RGe ISSN: 2177-3246

EFEITO DO CONGELAMENTO E DESCONGELAMENTO SOBRE A HOMOGENEIDADE DE DIETAS TOTAIS (TMR) UTILIZANDO O SEPARADOR DE PARTÍCULAS PENN STATE

FREEZING AND THAWING DO NOT ALTER PARTICLE DISTRIBUTION IN TOTAL MIXED RATION (TMR) EVALUATED WITH THE PENN STATE SEPARATOR

EFECTO DE LA CONGELACIÓN Y DESCONGELACIÓN EN LA HOMOGENEIDAD DE MÉTODOS DE MEZCLA TOTAL (TMR) UTILIZANDO EL SEPARADOR DE PARTÍCULAS DE PENN STATE

10.56238/revgeov17n4-142

Jhonatan Gonçalves Silva
Pós-graduando no Programa de Ciências Veterinárias
Instituição: Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
E-mail: jhonatang.silva@hotmail.com

Juliana Alves Ávila
Zootecnista
E-mail: julianaa_ptc@hotmail.com

Lucas Lourenço de Sousa
Zootecnista
E-mail: lucaslourencosousa8@gmail.com

Romario Celso Moura Junior
Pós-graduando no Programa de Ciências Veterinárias
Instituição: Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
E-mail: romario-juninho@hotmail.com.br

Rosiane Pereira da Silva
Doutora em Ciências Animal
Instituição: Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo (USP FZEA)
E-mail: rosiane@usa.com

Simone Pedro da Silva
Professora Pós-Doutora
Instituição: Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
E-mail: simonepsilva@hotmail.com

RESUMO
O objetivo deste estudo foi avaliar se o congelamento e o descongelamento de amostras de dieta total (Total Mixed Ration – TMR) alteram a distribuição física das partículas e comprometem a avaliação

da homogeneidade pelo separador de partículas de Penn State. Foram coletadas 144 amostras de TMR dieta total ofertadas a vacas em lactação, peneiradas imediatamente após a coleta (in natura) ou após congelamento por 72 horas (−25 a −18 °C) e descongelamento por 12 horas. As proporções de partículas retidas nas peneiras de 19 mm, 8 mm e fundo, bem como os coeficientes de variação (CV), foram comparadas pelo teste t pareado ($p < 0,05$). Os resultados demonstraram ausência de diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os tratamentos, com variações inferiores a 1 ponto percentual nas frações analisadas. O congelamento também não influenciou os valores de DP e CV, indicando manutenção da uniformidade física da dieta. Os CV elevados na peneira de 8 mm refletiram falhas no processo de mistura, não atribuídas ao congelamento. O congelamento de amostras por até três dias, seguido de descongelamento controlado, não altera a granulometria da TMR e constitui um método seguro e aplicável para avaliações de rotina da homogeneidade da dieta em sistemas leiteiros.

Palavras-chave: Tamanho de Partícula. Congelamento da Dieta. Nutrição de Precisão. Variabilidade Física.

ABSTRACT
The objective of this study was to evaluate whether freezing and thawing total mixed ration (TMR) samples alter particle size distribution and compromise the assessment of diet homogeneity using the Penn State Particle Separator. A total of 144 TMR samples offered to lactating cows were collected and sieved immediately after sampling (fresh) or after freezing for 72 hours (−25 to −18 °C) and thawing for 12 hours. The proportions of particles retained on the 19-mm and 8-mm sieves and in the bottom pan, as well as the coefficients of variation (CV), were compared using paired t-tests ($p < 0.05$). The results showed no significant differences ($p > 0.05$) between treatments, with variations lower than 1 percentage point in the analyzed fractions. Freezing also did not affect SD and CV values, indicating maintenance of the physical uniformity of the diet. The high CV observed on the 8-mm sieve reflects failures in the mixing process, not attributable to freezing. The freezing TMR samples for up to three days, followed by controlled thawing, does not alter the particle size distribution of the diet and is a safe and applicable method for routine evaluations of diet homogeneity in dairy systems.

Keywords: Coefficient of Variation. Diet Freezing. Precision Nutrition. Physical Variability.

