argentina que disponibiliza no mercado brasileiro a Precizyon X200, que é um coquetel enzimático contendo celulasas, amilases, xilanases e proteases. A Tortuga traz à venda o RumiStar, composto de alfa-amilase. A Adisseo (a Bluestar Company) conta com a Rovabio Advance, rica em arabinofuranosidases (ABFs), que agem de forma sinérgica com xilanases na desramificação de fibras, a Rovabio Excel, com mais de 19 enzimas, e, por fim, a Rovabio Advance Phy, abundante em fitases, que agem na liberação do grupo fosfato do ácido fítico, aumentando o valor nutricional da ração (Imran et al., 2016). Recentemente, a Dutch States Mines (DSM), empresa holandesa, lançou o produto Bovaer, que, segundo textos jornalísticos, é baseado em inibição de “enzimas” envolvidas na produção de metano no rúmen. A Embrapa e parceiros comerciais também vêm desenvolvendo coquetéis enzimáticos de base microbiana ricos em enzimas celulolíticas, hemicelulolíticas e oxidativas para nutrição de ruminantes.

Perspectivas para uso de bioinsumos de fermentados de fungos filamentosos na nutrição e sanidade de ruminantes

O uso de derivados de fungos filamentosos (extratos e enzimas) já é explorado comercialmente, como o fungo *Aspergillus oryzae* para ruminantes (Sucu et al., 2019). No entanto, o uso de biomassas fermentadas ainda é pouco explorado para esse fim, apesar dos benefícios demonstrados. Mesmo que diferentes estudos tenham constatado o potencial dos fungos para uso em suplementos de ruminantes, ou mesmo como parte da ração, ainda não

é observada uma popularização desse processo. Isso se dá por diferentes razões, sendo o escalonamento do processo de fermentação, principalmente em estado sólido, um impasse que ainda é de alto custo de instalação e produção, além da necessidade de mão de obra especializada. No entanto, a possibilidade da implementação de uma agropecuária circular que envolva a cultura de cogumelos e nutrição animal pode viabilizar o processo em que o SMS ou fermentado gerados do cultivo de espécies de cogumelos comestíveis retornam ao ciclo econômico como bioinsumo animal (Umor et al., 2021; Leong et al., 2022). A produção de cogumelos comestíveis também é um processo sustentável, pois agrega valor a vários resíduos lignocelulósicos (Hultberg et al., 2018), que podem ser integrados na criação dos ruminantes, fazendo uso dos SMS (Tabela 1 e Figura 2).

Dentro do processo de fermentação, vários fatores devem ser mais bem estabelecidos para viabilizar o processo. Um primeiro fator é a estabilidade da produção do fermentado, principalmente ao se tratar de fermentação em estado sólido para que se obtenham, consistentemente, produtos com valor nutricional similar, independentemente dos insumos utilizados. A fermentação pode resultar em produtos diferentes com apenas pequenas mudanças no processo, como o uso de uma variante fúngica diferente dentro de uma mesma espécie (Tinoco et al., 2001), o uso de biomassas heterogêneas (compostas de diferentes partes da planta) ou o uso de uma mesma espécie de planta cultivada em diferentes regiões (Arora; Sharma, 2009). Outro fator determinante para a obtenção de um fermentado nutritivo é o tempo de fermentação, desde que a produção de metabólitos se diferencie em relação ao tempo de cultivo (Zhao et al., 2020). As variantes no processo fermentativo são determinantes para o produto final, sendo capaz até de interferir no consumo. Dependendo do processo utilizado para obtenção da ração, pode haver a diminuição do consumo voluntário pelo animal (Adamović et al., 1998).

A incorporação dos fungos filamentosos na dieta de ruminantes tem potencial para uma maior eficiência na produção, diminuindo os custos de sistemas mais intensivos e, conseqüentemente, diminuindo a necessidade de novas áreas para a produção no modelo extensivo. No entanto, a princípio, a produção em larga escala de fermentado de fungos filamentosos para a nutrição animal ainda requer empenho em estruturas mais sofisticadas, visando à integração do processo microbiano e o conhecimento de quais serão os

benefícios a cada fase de vida dos ruminantes. Para a viabilização de uma instalação que utilize ou produza fermentados para ruminantes, é necessário empenho em setores distintos, mas complementares (Figura 2). O primeiro setor, pré-cultivo, mais técnico, visa à escolha, à manutenção e à preservação das cepas fúngicas. Os fungos são seres vivos dinâmicos e podem sofrer mutações que modificam o seu metabolismo, inclusive durante os processos de preservação deles (Sakurai et al., 2019). Assim, há a necessidade da utilização de espécies que apresentem uma estabilidade maior e de mão de obra especializada. Esse processo pode ser realizado por empresas terceirizadas especializadas, o que representa um aumento de custo necessário. Além dos microrganismos, a escolha da biomassa também é essencial, uma vez que, como visto, a modificação dela pode influenciar no produto final; assim, deve haver avaliação desse insumo de lotes diferentes. O ideal é a obtenção de biomassas mais abundantes na região produtora, no intuito de reduzir custos com transporte e variações muito grandes em sua composição.

No segundo setor, são envolvidos todos os passos necessários para a fermentação da biomassa. Nesse sentido, há uma necessidade de mão de obra especializada na prática de cultivo de cogumelos filamentosos, no entanto, os cultivos em estado sólido tendem ser menos custosos, por causa da possibilidade do uso de equipamentos mais rústicos e substratos mais baratos (Hölker et al., 2004). A produção do fermentado pode ser associada ao cultivo comercial de cogumelos, em que o SMS gerado e as aparas residuais podem ser direcionados à alimentação animal (Grimm; Wösten, 2018; Grimm et al., 2020). Essa opção, no entanto, restringe a utilização de espécies fúngicas, considerando que apenas as produtoras de cogumelos comestíveis seriam utilizadas, ou seja, apenas os ascomicetos, como o *A. terreus* e *A. oryzae*, por exemplo, não seriam utilizados.

O pós-cultivo (SMS) diz respeito ao tratamento e armazenamento dos derivados fúngicos e, finalmente, à incorporação na alimentação do ruminante, o qual deve ser realizado em um setor industrial distinto. O processo de estoque (tempo de prateleira) do material fermentado também deve ser avaliado adequadamente, devendo preservar os carboidratos disponíveis e os metabólitos fúngicos. O estoque de forma anaeróbica do material fermentado pode ser um método adequado para evitar a degradação dos metabólitos ao longo do tempo (Mao et al., 2021). É possível, ainda nesse viés, realizar o processo de

extração de metabólitos dos fermentados (Liu et al., 2015). Todavia, esse processo representará uma etapa extra e com custo mais elevado em um outro setor da cadeia produtiva. Por fim, a composição do formulado contendo os fungos filamentosos ou extratos deve ser preparada de acordo com os interesses da criação dos ruminantes (crescimento, engorda, leite), observando-se, ainda, a quantidade utilizada para cada espécie animal e que sejam avaliados os efeitos em longo prazo até a estabilização do processo produtivo.

