

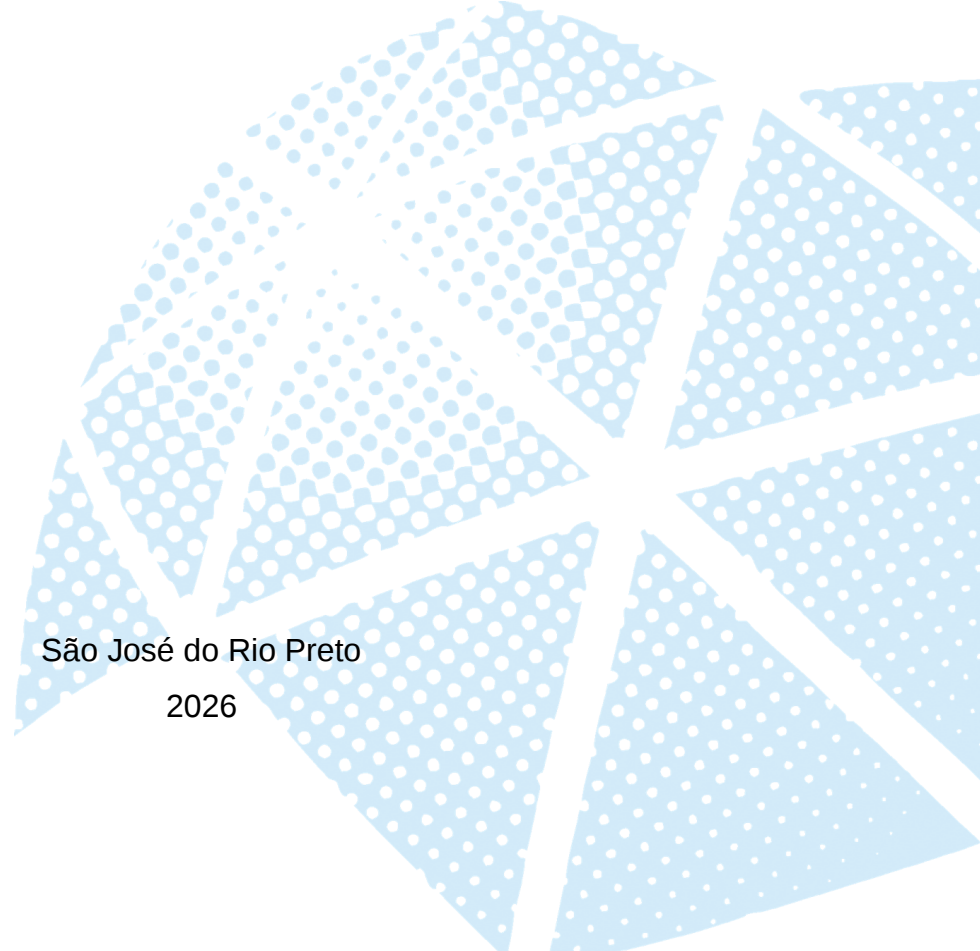
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS, LETRAS E CIÊNCIAS EXATAS
Campus de São José do Rio Preto

ALEXSANDER SAVES DOS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA, TERMOFÍSICA E REOLÓGICA DE LEITES
DE DIFERENTES ESPÉCIES: IMPLICAÇÕES PARA O PROCESSAMENTO TÉRMICO**

São José do Rio Preto

2026



ALEXSANDER SAVES DOS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA, TERMOFÍSICA E REOLÓGICA DE LEITES
DE DIFERENTES ESPÉCIES: IMPLICAÇÕES PARA O PROCESSAMENTO TÉRMICO**

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências, Letras Ciências Exatas, São José do Rio Preto, para obtenção do título de Doutor em Alimentos, Nutrição e Engenharia de Alimentos.

Área de Concentração: Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Javier Telis Romero

Coorientador: Prof. Dr. Marcio Augusto Ribeiro Sanches

São José do Rio Preto

2026

S237c

Santos, Alexsander Saves dos

Caracterização físico-química, termofísica e reológica de leites de diferentes espécies : implicações para o processamento térmico / Alexsander Saves dos Santos. -- São José do Rio Preto, 2026

133 f. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto

Orientador: Javier Telis Romero

Coorientador: Marcio Augusto Ribeiro Sanches

1. Leite concentrado. 2. Temperatura. 3. Viscosidade. 4. Reologia. 5. Produtos lácteos. I. Título.

ALEXSANDER SAVES DOS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA, TERMOFÍSICA E REOLÓGICA DE LEITES
DE DIFERENTES ESPÉCIES: IMPLICAÇÕES PARA O PROCESSAMENTO TÉRMICO**

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências, Letras Ciências Exatas, São José do Rio Preto, para obtenção do título de Doutor em Alimentos, Nutrição e Engenharia de Alimentos.