RESUMEN
El objetivo de este estudio fue evaluar si la congelación y descongelación de muestras de ración total mezclada (TMR) alteran la distribución física de las partículas y comprometen la evaluación de la homogeneidad utilizando el separador de partículas de Penn State. Se recolectaron 144 muestras de TMR alimentadas a vacas lactantes y se tamizaron inmediatamente después de la recolección (in natura) o después de congelarlas durante 72 horas (−25 a −18 °C) y descongelarlas durante 12 horas. Las proporciones de partículas retenidas en los tamices de 19 mm, 8 mm y el tamiz inferior, así como los coeficientes de variación (CV), se compararon utilizando la prueba t pareada ($p < 0,05$). Los resultados no mostraron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los tratamientos, con variaciones de menos de 1 punto porcentual en las fracciones analizadas. La congelación tampoco influyó en los valores de DP y CV, lo que indica el mantenimiento de la uniformidad física de la dieta. Los altos valores de coeficiente de variación (CV) en el tamiz de 8 mm reflejaron fallos en el proceso de mezclado, no atribuibles a la congelación. La congelación de las muestras durante un máximo de tres días, seguida de una descongelación controlada, no altera la distribución del tamaño de partícula de la ración total mezclada (TMR) y constituye un método seguro y aplicable para la evaluación rutinaria de la homogeneidad de la dieta en sistemas lecheros.

Palabras clave: Tamaño de Partícula. Congelación de la Dieta. Nutrición de Precisión. Variabilidad Física.

1 INTRODUÇÃO

A formulação de dietas balanceadas é fundamental para garantir que os animais recebam todos os nutrientes necessários ao desempenho produtivo, evitando deficiências ou excessos. Em sistemas de confinamento de bovinos de corte e leite, o fornecimento de ingredientes volumosos e concentrados na forma de dieta total Total Mixed Ration – TMR) tem se mostrado uma estratégia eficiente, pois permite ao animal ingerir, em cada bocado, uma fração equilibrada de nutrientes essenciais à mantença e à produção (NRC, 2001). Essa abordagem possibilita também o uso de alimentos de menor palatabilidade, reduzindo a seleção alimentar e promovendo melhor aproveitamento da dieta. A eficiência da TMR, contudo, depende da qualidade da mistura, visto que a homogeneização adequada dos ingredientes assegura uma composição uniforme ao longo do cocho e contribui para a nutrição de precisão (KADIM et al., 2025).

Diversos fatores operacionais podem comprometer a uniformidade da dieta total mista, interferindo diretamente na precisão da formulação e no consumo real pelos animais. Segundo Moallem e Lifshitz (2020), o tipo de equipamento utilizado na preparação da TMR, bem como sua capacidade de mistura e eficiência mecânica, exerceram forte influência na homogeneidade final da dieta. Os autores demonstraram que diferentes tecnologias de misturadores resultaram em variações significativas na distribuição dos ingredientes, afetando a consistência física e a proporção entre partículas finas e grosseiras. Essa falta de uniformidade aumentou o risco de seleção alimentar pelos animais, podendo levar a ingestão desigual de nutrientes, queda no desempenho e maior predisposição a distúrbios metabólicos. A avaliação da homogeneidade da dieta é geralmente realizada por meio da determinação do coeficiente de variação (CV) das partículas, utilizando o separador de partículas de Penn State (Penn State Particle Size Separator – PSPS), composto por peneiras de 19 mm, 8 mm e fundo, sendo desejável um CV inferior a 5% nas frações menores (Barreta, 2020).

De acordo com as diretrizes da Penn State Extension (Universidade da Pensilvânia), as amostras analisadas pelo PSPS não devem sofrer alterações físicas ou químicas antes do peneiramento. No entanto, em condições práticas de campo, a execução imediata dessa análise é frequentemente inviável devido à limitação de mão de obra e à ausência diária de nutricionistas nas propriedades leiteiras. Nessas circunstâncias, a coleta e o congelamento das amostras configuram uma alternativa viável para viabilizar o peneiramento posterior, garantindo a continuidade do monitoramento da homogeneidade e permitindo identificar falhas na mistura dos ingredientes.

O congelamento, caracterizado pela redução da temperatura a valores inferiores a –18 °C, pode promover a formação de cristais de gelo e a imobilização parcial da água, inibindo o crescimento microbiano e retardando reações químicas e enzimáticas (Liu et al., 2023). A eficiência do processo depende da taxa de formação e do tamanho dos cristais, que afetam diretamente a integridade estrutural

do alimento, sendo o congelamento rápido mais eficaz na preservação da textura e do valor nutricional (Tan et al., 2021).