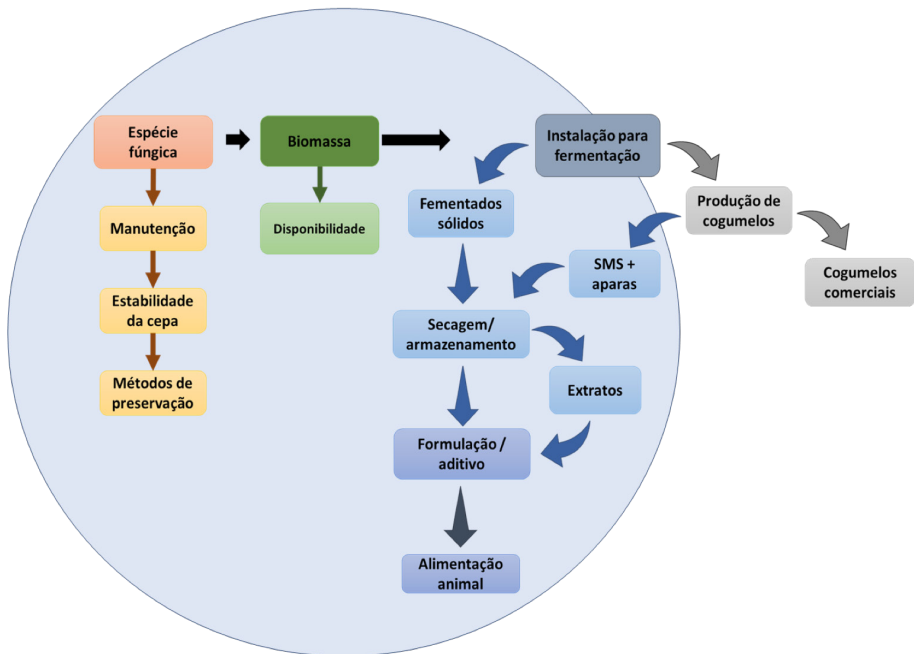


Figura 2. Integração de cadeias produtivas a partir da fermentação de biomassas vegetais por fungos filamentosos.

Ações da Embrapa vinculadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável para melhoria da nutrição de ruminantes

Entre as inúmeras pesquisas relevantes para a agropecuária desenvolvida na Embrapa, algumas contribuem com a consolidação dos benefícios observados pelos processos fermentativos na cadeia de produção de animais, incluindo os ruminantes. Entre as metas dos ODS, está a garantia de um futuro sustentável para as novas e presentes gerações. A agregação de valor em resíduos da agroindústria por meio dos processos fermentativos garante a continuidade da produção e a transição de uma economia linear para uma circular. Visando à transição para uma agropecuária mais sustentável, pesquisas desenvolvidas na Embrapa Agroenergia e parceiros têm demonstrado grande potencial para eliminar a toxicidade em biomassas residuais, bem como a avaliação de fermentados para a nutrição dos ruminantes. A seguir, são listadas algumas dessas linhas de pesquisas:

- Biodetoxificação de biomassas vegetais agroindústrias com fatores anti-nutricionais e tóxicos por meio de fungos filamentosos.
- Pré-tratamento biológico de biomassas vegetais agroindustriais recalcitrantes para maior digestibilidade de ruminantes.
- Bioinsumos de fermentados fúngicos como moduladores ruminais em substituição de antibióticos.
- Ferramentas “ômicas” para melhor entendimento do microbioma ruminal e busca de genes de enzimas e outros metabolitos para construções de microrganismos recombinantes.

Por meio da produção de enzimas, principalmente oxidases, o cultivo de fungos filamentosos foi capaz de reduzir a níveis seguros moléculas tóxicas em resíduos do processamento do caroço de algodão (gossipol) (Conceição et al., 2018; Soares Neto et al., 2020; Cunha, 2021; Guimarães et al., 2022) e ésteres de forbol em torta da semente de pinhão-manso (Gomes et al., 2018). Os resíduos fermentados puderam ser direcionados para a nutrição animal. Além de garantir a segurança para uso na ração, têm sido investi-

gadas a melhoria da digestibilidade e a modulação da microbiota ruminal com os fermentados como aditivos na nutrição de ruminantes, desde que o processo fermentativo consiga concentrar as proteínas (Conceição et al., 2022) e produzir substâncias bioativas com atividade antimicrobiana, antioxidante (Cunha, 2021; Guimarães et al., 2022; Conceição et al., 2022) e anti-inflamatória. Produtos com tais potenciais já são uma realidade com o uso dos fungos filamentosos¹.

Considerações finais

Vivemos em um mundo globalizado. Na prática, isso significa que os problemas e as soluções necessárias não estão confinados às fronteiras geográficas entre países. Assim, a Organização das Nações Unidas (ONU) lançou em 2015 a Agenda 2030, que contém 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que visam mobilizar todos os países do mundo para obtenção global e concreta de maior sustentabilidade.

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) dedica-se a pesquisar e inovar no setor agropecuário. Assim, tem-se trabalhado para desenvolver soluções para o agronegócio brasileiro, sempre tendo preocupação em relação à sustentabilidade das soluções desenvolvidas. O Brasil destaca-se, mundialmente, na produção comercial de ruminantes, especialmente bovinos. Uma produção adequada de ruminantes no Brasil é de grande importância como fonte de proteína e outros nutrientes para a crescente população global (cerca de 8 bilhões de pessoas, atualmente). Por sua vez, ruminantes contribuem para o aquecimento global, na medida em que seus microrganismos ruminais produzem metano, um dos gases do efeito estufa.

Ciente de seu papel mundial como líder no setor agropecuário e buscando excelência, o Brasil tem procurado utilizar conceitos modernos para exercer essa atividade lançando mão de práticas calcadas na sustentabilidade. É nesse contexto que a utilização de bioinsumos na nutrição de ruminantes pode ter papel importante e contribuir para que o Brasil alcance vários ODS. Entre os ODS mais fortemente impactados nesse sentido estão os ODS 2

¹ Disponível em: <https://www.americanbiosystems.com/products/direct-fed-microbials/aspergillus-oryzae-fermentation-product/>.

e 13. O ODS 2 refere-se à fome zero e agricultura sustentável. Com ele, pretende-se acabar com a fome, alcançando-se segurança alimentar, ao mesmo tempo, promovendo uma agricultura sustentável, como está descrito nas premissas da Meta 2.4 desse ODS. Já o ODS 13, Meta 13.1, pretende focar esforços e tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos. A melhoria da nutrição dos rebanhos brasileiros e a utilização de bioinsumos como aliados para modular a população microbiana ruminal representam uma grande oportunidade para aumentos na produtividade animal e redução das emissões de gases do efeito estufa da pecuária. Assim, conforme detalhado neste documento, o Brasil pode fazer contribuições significativas para o alcance dos ODS 2, 12, 13 e 15, gerando, ao mesmo tempo, renda e desenvolvimento para sua população.