Área de Concentração: Engenharia de Alimentos

Data da Defesa: 29/06/2026

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Javier Telis Romero

(UNESP) – Universidade Estadual Paulista – Campus de São José do Rio Preto/SP
Orientador

Profa. Dra. Maria Júlia Neves Martins

(UEMG) – Universidade do Estado de Minas Gerais – Campus de Frutal/MG

Profa. Dra. Gisele Herbst Vazquez

(UB) – Universidade Brasil – Campus de Fernandópolis/SP

Prof. Dr. Paulo Batista Ramos

(IFSP) – Instituto Federal de São Paulo – Campus de Piracicaba/SP

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela dádiva da vida, pela saúde e pela força para superar os desafios ao longo desta trajetória.

À minha família, em especial à minha esposa, Patrícia, e ao meu filho, Victor Hugo, pelo amor, incentivo, compreensão e por sempre acreditarem na minha capacidade. Aos meus pais, Raimundo e Edna, e à minha irmã, Patrícia, pelo apoio incondicional e por estarem sempre ao meu lado.

Ao Prof. Dr. Javier Telis Romero, pela oportunidade de desenvolver este trabalho sob sua orientação, pelos valiosos ensinamentos e pelas constantes palavras de incentivo. Ao Prof. Dr. Marcio Augusto Ribeiro Sanches, pela dedicação, disponibilidade e importante contribuição como coorientador desta tese.

A todos os docentes, técnicos e colaboradores do IBILCE/UNESP que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

Esta tese teve como objetivo avaliar de forma integrada a composição físico-química, as propriedades termofísicas e o comportamento reológico de leites de diferentes espécies, considerando os efeitos da temperatura e da concentração de sólidos, com vistas a subsidiar o projeto e a otimização de processos térmicos na indústria de laticínios. Inicialmente, investigou-se o efeito do processo de concentração sobre a composição química dos leites de vaca, cabra, búfala e ovelha. Em seguida, analisou-se a influência da temperatura (1–90 °C) sobre as propriedades termofísicas – densidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica – desses leites, com o ajuste de modelos matemáticos para a predição dessas propriedades em função da temperatura. Posteriormente, avaliou-se o comportamento reológico do leite de búfala em diferentes teores de sólidos totais (10–50%) e em uma ampla faixa de temperatura (1–80 °C), empregando modelos matemáticos para descrever o escoamento. Em termos de composição química, os leites concentrados de búfala e ovelha destacaram-se pelos maiores teores de gordura, proteínas e sólidos totais, enquanto os leites de vaca e cabra apresentaram maiores teores de carboidratos e cinzas. As propriedades termofísicas mostraram dependência significativa da temperatura, com aumento do calor específico, da condutividade térmica e da difusividade térmica, bem como redução da densidade ao longo da faixa estudada. Os leites de vaca e cabra apresentaram valores mais elevados dessas propriedades em comparação aos leites de búfala e ovelha, comportamento diretamente associado às diferenças na composição química e adequadamente descrito por modelos polinomiais de 1°, 2° e 3° graus. Por sua vez, o comportamento reológico do leite de búfala concentrado foi fortemente influenciado pelo teor de sólidos totais e pela temperatura. Em baixas concentrações, observou-se comportamento newtoniano, enquanto em concentrações mais elevadas ocorreu a transição para comportamento pseudoplástico, adequadamente descrito pelo modelo de Ostwald–de Waele. A viscosidade e o índice de consistência aumentaram com o incremento da concentração e diminuíram com o aumento da temperatura, fornecendo subsídios diretos para a seleção de modelos reológicos, o dimensionamento de equipamentos e a otimização de operações industriais.

Palavras-chave: leite; concentração à vácuo; processos térmicos; viscosidade; modelagem matemática; produtos lácteos.

ABSTRACT

This thesis aimed to provide an integrated evaluation of the physicochemical composition, thermophysical properties, and rheological behavior of milk from different species, considering the effects of temperature and solids concentration, in order to support the design and optimization of thermal processes in the dairy industry. Initially, the effect of the concentration process on the chemical composition of cow, goat, buffalo, and sheep milk was investigated. Subsequently, the influence of temperature (1–90 °C) on the thermophysical properties—density, specific heat, thermal conductivity, and thermal diffusivity—of these milks was analyzed, and mathematical models were fitted to predict these properties as a function of temperature. Subsequently, the rheological behavior of buffalo milk was evaluated at different total solids contents (10–50%) and over a wide temperature range (1–80 °C), using mathematical models to describe the flow behavior. Regarding chemical composition, concentrated buffalo and sheep milk exhibited higher contents of fat, proteins, and total solids, whereas cow and goat milk showed higher contents of carbohydrates and ash. The thermophysical properties showed a significant dependence on temperature, with increases in specific heat, thermal conductivity, and thermal diffusivity, and a decrease in density over the studied range. Cow and goat milks exhibited higher values for these properties compared to buffalo and sheep milks—a behavior directly associated with differences in chemical composition and adequately described by first-, second-, and third-degree polynomial models. In turn, the rheological behavior of concentrated buffalo milk was strongly influenced by total solids content and temperature. At low concentrations, the milk exhibited Newtonian behavior, whereas at higher concentrations a transition to pseudoplastic behavior was observed, which was adequately described by the Ostwald–de Waele model. Viscosity and consistency index increased with increasing solids concentration and decreased with increasing temperature, providing direct support for the selection of rheological models, equipment design, and optimization of industrial operations.