Segundo Li et al. (2018), a formação e posterior fusão dos cristais de gelo durante o congelamento e descongelamento resultaram na ruptura de membranas celulares, o que leva à liberação de fluidos intracelulares e à perda de componentes solúveis. Esses danos estruturais se manifestaram visualmente como flacidez, alterações na firmeza e variações indesejáveis de coloração, além de contribuírem para perdas nutricionais decorrentes da exsudação. Apesar do amplo estudo dessa técnica em produtos de origem animal e vegetal, há escassez de dados sobre seus efeitos em dietas totais destinadas a ruminantes, particularmente quanto à manutenção da homogeneidade e estabilidade física após o descongelamento, representando uma lacuna científica relevante (Lia et al., 2021).

O congelamento de alimentos é amplamente estudadocontudo não há evidências consistentes sobre seus efeitos em dietas totais (Total Mixed Ration), especialmente quanto à possibilidade de alterações nas características físicas das partículas que possam interferir na análise de homogeneidade pelo conjunto de peneiras Penn State.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar se o processo de congelamento e descongelamento de amostras de escrever por extenso (TMR) modifica a distribuição e o tamanho das partículas, comprometendo a avaliação da homogeneidade da dieta. Partiu-se da hipótese de que o congelamento não promove alterações físicas nas partículas, não afetando, portanto, o peneiramento e a determinação da uniformidade da dieta ofertada às vacas em lactação.

2 METODOLOGIA

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental do Glória, da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), no setor de Bovinocultura de Leite (SEBOL), em Uberlândia–MG (18°56′53″ S; 48°12′54″ W; 910 m). O setor abriga cerca de 80 vacas em lactação, mantidas em sistema de confinamento sombreado, com produção média de 25 L/vaca/dia. Os animais são distribuídos em quatro lotes conforme categoria e nível produtivo, sendo o experimento realizado com o lote de primíparas de alta produção (15 animais; 28 L/dia).

A dieta total oferecida às vacas foi formulada segundo as recomendações do Nutrient Requirements of Dairy Cattle (NRC, 2001), com o objetivo de atender às exigências nutricionais de vacas produzindo 25 litros de leite por dia. A composição da dieta incluiu palha de milho Tecnoseeds® (55% de matéria seca), Smart Fiber® (91%), sorgo grão (88,6%), ração lactação total Inova® (88,7%) e resíduo de cervejaria úmido (20%). Os ingredientes foram misturados e ensilados em silos-fardo cilíndricos de aproximadamente 1.000 kg pela empresa Inova Nutrição Animal (Uberlândia, Minas Gerais), sendo posteriormente transportados e fornecidos no SEBOL. Para o fornecimento, o material foi processado no misturador casale® Vertimix Picola35, no qual foi adicionado cerca de 8% de feno

de grama estrela picado, visando aumentar a efetividade física da dieta. A mistura foi ofertada duas vezes ao dia, às 8 e às 15 h, imediatamente após as ordenhas.

O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado, com dois tratamentos: (T1) peneiramento da dieta total imediatamente após a coleta (in natura) e (T2) peneiramento após congelamento (T°C) e descongelamento (T°C). O dia de coleta foi considerado a unidade experimental (n = 9), sendo cada dia composto pela média das diferenças entre os dois tratamentos. As variáveis analisadas foram o percentual de partículas retidas nas peneiras de 19 mm, 8 mm e fundo, e o coeficiente de variação (CV), obtido pela razão entre o desvio-padrão e a média.

As coletas foram realizadas no período da tarde, imediatamente após o fornecimento da dieta ao lote 1 e antes do acesso das vacas ao cocho, uma vez que nesse horário os animais se encontravam na ordenha. Foram definidos oito pontos equidistantes ao longo da linha de cocho, nos quais foram coletadas duas amostras de aproximadamente 500 g de dieta total, totalizando 16 amostras por dia. Das 16 amostras coletadas diariamente, oito foram peneiradas in natura e oito submetidas ao processo de congelamento em freezer horizontal com temperatura ajustada entre –25 e –18 °C, na função “extra frio”. As amostras permaneceram congeladas por 72 horas, sem sobreposição de objetos, e foram descongeladas por 12 horas a 4 °C antes da análise, de modo a permitir o descongelamento completo do material. Antes do peneiramento, foi verificada a ausência de grumos ou aglomerações que pudessem interferir na separação das partículas. Esse procedimento experimental foi repetido durante nove dias consecutivos, totalizando 144 amostras e nove unidades experimentais.