Referências

- ÁBREGO-GACÍA, A.; POGGI-VARALDO, H. M.; ROBLES-GONZÁLEZ, V.; PONCE-NOYOLA, T.; CALVA-CALVA, G.; RÍOS-LEAL, E.; ESTRADA-BÁRCENAS, D.; MENDOZA-VARGAS, A. Lovastatin as a supplement to mitigate rumen methanogenesis: an overview. **Journal of Animal Science and Biotechnology**, v. 12, n. 1, article number 123, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40104-021-00641-8>.
- ABRO, R.; CHANGEZI, G. A.; ABRO, S. H.; YASMIN, A.; LEGHARI, R. A.; RIZWANA, H.; LOCHI, G. M. Carcass and digestibility patterns fed different levels of mushroom (*Pleurotus ostreatus*) in the diet of broiler. **Science International (Lahore)**, v. 28, n. 3, p. 2985-2988, 2016.
- ADAMOVIĆ, M.; GRUBIĆ, G.; MILENKOVIĆ, I.; JOVANOVIĆ, R.; PROTIĆ, R.; SRETENOVIĆ, L.; STOJČEVIĆ, L.J. The biodegradation of wheat straw by *Pleurotus ostreatus* mushrooms and its use in cattle feeding. **Animal Feed Science and Technology**, v. 71, n. 3-4, p. 357-362, Apr. 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(97\)00150-8](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(97)00150-8).
- ALDOMONTE, I.; SALARI, F.; LICITRA, R.; MARTINI, M. Use of microalgae in ruminant nutrition and implications on milk quality – a review. **Livestock Science**, v. 214, p. 25-35, Aug. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2018.05.006>.
- ALUGONGO, G. M.; XIAO, J.; WU, Z.; LI, S.; WANG, Y.; CAO, Z. Review: utilization of yeast of *Saccharomyces cerevisiae* origin in artificially raised calves. **Journal of Animal Science and Biotechnology**, v. 8, n. 1, article number 34, 2017. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40104-017-0165-5>.
- ARORA, D. S.; SHARMA, R. K. Enhancement in in vitro digestibility of wheat straw obtained from different geographical regions during solid state fermentation by white rot fungi. **BioResources**, v. 4, n. 3, p. 909-920, 2009.
- AUFFRET, M. D.; STEWART, R. D.; DEWHURST, R. J.; DUTHIE, C.-A.; WATSON, M.; ROEHE, R. Identification of microbial genetic capacities and potential mechanisms within the rumen

- microbiome explaining differences in beef cattle feed efficiency. **Frontiers in Microbiology**, v. 11, p. 1229, 5 jun. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01229>.
- AZMI, M. A.; YUSOF, M. T.; ZAKARIA, Z.; MUSTAPHA, N. M.; SAAD, M. Z.; HASSIM, H. A. Application of biological pretreatment using enzyme extracts from filamentous fungi to improve ruminal degradability of oil palm fronds. **Research Square**, 2020. 25 p. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-31049/v1>.
- BAUR, A. C.; KÜHN, J.; BRANDSCH, C.; HIRCHE, F.; STANGL, G. I. Intake of ergosterol increases the vitamin D concentrations in serum and liver of mice. **Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology**, v. 194, article 105435, Nov. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsbmb.2019.105435>.
- BAZIUN, B.; TAGHIZADEH, A.; PAYA, H.; HOSSEINKHANI, A. In vitro determination of nutritional value of compost and stem of the white button mushroom. **Iranian Journal of Applied Animal Science**, v. 10, n. 2, p. 257-263, 2020.
- BRASIL. Decreto nº 10.375, de 26 de maio de 2020. Institui o Programa Nacional de Bioinsumos e o Conselho Estratégico do Programa Nacional de Bioinsumos. **Diário Oficial da União**: seção 1, ed. 100, p. 105, 2 maio 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.375-de-26-de-maio-de-2020-258706480>. Acesso em: 17 ago. 2022.
- BELANCHE, A.; DOREAU, M.; EDWARDS, J. E.; MOORBY, J. M.; PINLOCHE, E.; NEWBOLD, C. J. Shifts in the rumen microbiota due to the type of carbohydrate and level of protein ingested by dairy cattle are associated with changes in rumen fermentation. **The Journal of Nutrition**, v. 142, n. 9, p. 1684-1692, Sept. 2012. DOI: <https://doi.org/10.3945/jn.112.159574>.
- BHARANIDHARAN, R.; LEE, C. H.; THIRUGNANASAMBANTHAM, K.; IBIDHI, R.; WOO, Y. M.; LEE, H.-G.; KIM, J. G.; KIM, K. H. Feeding systems and host breeds influence ruminal fermentation, methane production, microbial diversity and metagenomic gene abundance. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 701081, 20 jul. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.701081>.
- BHUJBAL, S. K.; GHOSH, P.; VIJAY, V. K.; RATHOUR, R.; KUMAR, M.; SINGH, L.; KAPLEY, A. Biotechnological potential of rumen microbiota for sustainable bioconversion of lignocellulosic waste to biofuels and value-added products. **Science of the Total Environment**, v. 814, article 152773, Mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152773>.
- BONANNO, A.; DI GRIGOLI, A.; VITALE, F.; DI MICELI, G.; TODARO, M.; ALABISCO, M.; GARGANO, M. L.; VENTURELLA, G.; ANIKE, F. N. Effects of diets supplemented with medicinal mushroom myceliated grains on some production, health, and oxidation traits of dairy ewes. **International Journal of Medicinal Mushrooms**, v. 21, n. 1, p. 89-103, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1615/IntJMedMushrooms.2018029327>.
- BRULC, J. M.; ANTONOPOULOS, D. A.; MILLER, M. E. B.; WILSON, M. K.; YANNARELL, A. C.; DINSDALE, E. A.; EDWARDS, R. E.; FRANK, E. D.; EMERSON, J. B.; WACKLIN, P.; COUTINHO, P. M.; HENRISSAT, B.; NELSON, K. E.; WHITE, B. A. Gene-centric metagenomics of the fiber-adherent bovine rumen microbiome reveals forage specific glycoside hydrolases. **Proceedings of the National Academy of Sciences of The United States of America**, v. 106, n. 6, p. 1948-1953, Feb. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0806191105>.
- CERIMI, K.; AKKAYA, K. C.; POHL, C.; SCHMIDT, B.; NEUBAUER, P. Fungi as source for new bio-based materials: a patent review. **Fungal Biology and Biotechnology**, v. 6, n. 17, p. 1-10, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40694-019-0080-y>.

CHANDRIKA, B.; SURYANARAYANA, M. V. A. N.; DEVASENA, B.; REDDY, Y. R. Effect of citric acid supplementation on rumen fermentation pattern, milk composition and blood biochemical profile in cross bred cattle. **The Pharma Innovation Journal**, v. 11, n. 3, p. 427-431, 2022. Special issue.