Keywords: milk; vacuum concentration; thermal processes; viscosity; mathematical modeling; dairy products.

LISTA DE FIGURAS

ORGANIZAÇÃO DA TESE

Figura 1 – Organização dos capítulos da presente tese de doutorado	18
--	----

LEITES DE DIFERENTES ESPÉCIES: COMPOSIÇÃO, PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E REOLÓGICAS APLICADAS À ENGENHARIA DE ALIMENTOS

Figura 1 – Animais búfalos e produtos bubalinos	24
Figura 2 – Representação do leite de vaca	27
Figura 3 – Representação do leite de cabra	30
Figura 4 – Representação do leite de ovelha	32
Figura 5 – Evaporador rotativo à vácuo	35
Figura 6 – Classificação do comportamento reológico de fluidos	41
Figura 7 – Curvas características de comportamento reológico de fluidos newtonianos e não newtonianos independentes do tempo	42
Figura 8 – Curvas características de comportamento reológico de fluidos dependentes do tempo	45
Figura 9 – Curva típicas de relaxamento da tensão de materiais com comportamento elástico ideal, viscoso ideal e viscoelásticos	46

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO LEITE DE VACA, CABRA, BÚFALA E OVELHA CONCENTRADO EM EVAPORADOR A VÁCUO

Figura 1 – Conteúdo de proteínas em função do tempo de concentração	74
Figura 2 – Conteúdo de gordura em função do tempo de concentração	75
Figura 3 – Conteúdo de água em função do tempo de concentração	77
Figura 4 – Conteúdos de (a) cinzas, (b) carboidratos e (c) sólidos totais dos leites de vaca, cabra, búfala e ovelha em função do tempo de concentração	78

PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DO LEITE DE VACA, CABRA, BÚFALA E OVELHA: IMPLICAÇÕES PARA O PROCESSAMENTO TÉRMICO E O PROJETO DE PROCESSOS

Figura 1 – Densidade dos leites de diferentes espécies	94
Figura 2 – Calor específico dos leites	96

Figura 3 – Condutividade térmica dos leites 98

Figura 4 – Difusividade térmica dos leites 100

TRANSIÇÃO ENTRE O COMPORTAMENTO NEWTONIANO E NÃO NEWTONIANO DO LEITE DE BÚFALA: IMPACTO DA TEMPERATURA E DA CONCENTRAÇÃO

Figura 1 – Comportamento de fluxo do leite de búfala em diferentes concentrações de sólidos e temperaturas - Domínio Newtoniano 119

Figura 2 – Comportamento de fluxo do leite de búfala em diferentes concentrações de sólidos e temperaturas - Domínio Não-Newtoniano 120

LISTA DE TABELAS

LEITES DE DIFERENTES ESPÉCIES: COMPOSIÇÃO, PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E REOLÓGICAS APLICADAS À ENGENHARIA DE ALIMENTOS

Tabela 1 – Composição química do leite de búfala e do leite de vaca	24
Tabela 2 – Composição média do leite de vaca	26
Tabela 3 – Produção de leite de cabra em litros por região	28
Tabela 4 – Composição Centesimal dos leites bovino, caprino e ovino	30
Tabela 5 – Composição do leite de ovelha comparado ao de outras espécies produtoras	33

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO LEITE DE VACA, CABRA, BÚFALA E OVELHA CONCENTRADO EM EVAPORADOR A VÁCUO

Tabela 1 – Composição química do leite in natura de diferentes espécies	71
---	----

PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DO LEITE DE VACA, CABRA, BÚFALA E OVELHA: IMPLICAÇÕES PARA O PROCESSAMENTO TÉRMICO E O PROJETO DE PROCESSOS

Tabela 1 – Composição química do leite de diferentes espécies (g·100 g ⁻¹ de amostra)	92
Tabela 2 – Modelos polinomiais empíricos para densidade de leite de diferentes espécies, em função da temperatura	102
Tabela 3 – Modelos polinomiais empíricos para calor específico de leite de diferentes espécies, em função da temperatura	102
Tabela 4 – Modelos polinomiais empíricos para condutividade térmica de leite de diferentes espécies, em função da temperatura	103
Tabela 5 – Modelos polinomiais empíricos para difusividade térmica de leite de diferentes espécies, em função da temperatura	103

TRANSIÇÃO ENTRE O COMPORTAMENTO NEWTONIANO E NÃO NEWTONIANO DO LEITE DE BÚFALA: IMPACTO DA TEMPERATURA E DA CONCENTRAÇÃO

Tabela 1 – Composição química do leite <i>in natura</i> e concentrado	116
Tabela 2 – Viscosidades do leite de búfala em diferentes concentrações de sólidos e temperaturas - Domínio Newtoniano	122

Tabela 3 – Índice de comportamento do leite de búfala em diferentes concentrações de sólidos e temperaturas - Domínio pseudoplástico 124

Tabela 4 – Índice de consistência do leite de búfala em diferentes concentrações de sólidos e temperaturas - Domínio pseudoplástico 125