O peneiramento foi realizado com o Penn State Particle Separator (PSPS), composto por três peneiras de polipropileno com fibra, com aberturas de 19 mm, 8 mm e fundo, e dimensões de 42 × 38 × 40 cm. Aproximadamente 500 g de dieta (in natura ou descongelada) foram colocados sobre a peneira superior e agitadas manualmente sobre uma superfície plana, realizando-se cinco movimentos horizontais e cinco verticais, repetidos duas vezes, totalizando 40 movimentos por amostra, conforme metodologia descrita por Heinrichs e Kononoff (2003). Após o peneiramento, o material retido em cada peneira foi pesado em balança analítica, e o percentual de partículas retidas foi determinado pela relação entre o peso retido e o peso total da amostra, conforme a equação:

$$P1 = X/(Pi\ x\ 100) \qquad (1)$$

Onde P1 representa a porcentagem de partículas retidas na peneira superior (19 mm), X é a massa (g) retida na peneira correspondente e Pi o peso inicial da amostra (500 g). O coeficiente de variação (CV) das peneiras de 8 mm e fundo foi calculado pela razão entre o desvio-padrão e a média das oito amostras coletadas ao longo da linha de cocho, multiplicada por 100, sendo considerado ideal CV ≤ 5% (BARRETA ,2020).

As análises estatísticas foram realizadas no software R Studio® (versão 4.3.1). A normalidade dos resíduos e a homogeneidade das variâncias foram verificadas pelos testes de Shapiro–Wilk e Bartlett, respectivamente. Os dados que atenderam aos pressupostos paramétricos foram avaliados por teste t pareado, considerando o dia como unidade experimental (n = 9) e nível de significância de $p < 0,05$. Os resultados foram expressos como média ± desvio-padrão.

3 RESULTADOS

O congelamento das amostras de dieta total não influenciou ($p > 0,05$) a proporção de partículas retidas nas peneiras de fundo, 8 mm e 19 mm (Tabela 1). As amostras peneiradas in natura e após o congelamento por 72 horas (−25 a −18 °C) e descongelamento por 12 horas apresentaram distribuição semelhante das partículas no separador Penn State.

A maior fração da dieta total foi composta por partículas menores que 8 mm, representando em média 65% a 66% da amostra total. As partículas intermediárias (8 mm) corresponderam a aproximadamente 19%, e as partículas retidas na peneira superior (19 mm) a cerca de 15%. As diferenças entre tratamentos foram inferiores a 1 ponto percentual em todas as peneiras, indicando estabilidade física da dieta após o congelamento.

Tabela 01. Percentual médio de partículas retidas nas peneiras fundo, 8 e 19 mm em amostras de dieta total peneiradas imediatamente após oferta na linha (*in natura*) e depois do congelamento (pós-congelamento).

	In Natura	Pós-Congelamento*	Diferença entre médias	Valor P**
% Peneira Fundo	65,35	66,09	0,74	0,072
% Peneira 8 mm	19,43	19,48	0,05	0,815
% Peneira 19 mm	15,22	14,65	0,57	0,106

*Pós-congelamento: congelamento de 72 horas e descongelamento de 12 horas; **Teste t pareado: nível de significância de 5%

Fonte: Autores.

Da mesma forma, não houve diferença ($p > 0,05$) nos valores de desvio-padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) das peneiras avaliadas (Tabela 1). O CV médio das peneiras de fundo foi inferior a 5%, evidenciando boa uniformidade entre os pontos de coleta. Nas peneiras de 8 mm, os CV médios foram de 34,11% para as amostras in natura e 37,16% para as amostras pós-congelamento, valores considerados elevados, mas semelhantes entre os tratamentos.

Esses resultados confirmam que o congelamento e o descongelamento controlado das amostras não alteram a homogeneidade da dieta total, permitindo o uso desse procedimento em avaliações de rotina da mistura em propriedades leiteiras.