CHANJULA, P.; CHERDTHONG, A. Effects of spent mushroom *Cordyceps militaris* supplementation on apparent digestibility, rumen fermentation, and blood metabolite parameters of goats. **Journal of Animal Science**, v. 96, n. 3, p. 1150-1158, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1093/jas/skx079>.

CHEBAIBI, S.; GRANDCHAMP, M. L.; BURGÉ, G.; CLÉMENT, T.; ALLAIS, F.; LAZIRI, F. Improvement of protein content and decrease of anti-nutritional factors in olive cake by solid-state fermentation: a way to valorize this industrial by-product in animal feed. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 128, n. 3, p. 384-390, Sept. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2019.03.010>.

CHEN, J.; HARSTAD, O. M.; MCALLISTER, T.; DÖRSCH, P.; HOLO, H. Propionic acid bacteria enhance ruminal feed degradation and reduce methane production in vitro. **Acta Agriculturae Scandinavica A: animal sciences**, v. 69, n. 3, p. 169-175, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/09064702.2020.1737215>.

CHUANG, W. Y.; HSIEH, Y. C.; LEE, T.-T. The effects of fungal feed additives in animals: a review. **Animals**, v. 10, n. 5, p. 1-15, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani10050805>.

CONCEIÇÃO, A. A.; MENDES, T. D.; MENDONÇA, S.; QUIRINO, B. F.; ALMEIDA, E. G.; SIQUEIRA, F. G. Nutraceutical enrichment of animal feed by filamentous fungi fermentation. **Fermentation**, v. 8, n. 8, p. 402, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation8080402>.

CONCEIÇÃO, A. A.; SOARES NETO, C. B.; RIBEIRO, J. A. de A.; SIQUEIRA, F. G. de; MILLER, R. N. G.; MENDONÇA, S. Development of an RP-UHPLC-PDA method for quantification of free gossypol in cottonseed cake and fungal-treated cottonseed cake. **PLoS ONE**, v. 13, n. 5, p. 1-17, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196164>.

CORRÊA, T. L. R.; ARAÚJO, E. F. de. Fungal phytases: from genes to applications. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 51, n. 3, p. 1009-1020, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42770-020-00289-y>.

CUNHA, I. S.; BARRETO, C. C.; COSTA, O. Y. A.; BOMFIM, M. A.; CASTRO, A. P.; KRUGER, R. H.; QUIRINO, B. F. *Bacteria* and *Archaea* community structure in the rumen microbiome of goats (*Capra hircus*) from the semiarid region of Brazil. **Anaerobe**, v. 17, n. 3, p. 118-124, June 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2011.04.018>.

CUNHA, J. R. B. **Fermentados de macrofungos cultivados em tortas de sementes de algodão ou pinhão-mansão como fontes de bioativos, enzimas e nutrientes para produção de bactérias probióticas**. 2021. 128 p. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola) — Universidade Federal de Lavras, Lavras.

DAI, X.; ZHU, Y.; LUO, Y.; SONG, L.; LIU, D.; CHEN, F.; WANG, M.; LI, J.; ZENG, X.; DONG, Z.; HU, S.; LI, L.; XU, J.; HUANG, L.; DONG, X. Metagenomic insights into the fibrolytic microbiome in yak rumen. **PLoS ONE**, v. 7, n. 7, e40430, 13 jul. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040430>.

DATSOMOR, O.; GOU-Q., Z.; MIAO, L. Effect of ligninolytic axenic and coculture white-rot fungi on rice straw chemical composition and in vitro fermentation characteristics. **Scientific Reports**, v. 12, article number 1129, 2022. 8 p. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05107-z>.

DELGADO, B.; BACH, A.; GUASCH, I.; GONZÁLEZ, C.; ELCOSO, G.; PRYCE, J. E.; GONZALEZ-RECIO, O. Whole rumen metagenome sequencing allows classifying and predicting feed efficiency and intake levels in cattle. **Scientific Reports**, v. 9, article number 11, Dec. 2019. 11 p. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36673-w>.

DI PIAZZA, S.; BENVENUTI, M.; DAMONTE, G.; CECCHI, G.; MARIOTTI, M. G.; ZOTTI, M. Fungi and circular economy: *Pleurotus ostreatus* grown on a substrate with agricultural waste of lavender, and its promising biochemical profile. **Recycling**, v. 6, n. 2, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling6020040>.

DUFFY, S. K.; O'DOHERTY, J. V.; RAJAURIA, G.; CLARKE, L. C.; HAYES, A.; DOWLING, K. G.; O'GRADY, M. N.; KERRY, J. P.; JAKOBSEN, J.; CASHMAN, K. D.; KELLY, A. K. Vitamin D-biofortified beef: a comparison of cholecalciferol with synthetic versus UVB-mushroom-derived ergosterol as feed source. **Food Chemistry**, v. 256, p. 18-24, Aug. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.099>.

EDWARDS, J. E.; MCEWAN, N.; TRAVIS, A. J.; WALLACE, R. J. 16S rDNA library-based analysis of ruminal bacterial diversity. **Antonie van Leeuwenhoek**, v. 86, n. 3, p. 263-281, Oct. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:ANTO.0000047942.69033.24>.

EKWEMALOR, K. **The effect of a mushroom (*Coriolus versicolor*) based probiotic on innate immunity in goats naturally infected with gastrointestinal parasites**. 2015. 86 p. Thesis (Master of Science) — North Carolina Agricultural and Technical State University, Greensboro, North Carolina.

ELGHANDOUR, M. M. Y.; KHUSRO, A.; ADEGBEYE, M. J.; TAN, Z.; ABU HAFSA, S. H.; GREINER, R.; UGBOGU, E. A.; ANELE, U. Y.; SALEM, A. Z. M. Dynamic role of single-celled fungi in ruminal microbial ecology and activities. **Journal of Applied Microbiology**, v. 128, n. 4, p. 950-965, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/jam.14427>.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service. **Livestock and poultry: world markets and trade**. 2021. 16 p. Disponível em: https://downloads.usda.library.cornell.edu/usda-esmis/files/73666448x/9593vs24n/4m90fs46x/livestock_poultry.pdf. Acesso em: 12 ago. 2022.

FANHANI, J. C.; MURAKAMI, A. E.; GUERRA, A. F. Q. G.; NASCIMENTO, G. R. do; PEDROSO, R. B.; ALVES, M. C. F. *Agaricus blazei* in the diet of broiler chickens on immunity, serum parameters and antioxidant activity. **Semina: ciências agrárias**, v. 37, n. 4, p. 2235-2246, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2016v37n4p2235>.

FERDEŞ, M.; DINCĂ, M. N.; MOICEANU, G.; ZĂBAVĂ, B. Ş.; PARASCHIV, G. Microorganisms and enzymes used in the biological pretreatment of the substrate to enhance biogas production: a review. **Sustainability**, v. 12, n. 17, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12177205>.