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Modelos de reológicos de Ostwald-de-Waele, Herschel-Bulkley e Plástico de Bingham	48
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo geral	16
2.2	Objetivos específicos	16
3	ORGANIZAÇÃO DA TESE	17
4	LEITES DE DIFERENTES ESPÉCIES: COMPOSIÇÃO, PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E REOLÓGICAS APLICADAS À ENGENHARIA DE ALIMENTOS	19
1	INTRODUÇÃO	20
2	O LEITE DE BÚFALA	22
3	O LEITE DE VACA	25
4	O LEITE DE CABRA	27
5	O LEITE DE OVELHA	31
6	PRODUTOS LÁCTEOS CONCENTRADOS	34
7	PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS ALIMENTOS	36
8	REOLOGIA DE ALIMENTOS	38
8.1	Classificação dos fluidos	40
8.2	Modelos reológicos	46
8.3	Efeito da temperatura e da concentração sobre o comportamento reológico	49
	REFERÊNCIAS	50
5	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO LEITE DE VACA, CABRA, BÚFALA E OVELHA CONCENTRADO EM EVAPORADOR A VÁCUO	65
1	INTRODUÇÃO	66
2	MATERIAIS E MÉTODOS	67
2.1	Preparo das amostras de leite concentrado	67
2.2	Caracterização físico-química	68
2.2.1	Determinação do teor de sólidos totais	68
2.2.2	Determinação do conteúdo de proteína	69
2.2.3	Determinação do conteúdo de lipídeos	69
2.2.4	Determinação do conteúdo de cinzas	70
2.2.5	Determinação do conteúdo de carboidratos totais	70
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
3.1	Caracterização físico-química do leite in natura	70
3.2	Caracterização físico-química do leite concentrado	73
4	CONCLUSÕES	80

	REFERÊNCIAS	81
6	PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DO LEITE DE VACA, CABRA, BÚFALA E OVELHA: IMPLICAÇÕES PARA O PROCESSAMENTO TÉRMICO E O PROJETO DE PROCESSOS	85
1	INTRODUÇÃO	86
2	MATERIAIS E MÉTODOS	88
2.1	Amostras de leite	88
2.2	Caracterização química do leite	88
2.3	Determinação das propriedades termofísicas	89
2.3.1	Densidade	89
2.3.2	Calor específico	89
2.3.3	Condutividade térmica	90
2.3.4	Difusividade térmica	91
2.3.5	Modelagem dos dados	91
3.1	Caracterização química	92
3.2	Propriedades termofísicas	93
3.2.1	Densidade	93
3.2.2	Calor específico	95
3.2.3	Condutividade térmica	97
3.2.4	Difusividade térmica	99
3.2.5	Modelagem dos dados	101
4	CONCLUSÕES	104
	REFERÊNCIAS	105
7	TRANSIÇÃO ENTRE O COMPORTAMENTO NEWTONIANO E NÃO NEWTONIANO DO LEITE DE BÚFALA: IMPACTO DA TEMPERATURA E DA CONCENTRAÇÃO	110
1	INTRODUÇÃO	111
2	MATERIAIS E MÉTODOS	113
2.1	Amostras de leite	113
2.2	Processo de concentração	113
2.3	Caracterização química do leite	114
2.4	Determinação do comportamento reológico	114
2.5	Modelagem matemática dos dados	115
2.6	Análise estatística	116
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	116
3.1	Composição química	116
3.2	Comportamento de fluxo	118
3.3	Efeito da temperatura e da concentração nos parâmetros reológicos	122
4	CONCLUSÕES	126

	REFERÊNCIAS	127
8	CONCLUSÃO GERAL	130
	REFERÊNCIAS	132
	APÊNDICE A – SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	133

1 INTRODUÇÃO GERAL

A importância da ciência e da tecnologia de alimentos na melhoria da qualidade de vida do ser humano é destacada pela crescente busca por alimentos saudáveis, com alto valor nutricional, disponíveis e de fácil acesso a população. Com isso, a procura por fontes alternativas de alimentos tem sido tópico de inúmeras pesquisas nas últimas décadas (SILVA, 2014). O leite desempenha um papel crucial na dieta humana devido à sua composição nutricional rica e diversificada, o que o torna um tópico central de pesquisa para melhorar as técnicas de processamento e maximizar seu valor nutritivo.

Definido como o produto obtido da ordenha completa, ininterrupta, de vacas em condições higiênicas adequadas (BRASIL, 2011), o leite é uma mistura complexa composta por lactose, glicérides, proteínas, sais minerais, vitaminas e enzimas. Algumas substâncias podem estar em emulsão tais como gordura e algumas substâncias associadas, mas também podem estar dispostas em suspensão como a caseína ligada a sais minerais. Lactose, vitaminas hidrossolúveis e proteínas do soro estão dissolvidas em solução, o que confere ao leite suas propriedades únicas (ORDOÑEZ, 2005).