Tabela 02. Desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) de partículas retidas nas peneiras fundo, 8 mm e 19 mm em amostras de dieta total peneiradas imediatamente após oferta na linha (*in natura*) e depois do congelamento (pós-congelamento).

	In Natura	Pós-Congelamento*	Diferença entre médias	Valor P**
DP Peneira Fundo	2,08	1,94	0,139	0,700
CV Peneira Fundo	3,20	2,92	0,619	0,284
DP Peneira 8 mm	6,66	7,25	0,589	0,138
CV Peneira 8 mm	34,11	37,16	3,043	0,146
DP Peneira 19 mm	2,78	2,41	0,377	0,373
CV Peneira 19 mm	18,65	16,35	0,417	2,293

*Pós-congelamento: congelamento de 72 horas e descongelamento de 12 horas; **Teste t pareado: nível de significância de 5%

Fonte: Autores.

De modo geral, as proporções de partículas, os valores de dispersão e os coeficientes de variação permaneceram semelhantes entre os tratamentos. A ausência de diferenças estatísticas demonstrou que o congelamento de amostras de dieta total por até três dias não alterou a distribuição de partículas nem comprometeu a avaliação da homogeneidade da TMR, sendo possível realizar o peneiramento posteriormente sem prejuízo à precisão dos resultados.

O congelamento das amostras de dieta total por até 72 horas, seguido de 12 horas de descongelamento, não alterou a distribuição das partículas nas peneiras de 19 mm, 8 mm e fundo ($p > 0,05$), demonstrando que o processo não modifica a estrutura física da dieta. A manutenção das proporções de partículas entre os tratamentos indicou que o congelamento não interferiu na avaliação de homogeneidade pelo separador Penn State, sugerindo que a viabilidade do uso desse procedimento em análises de rotina.

Resultados compatíveis foram relatados por Tayyab et al. (2018), que avaliaram a distribuição de partículas de forragens e de dietas totais misturadas (TMR) sob diferentes teores de umidade e verificaram que variações moderadas no conteúdo hídrico não alteram a proporção das frações grosseiras, médias e finas. Os autores destacaram que a estrutura física da TMR se mantém estável quando as condições de manejo e conservação são controladas, indicando que a integridade granulométrica da dieta tende a ser preservada mesmo diante de pequenas flutuações no ambiente de armazenamento. Esses achados reforçaram que, quando submetida a condições adequadas, a TMR apresentou elevada robustez física, com mínima susceptibilidade a mudanças na distribuição de partículas. De forma complementar, Carneiro et al. (2023) observaram que, em sistemas tropicais, a estabilidade física e a consistência da TMR foram mais afetadas pelo manejo de mistura e pela qualidade do volumoso do que pelo tempo de estocagem, destacando que variações na umidade e no tamanho das partículas não comprometem a avaliação física quando o processo de mistura é padronizado.

A estabilidade física observada pode ser explicada pela baixa atividade de água e elevada proporção de matéria seca da dieta total, que limitam a formação de cristais de gelo durante o

congelamento. De acordo com Tan et al. (2021), alimentos com menor umidade apresentaram menor dano estrutural após ciclos de congelamento edescongelamento, devido à menor mobilidade da água livre e consequente redução da ruptura das partículas. O mesmo mecanismo físico pode justificar a preservação da granulometria nas amostras de TMR analisadas.

Embora o congelamento não tenha afetado as proporções das partículas, os coeficientes de variação (CV) elevados, em torno de 35%, observados na peneira de 8 mm indicam heterogeneidade na mistura da dieta total. Segundo Carneiro et al. (2021), a consistência física da TMR depende diretamente do tempo de mistura, do tamanho de partícula e da sequência de carregamento dos ingredientes, sendo que misturas rápidas e volumosos longos aumentaram a variabilidade física da dieta. Esse comportamento é coerente com o observado no presente estudo, em que o tempo de mistura (6 a 10 minutos) e o uso de feno de capim-estrela de partícula longa podem ter limitado a uniformidade da dieta total, também observaram diferenças significativas entre dietas formuladas e ofertadas em fazendas leiteiras, atribuídas principalmente a falhas no manejo da mistura e na sequência de carregamento dos ingredientes, e não ao processo de amostragem.