FERREIRA, F. L.; DALL'ANTONIA, C. B.; SHIGA, E. A.; ALVIM, L. J.; BOM PESSONI, R. A. Sugarcane bagasse as a source of carbon for enzyme production by filamentous fungi. **Hoehnea**, v. 45, n. 1, p. 134-142, Mar. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/2236-8906-40/2017>.

GLENDINNING, L.; GENÇ, B.; WALLACE, R. J.; WATSON, M. Metagenomic analysis of the cow, sheep, reindeer and red deer rumen. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1990, dez. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81668-9>.

GOMES, T. G.; HADI, S. I. A.; ALVES, G. S. C.; MENDONÇA, S.; SIQUEIRA F. G. de; MILLER, R. N. G. Current strategies for the detoxification of *Jatropha curcas* seed cake: a review. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 66, n. 11, p. 2510-2522, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b05691>.

GRIMM, D.; KUENZ, A.; RAHMANN, G. Integration of mushroom production into circular food chains. **Organic Agriculture**, v. 11, p. 309-317, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13165-020-00318-y>.

GRIMM, D.; WÖSTEN, H. A. B. Mushroom cultivation in the circular economy. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 102, p. 7795-7803, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9226-8>.

GRUNINGER, R. J.; RIBEIRO, G. O.; CAMERON, A.; MCALLISTER, T. A. Invited review: Application of meta-omics to understand the dynamic nature of the rumen microbiome and how it responds to diet in ruminants. **Animal**, v. 13, n. 9, p. 1843-1854, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1751731119000752>.

GUIMARÃES, M. B.; SIQUEIRA, F. G. de; CAMPANHA, R. B.; RIBEIRO, J. A. de A.; MAGALHÃES, P. O.; MENDONÇA, S. Evaluation of bio-detoxification of *Jatropha curcas* seed cake and cottonseed cake by basidiomycetes: nutritional and antioxidant effects. **Waste and Biomass Valorization**, v. 13, n. 3, p. 1475-1490, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01599-4>.

HARTINGER, T.; ZEBELI, Q. The present role and new potentials of anaerobic fungi in ruminant nutrition. **Journal of Fungi**, v. 7, n. 3, p. 1-15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/jof7030200>.

HASSAN, R. A.; SHAFI, M. E.; ATTIA, K. M.; ASSAR, M. H. Influence of oyster mushroom waste on growth performance, immunity and intestinal morphology compared with antibiotics in broiler chickens. **Frontiers in Veterinary Science**, v. 7, p. 1-12, June 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00333>.

HENDERSON, G.; COX, F.; GANESH, S.; JONKER, A.; YOUNG, W.; GLOBAL RUMEN CENSUS COLLABORATORS; JANSSEN, P. H. Rumen microbial community composition varies with diet and host, but a core microbiome is found across a wide geographical range. **Scientific Reports**, v. 5, n. 1, article number 14567, 26 nov. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep14567>.

HINSU, A. T.; Characterizing rumen microbiota and CAZyme profile of Indian dromedary camel (*Camelus dromedarius*) in response to different roughages. **Scientific Reports**, v. 11, article number 9400, Apr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88943-9>.

HOEKSMAN, J.; MISSET, T.; WEVER, C.; KEMMINK, J.; KRUIJTZER, J.; VERSLUIS, K.; LISKAMP, R. M. J.; BOONS, G. J.; HECK, A. J. R.; BOEKHOUT, T.; HERTOOG, J. den. A new perspective on fungal metabolites: identification of bioactive compounds from fungi using zebrafish embryogenesis as read-out. **Scientific Reports**, v. 9, article number 17546, 2019. 16 p. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54127-9>.

HÖLKER, U.; HÖFER, M.; LENZ, J. Biotechnological advantages of laboratory-scale solid-state fermentation with fungi. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 64, n. 2, p. 175-186, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-003-1504-3>.

HULTBERG, M.; PRADE, T.; BODIN, H.; VIDAKOVIC, A.; ASP, H. Adding benefit to wetlands – valorization of harvested common reed through mushroom production. **Science of the Total Environment**, v. 637-638, p. 1395-1399, Oct. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.106>.

IBGE. Produção da Pecuária Municipal 2020. **Produção da Pecuária Municipal**, v. 48, n. 1, p. 1-12, 2020.

IMRAN, M.; NAZAR, M.; SAIF, M.; KHAN, M. A.; SANALLAH; VARDAN, M.; AVED, O. J. Role of enzymes in animal nutrition: a review. **PSM Veterinary Research**, v. 1, n. 2, p. 38-45, 2016.

JACKSON, R. B.; SAUNOIS, M.; BOUSQUET, P.; CANADELL, J. G.; POULTER, B.; STAVERT, A. R.; BERGAMASCHI, P.; NIWA, Y.; SEGERS, A.; TSURUTA, A. Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 7, p. 071002, 1 July 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9ed2>.

JEONG, Y. U.; PARK, Y. J. Ergosterol peroxide from the medicinal mushroom *Ganoderma lucidum* inhibits differentiation and lipid accumulation of 3T3-L1 adipocytes. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 2, p. 1-13, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms21020460>.

JIMÉNEZ-OCAMPO, R.; VALENCIA-SALAZAR, S.; PINZÓN-DÍAZ, C. E.; HERRERA-TORRES, E.; AGUILAR-PÉREZ, C. F.; ARANGO, J.; KU-VERA, J. C. The role of chitosan as a possible agent for enteric methane mitigation in ruminants. **Animals**, v. 9, n. 11, p. 1-12, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani9110942>.

KERMANI, M. M. M.; BAHROLOLOUM, S.; KOOHZADI, F. Investigating the possibility of producing animal feed from sugarcane bagasse using oyster mushrooms: a case in rural entrepreneurship. **Journal of Global Entrepreneurship Research**, v. 9, n. 1, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40497-019-0174-2>.

KEWAN, K. Z.; SALEM, F. A.; SALEM, A. Z. M.; ABDOU, A. R.; EL-SAYED, H. M.; EISA, S. S.; ZAKI, E. A.; ODONGO, N. E. Nutritive utilization of *Moringa oleifera* tree stalks treated with fungi and yeast to replace clover hay in growing lambs. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 1, p. 161-173, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0158-6>.

KHONKHAENG, B.; CHERDTHONG, A. Improving nutritive value of purple field corn residue and rice straw by culturing with white-rot fungi. **Journal of Fungi**, v. 6, n. 2, p. 1-11, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/jof6020069>.

KIM, S. H.; VUJANOVIC, V. Biodegradation and biodetoxification of *Fusarium* mycotoxins by *Sphaerodes mycoparasitica*. **AMB Express**, v. 7, article number 145, 2017. 9 p. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13568-017-0446-6>.