O leite é um dos alimentos mais consumidos no mundo, seja na forma pura, em seus derivados ou como ingrediente em diversos produtos alimentícios. O volume de leite produzido no mundo no ciclo 2024/2025 foi de 673,3 milhões de toneladas, sendo 23% da produção localizada nas Américas, 43% na Ásia e 22% na União Europeia. A Índia lidera a produção mundial de leite, com 211,7 milhões de toneladas, seguida pela União Europeia, Estados Unidos, China e Rússia. O Brasil é o 6º maior produtor de leite do mundo, com uma produção de 28 milhões de toneladas em 2025 (FAO, 2025). A produção está concentrada principalmente nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul, com destaque para estados como Minas Gerais, Paraná, São Paulo, Goiás e Rio Grande do Sul. O leite bovino é predominante na produção leiteira, mas os leites de cabra, ovelha e búfala também são significativos, cada um oferecendo características únicas que contribuem para uma variedade de produtos lácteos (EMBRAPA, 2025).

O leite concentrado, obtido por evaporação a vácuo, é um produto fundamental na indústria de laticínios. Este processo envolve a remoção parcial da água do leite

fluído, resultando em um produto com maior concentração de sólidos. A evaporação a vácuo é preferida devido à sua eficiência e baixo custo energético comparado a outros métodos, como a secagem por spray dryer (COSTA, 2014).

O leite concentrado é amplamente empregado na indústria para a produção de diversos produtos lácteos. Entre as principais aplicações, destacam-se a fabricação de leite condensado e leite evaporado, que são amplamente utilizados em diversos produtos alimentícios. Além disso, o leite concentrado serve como base para a produção de leite em pó e outros derivados lácteos, oferecendo versatilidade para uma variedade de aplicações industriais (ROBINSON; ITSARANUWAT, 2005). Cada tipo de leite concentrado, seja de vaca, cabra, búfala ou ovelha, contribui com características únicas, influenciando as propriedades finais dos produtos e ampliando as opções disponíveis no mercado.

Além das questões tecnológicas, a eficiência do processo é altamente dependente do projeto correto dos equipamentos e das operações unitárias. As propriedades reológicas e termofísicas do leite, que descrevem seu comportamento em resposta a forças externas, desempenham um papel importante na otimização dos processos industriais de alimentos. Compreender essas propriedades permite a seleção apropriada de bombas, acessórios, misturadores, biorreatores e tubulações (EVANGELISTA et al. 2020). As curvas de fluxo estacionário, por exemplo, podem fornecer dados importantes para a modelagem reológica e ajudar a identificar transições entre comportamentos newtonianos e não newtonianos dos leites concentrados. Embora o comportamento reológico do leite de vaca tenha sido estudado, há pouca informação sobre as propriedades específicas dos leites de cabra, búfala e de ovelha, seja *in natura* ou após o processo de concentração.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Esta tese visa avaliar a composição físico-química, as propriedades termofísicas e o comportamento reológico de leites de diferentes espécies, considerando os efeitos da temperatura e da concentração de sólidos, visando apoiar o projeto e a otimização de processos térmicos na indústria de laticínios.

2.2 Objetivos específicos

Como parte do desenvolvimento do objetivo geral, a tese buscará especificamente:

- Obter as características físico-químicas (teor de sólidos totais, lipídios, proteínas, carboidratos e cinzas) dos leites de vaca, cabra, búfala e ovelha *in natura* e concentrados.
- Determinar as propriedades termofísicas (densidade, calor específico, condutividade térmica, difusividade térmica) dos leites de vaca, cabra, búfala e ovelha do leite concentrado;
- Determinar o comportamento reológico do leite de búfala concentrado em diferentes temperaturas de processo;
- Comparar os modelos de Newton, Ostwald-De Waele, Bingham e Herschel-Bulkley, a fim de identificar qual melhor descreve o comportamento reológico.

3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

A Figura 1 apresenta o plano de trabalho, desde as etapas iniciais da tese de doutorado até a sua conclusão. A tese está estruturada em quatro capítulos, os quais abrangem desde a revisão da literatura até o estudo dos aspectos físico-químicos, termofísicos e reológicos de leites de diferentes espécies submetidos a processamento térmico.