Além disso, Chen et al. (2025) demonstraram que variações na matéria seca e na umidade do volumoso podem aumentar a variabilidade física da TMR, favorecendo inconsistências na oferta da dieta e flutuações no desempenho produtivo de vacas leiteiras. Os autores enfatizaram que manter a estabilidade física e a uniformidade da TMR, mesmo diante de mudanças ambientais ou operacionais, é fundamental para reduzir a seletividade e assegurar o consumo adequado de nutriente.

De forma prática, os resultados demonstraram que o congelamento das amostras por até três dias é um procedimento seguro e aplicável para o monitoramento da homogeneidade da dieta total em fazendas leiteiras. Essa estratégia permite que as coletas sejam realizadas mesmo na ausência do nutricionista e analisadas posteriormente sem perda de precisão, o que amplia a aplicabilidade do método em programas de nutrição de precisão e controle de qualidade alimentar.

4 CONCLUSÃO

O congelamento de amostras de dieta total por até três dias, em temperaturas entre –25°C e –18°C, seguido de 12 horas de descongelamento, não altera as características físicas da dieta, tampouco a proporção de partículas retidas nas peneiras de 19 mm, 8 mm e fundo. O procedimento de congelamento e posterior descongelamento preserva a estrutura física da TMR, permitindo a determinação confiável dos coeficientes de variação e a identificação de eventuais falhas no processo de mistura. O uso de amostras congeladas é uma estratégia viável para o monitoramento rotineiro da homogeneidade da dieta total em fazendas leiteiras.

REFERÊNCIAS

Barreta, D. A. (2020). Tamanho médio de partícula da dieta: determinação, interpretação e efeitos para vacas leiteiras. Revista Acadêmica Ciência Animal, 18, e18102. https://doi.org/10.7213/2596-2868.2020.18102

Carneiro, J. H., Lima, J. C., Lopes, F. C., & Silva, M. L. (2021). Accuracy and physical characteristics of total mixed rations and feed sorting behavior in dairy herds. Revista Brasileira de Zootecnia, 50, e20200174. https://doi.org/10.37496/rbz5020200174

Chen, X., Smith, J., Li, Y., & Zhao, L. (2025). Stabilizing total mixed ration dry matter to mitigate hay moisture and milk production fluctuations. Animals, 15(8), 1137. https://www.mdpi.com/2076-2615/15/8/1137

Heinrichs, A. J., & Kononoff, P. J. (2003). Evaluating particle size of forages and TMRs using the Penn State Particle Size Separator. The Pennsylvania State University.

Kadim, O. M., Abd Alkareem, D., & Al-fahham, A. A. (2025). Nutritional strategies to improve growth performance and feed efficiency in ruminants. International Journal of Medical Science and Dental Health, 11(8), xx–xx. https://doi.org/10.55640/ijmsdh-11-08-21

Li, D., Zhu, Z., Sun, D.-W., & Zhang, Z. (2018). Effects of freezing on cell structure of fresh cellular food materials: A review. Food Research International, 106, 345–356. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.02.019

Lia, X., Zhang, Y., Chen, L., & Liu, Q. (2021). Advances in freezing and thawing technologies for food preservation: Recent trends and challenges. Trends in Food Science & Technology, 112, 560–574. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.027

Liu, X., Chen, L., Chen, L., Liu, D., Liu, H., Jian, D., Fu, Y., & Wang, X. (2023). Efeito do congelamento e descongelamento terminal na qualidade da massa congelada: uma análise das propriedades da água, do amido e das proteínas. Foods, 12(21), 3888. https://doi.org/10.3390/foods12213888

Moallem, U., & Lifshitz, L. (2020). Accuracy and homogeneity of total mixed rations processed through trailer mixer or self-propelled mixer, and effects on the yields of high-yielding dairy cows. Animal Feed Science and Technology, 269, 114708. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114708

National Research Council (NRC). (2001). Nutrient requirements of dairy cattle (7th rev. ed.). National Academy Press.

Tayyab, U., Wilkinson, R. G., Reynolds, C. K., & Sinclair, L. A. (2018). Particle size distribution of forages and mixed rations, and their relationship with ration variability and performance of UK dairy herds. Livestock Science, 217, 108–115. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2018.09.018

Tan, M., Mei, J., & Xie, J. (2021). Formation and control of ice crystals and their impact on the quality of frozen aquatic products: A review. Crystals, 11(1), 68. https://doi.org/10.3390/cryst11010068