KONG, F.; LU, N.; LIU, Y.; ZHANG, S.; JIANG, H.; WANG, H.; WANG, W.; LI, S. *Aspergillus oryzae* and *aspergillus niger* co-cultivation extract affects in vitro degradation, fermentation characteristics, and bacterial composition in a diet-specific manner. **Animals**, v. 11, n. 5, article number 1248, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani11051248>.

KRUGER, D.; WERF, M. van der. Benefits of application of yeast β -glucans in ruminants. **Only Application Note**, 16 Aug. 2018.

- LEONG, Y. K.; MA, T.-W.; CHANG, J. C.; YANG, F.-C. Recent advances and future directions on the valorization of spent mushroom substrate (SMS): a review. **Bioresource Technology**, v. 344, part A, article number 126157, Jan. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126157>.
- LI, F.; GUAN, L. L. Metatranscriptomic profiling reveals linkages between the active rumen microbiome and feed efficiency in beef cattle. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 83, n. 9, e00061-17, maio 2017. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.00061-17>.
- LI, F.; LI, C.; CHEN, Y.; LIU, J.; ZHANG, C.; IRVING, B.; FITZSIMMONS, C.; PLASTOW, G.; GUAN, L. L. Host genetics influence the rumen microbiota and heritable rumen microbial features associate with feed efficiency in cattle. **Microbiome**, v. 7, n. 1, article number 92, 2019. 17 p. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40168-019-0699-1>.
- LI, Y.; KREUZER, M.; CLAYSSSEN, Q.; EBERT, M.-O.; RUSCHEWEYH, H.-H.; SUNAGAWA, S.; KUNZ, C.; ATTWOOD, G.; AMELCHANKA, S.; TERRANOVA, M. The rumen microbiome inhibits methane formation through dietary choline supplementation. **Scientific Reports**, v. 11, article number 21761, dez. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01031-w>.
- LIU, Y.; ZHAO, C.; LIN, D.; LIN, H.; LIN, Z. Effect of water extract from spent mushroom substrate after *Ganoderma balabacense* cultivation by using JUNCAO technique on production performance and hematology parameters of dairy cows. **Animal Science Journal**, v. 86, n. 9, p. 855-862, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/asj.12371>.
- LOPES, L. de S.; SILVA, M. de C.; FAUSTINO, A. de O.; OLIVEIRA, L. L. de; KASUYA, M. C. M. Bioaccessibility, oxidizing activity and co-accumulation of minerals in Li-enriched mushrooms. **LWT - Food Science and Technology**, v. 155, article number 112989, Feb. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112989>.
- MA, T.; TU, Y.; ZHANG, N.-F.; GUO, J.-P.; DENG, K.-D.; ZHOU, Y.; YUN, Q.; DIAO, Q.-Y. Effects of dietary yeast β -glucan on nutrient digestibility and serum profiles in pre-ruminant Holstein calves. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 14, n. 4, p. 749-757, Apr. 2015. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(14\)60843-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60843-1).
- MADEIRA, M. S.; CARDOSO, C.; LOPES, P. A.; COELHO, D.; AFONSO, C.; BANDARRA, N. M.; PRATES, J. A. M. Microalgae as feed ingredients for livestock production and meat quality: a review. **Livestock Science**, v. 205, p. 111-121, Nov. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2017.09.020>.
- MADHAVAN, A.; ARUN, K. B.; SINDHU, R.; JOSE, A. A.; PUGAZHENDHI, A.; BINOD, P.; SIROHIDE, R.; RESHMY, R.; AWASTHIG, M. K. Engineering interventions in industrial filamentous fungal cell factories for biomass valorization. **Bioresource Technology**, v. 344, part A, article number 126209, Jan. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126209>.
- MAHFUZ, S.; HE, T.; LIU, S.; WU, D.; LONG, S.; PIAO, X. Dietary inclusion of mushroom (*Flammulina velutipes*) stem waste on growth performance, antibody response, immune status, and serum cholesterol in broiler chickens. **Animals**, v. 9, n. 9, article number 692, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani9090692>.
- MALAFAIA, G. C.; DIAS, F. R. T.; MEDEIROS, S. R. de. **A pecuária de corte mundial em números**. Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2021. 5 p. (Boletim CiCarne 48, ano 2/2021). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/228367/1/Boletim-CiCarne-48-2021.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2022.

MAO, L.; SONNENBERG, A. S. M.; ARKEL, J. van; CONEA, J. W.; VOS, R. C. H. de; MARCHAL, J. L. M.; HENDRIKS, W. H. Storage temperature and time and its influence on feed quality of fungal treated wheat straw. **Animal Feed Science and Technology**, v. 272, article number 114749, Feb. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114749>.

MATTHEWS, C.; CRISPIE, F.; LEWIS, E.; REID, M.; O'TOOLE, P. W.; COTTER, P. D. The rumen microbiome: a crucial consideration when optimising milk and meat production and nitrogen utilisation efficiency. **Gut Microbes**, v. 10, n. 2, p. 115-132, Mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/19490976.2018.1505176>.

MCALLISTER, T. A.; STANFORD, K.; CHAVES, A. V.; EVANS, P. R.; FIGUEIREDO, E. E. de S.; RIBEIRO, G. Nutrition, feeding and management of beef cattle in intensive and extensive production systems. In: BAZER, F. W.; LAMB, G. C.; WU, G. (ed.). **Animal agriculture: sustainability, challenges and innovations**. Elsevier, 2020. p. 75-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817052-6.00005-7>.

MCLOUGHLIN, S.; SPILLANE, C.; CLAFFEY, N.; SMITH, P. E.; O'ROURKE, T.; DISKIN, M. G.; WATERS, S. M. Rumen microbiome composition is altered in sheep divergent in feed efficiency. **Frontiers in Microbiology**, v. 11, Aug. 2020. 16 p. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01981>.

MILTKO, R.; KOWALIK, B.; MICHAŁOWSKI, T.; BEŁŻECKI, G. Chitin as a source of energy for rumen ciliates. **Journal of Animal and Feed Sciences**, v. 24, n. 3, p. 203-207, 2015. DOI: <https://doi.org/10.22358/jafs/65625/2015>.

MOHAMMED, S. F.; MAHMOOD, F. A.; ABAS, E. R. A review on effects of yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) as feed additives in ruminants performance. **Journal of Entomology and Zoology Studies**, v. 6, n. 2, p. 629-635, 2018. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10675.37926>.

MOLONEY, A. P. Growth and carcass composition in sheep offered isoenergetic rations which resulted in different concentrations of ruminal metabolites. **Livestock Production Science**, v. 56, n. 2, p. 157-164, Nov. 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(98\)00191-2](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(98)00191-2).

MOLOSSI, L.; HOSHIDE, A. K.; PEDROSA, L. M.; OLIVEIRA, A. S. de; ABREU, D. C. de. Improve pasture or feed grain? Greenhouse gas emissions, profitability, and resource use for nelore beef cattle in Brazil's Cerrado and Amazon Biomes. **Animals**, v. 10, n. 8, article number 1386, 2020. 21 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani10081386>.