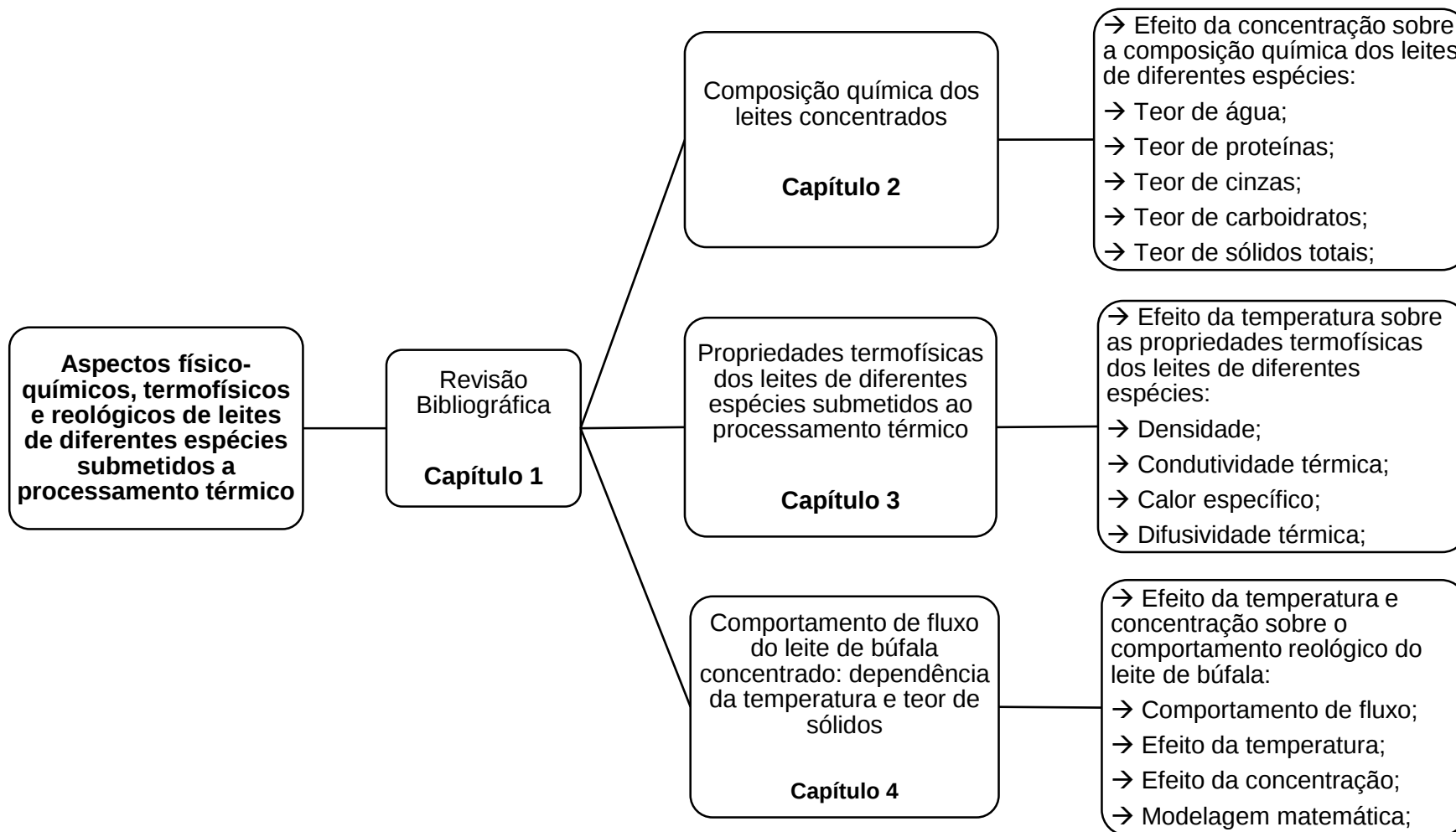
No Capítulo 1 são apresentadas informações gerais sobre os leites de vaca, cabra, búfala e ovelha, por meio de uma revisão bibliográfica da literatura, com o objetivo de contextualizar o tema e fornecer a base teórica necessária para o desenvolvimento dos capítulos subsequentes.

O Capítulo 2 aborda o estudo da composição química dos leites de vaca, cabra, búfala e ovelha *in natura* e concentrados em evaporador a vácuo, com o intuito de fornecer informações relevantes para o seu manejo e processamento. Foram avaliados os parâmetros de composição química, incluindo teor de água, proteínas, gordura, cinzas e sólidos totais.

No Capítulo 3 investigam-se as propriedades termofísicas como a densidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica dos leites de vaca, cabra, búfala e ovelha *in natura*, em uma ampla faixa de temperatura (1 a 90 °C). Além disso, foram ajustadas equações empíricas aos dados experimentais, visando à obtenção de modelos preditivos para as propriedades estudadas, bem como à análise da dependência dessas propriedades em função da temperatura.

Por fim, o Capítulo 4 aborda o comportamento reológico do leite de búfala concentrado, avaliado em diferentes teores de sólidos totais (10 a 50%) e em uma ampla faixa de temperatura (1 a 80 °C). O estudo investiga a influência da concentração e da temperatura sobre as propriedades reológicas do produto, fornecendo dados para subsidiar a modelagem reológica e a otimização de processos industriais envolvendo leite de búfala concentrado.

Figura 1 – Organização dos capítulos da presente tese de doutorado



4 LEITES DE DIFERENTES ESPÉCIES: COMPOSIÇÃO, PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E REOLÓGICAS APLICADAS À ENGENHARIA DE ALIMENTOS

Artigo de Revisão

Será elaborada uma versão em inglês para submissão ao periódico.

Alexsander Saves dos Santos¹, Clebertyanne da Silva Carvalho¹, Marcio Augusto Ribeiro-Sanches^{1*}, Javier Telis-Romero¹

¹Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas (Ibilce), Campus São José do Rio Preto, São Paulo, 15054-000, Brasil.

*Autor a quem a correspondência pode ser endereçada. E-mail: mar.sanches@unesp.br (Márcio Augusto Ribeiro Sanches).