MOREIRA, G. M. de O. **Bovinocultura de corte: sistema de produção**. 2016. 23 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico em Agropecuária) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo, Barretos.

MORGAVI, D. P.; MARTIN, C.; BOUDRA, H. Fungal secondary metabolites from *Monascus* spp. reduce rumen methane production in vitro and in vivo. **Journal of Animal Science**, v. 91, n. 2, p. 848-860, Feb. 2013. DOI: <https://doi.org/10.2527/jas.2012-5665>.

MUSZYŃSKA, B.; SZACAWA, E.; BEDERSKA-ŁOJEWSKA, D.; DUDEK, K.; POMIERNY, B.; WŁODARCZYK, A.; KAŁA, K.; LAZUR, J.; SUCHOCKI, P.; BUDZISZEWSKA, B.; BEDNAREK, D.; PIESZKA, M. Preliminary study on Se-enriched *Lentinula edodes* mycelium as a proposal of new feed additive in selenium deficiency. **PLoS ONE**, v. 15, n. 5, e0233456, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233456>.

NAYAN, N.; SONNENBERG, A. S. M.; HENDRIKS, W. H.; CONE, J. W. Screening of white-rot fungi for bioprocessing of wheat straw into ruminant feed. **Journal of Applied Microbiology**, v. 125, n. 2, p. 468-479, 2018a. DOI: <https://doi.org/10.1111/jam.13894>.

NAYAN, N.; SONNENBERG, A. S. M.; HENDRIKS, W. H.; CONE, J. W. Variation in the solubilization of crude protein in wheat straw by different white-rot fungi. **Animal Feed Science and Technology**, v. 242, p. 135-143, Aug. 2018b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.06.009>.

NIU, D.; ZUO, S.; JIANG, D.; TIAN, P.; ZHENG, M.; XU, C. Treatment using white rot fungi changed the chemical composition of wheat straw and enhanced digestion by rumen microbiota in vitro. **Animal Feed Science and Technology**, v. 237, p. 46-54, Mar. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.01.005>.

NUCHDANG, S.; VATANYOOPAISARN, S.; PHALAKORNKULE, C. Effectiveness of fungal treatment by *Coprinopsis cinerea* and *Polyporus tricholoma* on degradation and methane yields of lignocellulosic grass. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 104, p. 38-45, Oct. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.05.015>.

NUR-NAZRATUL, F. M. Y.; RAKIB, M. R. M.; ZAILAN, M. Z.; YAAKUB, H. Enhancing in vitro ruminal digestibility of oil palm empty fruit bunch by biological pre-treatment with *Ganoderma lucidum* fungal culture. **PLoS ONE**, v. 16, n. 9 p. 1-14, Sept. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0258065>.

OYELEKE, S. B.; OKUSANMI, T. A. Isolation and characterization of cellulose hydrolysing microorganism from the rumen of ruminants. **African Journal of Biotechnology**, v. 7, n. 10, p. 1503-1504, 2008.

PARK, J. H.; KIM, S. W.; DO, Y. J.; KIM, H.; KO, Y. G.; YANG, B. S.; SHIN, D.; CHO, Y. M. Spent mushroom substrate influences elk (*Cervus Elaphus Canadensis*) hematological and serum biochemical parameters. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, v. 25, n. 3, p. 320-324, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5713/ajas.2011.11329>.

PATEL, P. K.; FREE, S. J. The genetics and biochemistry of cell wall structure and synthesis in *Neurospora crassa*, a model filamentous fungus. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, p. 1-18, Oct. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02294>.

PATRA, A.; PARK, T.; KIM, M.; YU, Z. Rumen methanogens and mitigation of methane emission by anti-methanogenic compounds and substances. **Journal of Animal Science and Biotechnology**, v. 8, n. 1, p. 1-18, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40104-017-0145-9>.

PENNER, G. B. Mechanisms of volatile fatty acid absorption and metabolism and maintenance of a stable rumen environment. In: ANNUAL FLORIDA RUMINANT NUTRITION SYMPOSIUM, 25., 2014, Gainesville. **Proceedings**. Gainesville: University of Florida, 2014. p. 92-107. Disponível em: <https://animal.ifas.ufl.edu/apps/dairymedia/rns/2014/penner.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2022.

PEREIRA, R.; RAUSCH, L. L.; CARRARA, A.; GIBBS, H. K. Extensive production practices and incomplete implementation hinder Brazil's zero-deforestation cattle agreements in Pará. **Tropical Conservation Science**, v. 13, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1177/1940082920942014>.

PHEATCHA, K.; CHUNWIJITRA, K.; PHEATCHA, B.; WANAPAT, M.; CHERDTHONG, A. Addition of active dry yeast could enhance feed intake and rumen bacterial population while

reducing protozoa and methanogen population in beef cattle. **Fermentation**, v. 7, n. 3, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation7030172>.

RODRIGUES, M. L. The multifunctional fungal ergosterol. **mBio**, v. 9, n. 5, p. 1-5, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1128/mBio.01755-18>.

RUIJTER, G. J.; KUBICEK, C. P.; VISSER, J. Production of organic acids by fungi. In: OSIEWACZ, H. D. (ed.). **The mycota**. 10th ed. Berlin: Springer, 2002. v. 10, p. 213-230. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-10378-4_10.

SAKURAI, K.; YUASA, M.; OHJI, S.; HOSOYAMA, A.; SATO, M.; FUJITA, N.; KAWASAKI, H. Gene mutations in *Ganoderma lucidum* during long-term preservation by repeated subculturing. **Biopreservation and Biobanking**, v. 17, n. 5, p. 395-400, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1089/bio.2018.0149>.

SALMAN, A. K. D.; PAZIANI, S. F.; SOARES, J. P. G. **Utilização de ionóforos para bovinos de corte**. Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2006. 24 p. (Embrapa Rondônia. Documentos, 101).

SANCHEZ, S.; DEMAIN, A. L. Bioactive products from fungi. In: PURI, M. (ed.). **Food bioactives: extraction and biotechnology applications**. Springer International Publishing, 2017. p. 59-87. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-51639-4_3.

SCHEID, S. S.; FARIA, M. G. I.; VELASQUEZ, L. G.; VALLE, J. S. do; GONÇALVES JR., A. C.; DRAGUNSKI, D. C.; COLAUTO, N. B.; LINDE, G. A. Iron biofortification and availability in the mycelial biomass of edible and medicinal basidiomycetes cultivated in sugarcane molasses. **Scientific Reports**, v. 10, article number 12875, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69699-0>.

SEO, J. K.; KIM, S.-W.; KIM, M. H.; UPADHAYA, S. D.; KAM, D. K.; HA, J. K. Direct-fed microbials for ruminant animals. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, v. 23, n. 12, p. 1657-1667, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5713/ajas.2010.r.08>.