RESUMO

O leite é um alimento de elevado valor nutricional, amplamente consumido na forma fluida e utilizado como matéria-prima na produção de diversos derivados, como queijos, leites fermentados, manteiga, leites concentrados e desidratados. Os processos industriais aplicados ao leite desempenham papel fundamental na garantia da qualidade, da estabilidade, da segurança microbiológica e da vida útil dos produtos lácteos. Nesse contexto, esta revisão aborda a composição química, as características nutricionais e as principais aplicações dos leites de vaca, cabra, búfala e ovelha, destacando as diferenças entre essas espécies e seu potencial para o desenvolvimento de produtos com características específicas. Também são discutidos os aspectos relacionados aos produtos lácteos concentrados, bem como as propriedades termofísicas e reológicas dos alimentos e sua influência sobre as operações de processamento. A revisão também enfatiza a importância do conhecimento dessas propriedades para a modelagem matemática, o dimensionamento e a otimização de processos térmicos, contribuindo para

o aumento da eficiência operacional, a redução do consumo energético e a obtenção de produtos de elevada qualidade e segurança.

Palavras-chave: concentração a vácuo; leite concentrado; processos térmicos; viscosidade; processamento industrial; modelagem matemática.

1 INTRODUÇÃO

O leite é um alimento de elevado valor nutricional, amplamente consumido na forma fluida e utilizado como matéria-prima na produção de diversos derivados, como queijos, leites fermentados, manteiga, leites concentrados e desidratados. A importância da ciência e da tecnologia de alimentos na melhoria da qualidade de vida do ser humano é destacada pela crescente busca por alimentos saudáveis, com alto valor nutricional, disponíveis e de fácil acesso a população. Com isso, a procura por fontes alternativas de alimentos tem sido tópico de inúmeras pesquisas nas últimas décadas (SILVA, 2014).

Segundo Brasil (2011) o leite é definido como o produto obtido da ordenha completa, ininterrupta, de vacas em condições higiênicas adequadas. Para Ordoñez (2005) o leite é uma mistura complexa composta por lactose, glicerídeos, proteínas, sais minerais, vitaminas e enzimas. Algumas substâncias podem estar em emulsão tais como gordura e algumas substâncias associadas, mas também podem estar dispostas em suspensão como a caseína ligada a sais minerais. Lactose, vitaminas hidrossolúveis e proteínas do soro estão dissolvidas em solução, o que confere ao leite suas propriedades únicas.

O leite é um dos alimentos mais consumidos no mundo, seja na forma pura, em seus derivados ou como ingrediente em diversos produtos alimentícios. O volume de leite produzido no mundo no ciclo 2024/2025 foi de 673,3 milhões de toneladas, sendo 23% da produção localizada nas Américas, 43% na Ásia e 22% na União Europeia. A Índia lidera a produção mundial de leite, com 211,7 milhões de toneladas, seguida pela União Europeia, Estados Unidos, China e Rússia. O Brasil é o 6º maior produtor de leite do mundo, com uma produção de 28 milhões de toneladas em 2025 (FAO, 2025). A produção está concentrada principalmente nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul,

com destaque para estados como Minas Gerais, Paraná, São Paulo, Goiás e Rio Grande do Sul. O leite bovino é predominante na produção leiteira, mas os leites de cabra, ovelha e búfala também são significativos, cada um oferecendo características únicas que contribuem para uma variedade de produtos lácteos (EMBRAPA, 2025).

De acordo com Costa (2014) o leite concentrado, obtido por evaporação a vácuo, é um produto fundamental na indústria de laticínios. Este processo envolve a remoção parcial da água do leite fluído, resultando em um produto com maior concentração de sólidos. A evaporação a vácuo é preferida devido à sua eficiência e baixo custo energético comparado a outros métodos, como a secagem por spray dryer.

O leite concentrado é amplamente empregado na indústria para a produção de diversos produtos lácteos. Entre as principais aplicações, destacam-se a fabricação de leite condensado e leite evaporado, que são amplamente utilizados em diversos produtos alimentícios. Além disso, o leite concentrado serve como base para a produção de leite em pó e outros derivados lácteos, oferecendo versatilidade para uma variedade de aplicações industriais (ROBINSON; ITSARANUWAT, 2005). Cada tipo de leite concentrado, seja de vaca, cabra, búfala ou ovelha, contribui com características únicas, influenciando as propriedades finais dos produtos e ampliando as opções disponíveis no mercado.

Além das questões tecnológicas, a eficiência do processo é altamente dependente do projeto correto dos equipamentos e das operações unitárias. As propriedades reológicas e termofísicas do leite, que descrevem seu comportamento em resposta a forças externas, desempenham um papel importante na otimização dos processos industriais de alimentos. Compreender essas propriedades permite a seleção apropriada de bombas, acessórios, misturadores, biorreatores e tubulações (EVANGELISTA et al. 2020). As curvas de fluxo estacionário, por exemplo, podem fornecer dados importantes para a modelagem reológica e ajudar a identificar transições entre comportamentos newtonianos e não newtonianos dos leites concentrados.

Esta revisão teve como objetivo compreender a composição, as características nutricionais e as aplicações dos leites de diferentes espécies, bem como discutir a influência das propriedades termofísicas e reológicas nos processos de concentração e

processamento térmico, ressaltando sua importância para a otimização das operações industriais e para a obtenção de produtos lácteos de elevada qualidade.