SESHADRI, R.; LEAHY, S. C.; ATTWOOD, G. T.; TEH, K. H.; LAMBIE, S. C.; COOKSON, A. L.; ELOE-FADROSH, E. A.; PAVLOPOULOS, G. A.; HADJITHOMAS, M.; VARGHESE, N. J.; PAEZ-ESPINO, D.; HUNGATE1000 PROJECT COLLABORATORS; PERRY, R.; HENDERSON, G.; CREEVEY, C. J.; TERRAPON, N.; LAPEBIE, P.; DRULA, E.; LOMBARD, V.; RUBIN, E.; KYRPIDES, N. C.; HENRISSAT, B.; WOYKE, T.; IVANOVA, N. N.; KELLY, W. J. Cultivation and sequencing of rumen microbiome members from the Hungate1000 Collection. **Nature Biotechnology**, v. 36, n. 4, p. 359-367, Apr. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/nbt.4110>.

SHARATH, B. S.; MOHANKUMAR, B. V.; SOMASHEKAR, D. Bio-detoxification of phorbol esters and other anti-nutrients of *Jatropha curcas* seed cake by fungal cultures using solid-state fermentation. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 172, n. 5, p. 2747-2757, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12010-013-0698-9>.

SHEN, Y. Z.; RAN, T.; SALEEM, A. M.; WANG, H. R.; YANG, W. Z. Short communication: ground corn steeped in citric acid modulates in vitro gas production kinetics, fermentation patterns and dry matter digestibility. **Animal Feed Science and Technology**, v. 247, p. 9-14, Jan. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.10.014>.

SHRIVASTAVA, B.; JAIN, K. K.; KALRA, A.; KUHAD, R. C. Bioprocessing of wheat straw into nutritionally rich and digested cattle feed. **Scientific Reports**, v. 4, article number 6360, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep06360>.

- SIRISAN, V.; PATTARAJINDA, V.; DUANYAI, S. Effect of feeding sugarcane bagasse treated with alkali and white rot fungi on dairy cow performance, blood metabolite and ruminal fermentation. **Indian Journal of Animal Research**, article Id B-1084, p. 860-865, 2019.
- SOARES NETO, C. B.; CONCEIÇÃO, A. A.; GOMES, T. G.; RIBEIRO, J. A. de A.; CAMPANHA, R. B.; BARROSO, P. A. V.; MACHADO, A. E. V.; MENDONÇA, S.; DE SIQUEIRA, F. G.; MILLER, R. N. G. A comparison of physical, chemical, biological and combined treatments for detoxification of free gossypol in crushed whole cottonseed. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, p. 3965-3975, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01290-0>.
- STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G.-K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. (ed.). **Climate change 2013: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, [2013]. 1535 p. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>. Acesso em: 20 abr. 2022.
- SUCU, E.; MOORE, C.; VANBAALE, M. J.; JENSEN, H.; SANZ-FERNANDEZ, M. V.; BAUMGARD, L. H. Effects of feeding *Aspergillus oryzae* fermentation product to transition holstein cows on performance and health. **Canadian Journal of Animal Science**, v. 99, n. 2, p. 237-243, June 2019. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjas-2018-0037>.
- SUN, H.-Z.; PENG, K.-L.; XUE, M.-Y.; LIU, J.-X. Metagenomics analysis revealed the distinctive ruminal microbiome and resistive profiles in dairy buffaloes. **Animal Microbiome**, v. 3, article number 44, p. 44, dez. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42523-021-00103-6>.
- TINOCO, R.; PICKARD, M. A.; VAZQUEZ-DUHALT, R. Kinetic differences of purified laccases from six *Pleurotus ostreatus* strains. **Letters in Applied Microbiology**, v. 32, n. 5, p. 331-335, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1472-765X.2001.00913.x>.
- UMOR, N. A.; ISMAIL, S.; ABDULLAH, S.; HUZAIFAH, M. H. R.; HUZIR, N. M.; MAHMOOD, N. A. N.; ZAHRIM, A. Y. Zero waste management of spent mushroom compost. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 23, n. 5, p. 1726-1736, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01250-3>.
- VIEIRA, P. A. F.; GONTIJO, D. C.; VIEIRA, B. C.; FONTES, E. A. F.; ASSUNÇÃO, L. S. de; LEITE, J. P. V.; OLIVEIRA, M. G. de A.; KASUYA, M. C. M. Antioxidant activities, total phenolics and metal contents in *Pleurotus ostreatus* mushrooms enriched with iron, zinc or lithium. **LWT - Food Science and Technology**, v. 54, n. 2, p. 421-425, Dec. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.06.016>.
- WAN, C.; LI, Y. Effectiveness of microbial pretreatment by *Ceriporiopsis subvermispora* on different biomass feedstocks. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 16, p. 7507-7512, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.05.026>.
- WANG, Y.; LUO, Y.; LUO, L.; ZHANG, H.; LIAO, Y.; GOU, C. Enhancement of the nutritional value of fermented corn stover as ruminant feed using the fungi *Pleurotus spp.* **Scientific Reports**, v. 11, article number 11961, 2021. 7 p. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90236-0>.
- XIANG, H.; ZHAO, X.; FANG, Y.; WANG, F.; LIANG, R.; SUN, X.; WANG, S.; ZHONG, R. Feeding fungal-pretreated corn straw improves health and meat quality of lambs infected with gastrointestinal nematodes. **Animals**, v. 10, n. 9, article number 1659, 2020. 16 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani10091659>.

YAN, H.; CHANG, H. Antioxidant and antitumor activities of selenium- and zinc-enriched oyster mushroom in mice. **Biological Trace Element Research**, v. 150, n. 1-3, p. 236-241, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12011-012-9454-1>.

YANG, C.; CHEN, Z.; WU, Y.; WANG, J. Nutrient and ruminal fermentation profiles of *Camellia* seed residues with fungal pretreatment. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, v. 32, n. 3, p. 357-365, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5713/ajas.18.0612>.

YOUSEFI, M.; MALECKY, M.; ZABOLI, K.; NAJAFABADI, H. J. In vitro and in sacco determining the nutritive value of button mushroom stipe and its application in growing lambs diet. **Italian Journal of Animal Science**, v. 21, n. 1, p. 279-290, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/1828051X.2021.1987847>.

ZHAO, X.; WANG, F.; FANG, Y.; ZHOU, D.; WANG, S.; WU, D.; WANG, L.; ZHONG, R. High-potency white-rot fungal strains and duration of fermentation to optimize corn straw as ruminant feed. **Bioresource Technology**, v. 312, article number 123512, Sept. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123512>.

ZHENG, M.; ZUO, S.; NIU, D.; JIANG, D.; TAO, Y.; XU, C. Effect of four species of white rot fungi on the chemical composition and in vitro rumen degradability of naked oat straw. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, p. 435-443, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-020-00991-w>.