2 O LEITE DE BÚFALA

A criação de búfalos tem suas origens na Ásia, onde esses animais foram domesticados há cerca de 7.000 anos (GARCIA-PEREZ et al., 2005). De acordo com Silva et al. (2003), os búfalos domésticos pertencem à família *Bovidae*, subfamília *Bovinae*, e à espécie *Bubalus bubalis*, que se divide em três subespécies: *bubalis*, que inclui as raças *Murrah*, *Jafarabadi* e *Mediterrâneo*; *kerebao*, que abrange a raça *Carabao*; e *fulvus*, que inclui o tipo Baio.

A bubalinocultura foi introduzida no Brasil no final do século XIX pelo Dr. Vicente Chermant de Miranda, que adquiriu búfalos Carabao. Em 1895, houve uma nova importação de búfalos italianos e, em 1952, foram trazidos mais búfalos da Itália e da Índia, fortalecendo ainda mais a criação no país (PIMENTEL et al., 2010). Atualmente, quatro raças são criadas no Brasil para a produção de carne e leite, sendo oficialmente reconhecidas pela Associação Brasileira de Criadores de Búfalos (ABCB): Carabao, Jafarabadi, Mediterrâneo e Murrah. Com exceção da raça Mediterrâneo, todas as demais são de origem asiática (SILVA, 2014).

Segundo a Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carne (ABIEC, 2018), o Brasil possui o maior rebanho bubalino no mundo ocidental, com um efetivo de 1,4 milhão de búfalos. A distribuição regional é a seguinte: Norte – 889.950 (65,93%); Sudeste – 178.880 (13,23%); Nordeste – 129.620 (9,59%); Sul – 102.700 (7,59%); e Centro-Oeste – 50.440 (3,73%). O Pará concentra o maior rebanho, com mais de 400 mil búfalos, seguido pelo Amapá, com 270 mil, totalizando 85% do rebanho da região Norte do Brasil.

Os búfalos são versáteis, com aptidão para produção de carne e leite, além de serem utilizados como força de trabalho no campo. A produção de leite é a principal aptidão dos búfalos, sendo o objetivo principal da criação. Esses animais têm a capacidade intrínseca de converter eficientemente forragens de baixa qualidade e resíduos de culturas em leite e carne de alta qualidade. Além disso, a vida produtiva de

uma fêmea saudável pode durar de nove a dez lactações, com uma produção média diária de leite variando de 7 a 11 litros (CAVALI; PEREIRA, 2020).

Os búfalos contribuem com 11% da produção mundial de leite, com uma população global de 201,1 milhões (FAO, 2018). A Ásia (Índia, Paquistão e China) é responsável por 96,9% dessa população, sendo a Índia responsável por 57% do leite produzido a partir de búfalos. Segundo Jorge et al. (2011), a produção de leite de búfala cresceu 301% nos últimos cinquenta anos, em contraste com o crescimento de 59,3% no leite de vaca, 85% no leite de cabra e 54,5% no leite de ovelha, destacando a importância da bubalinocultura leiteira.

O leite é um produto da secreção mamária composto por gordura, proteínas, açúcares, minerais, vitaminas e água. Tem uma importância significativa na alimentação humana devido à sua composição equilibrada de nutrientes (ANDRADE, 2015). Calfe e Langoni (2015) destacam que o leite é essencial para todas as faixas etárias, fornecendo proteínas, vitaminas e minerais indispensáveis para o desenvolvimento e manutenção do organismo humano. No Brasil, os produtos lácteos estão entre os três alimentos mais consumidos (SOUZA et al., 2013).

O leite de búfala possui características distintas que o diferenciam de outros tipos de leite. Seus altos níveis de sólidos totais, proteínas, lipídios, resíduo mineral fixo e lactose são de grande importância nutricional para crianças e adultos. No entanto, sua composição pode ser influenciada por diversos fatores, como raça, estágio de lactação, idade, manejo, sanidade, condições climáticas e alimentação (HUHN et al., 1986).

Segundo Andrade et al. (2011), o leite de búfala é utilizado para produzir uma variedade de produtos, incluindo manteiga, queijos frescos e maturados, leite condensado, leite em pó, sorvetes, iogurtes e creme de leite. Na indústria láctea, seu aproveitamento pode superar o rendimento do leite de vaca em mais de 40%. A principal vantagem do leite de búfala, em relação ao leite de outras espécies (Tabela 1), é a sua qualidade nutricional, apresentando teores superiores de proteínas, gorduras e minerais em comparação ao leite de vaca.

Tabela 1 – Composição química do leite de búfala e do leite de vaca

Componente	Búfala	Vaca
Gordura (%)	8,16	3,68
Proteínas (%)	4,50	3,70
Umidade (%)	83,00	88,00
Cinzas (%)	0,70	0,70
Extrato Seco (%) total	17,00	12,00

Fonte: Adaptado de Verruma e Salgado (1994).

De acordo com Silva (2014), os valores de gordura, proteínas, lactose e sólidos totais são de grande importância alimentar e nutricional. A ausência de β -caroteno no leite de búfala é uma característica marcante, conferindo-lhe uma coloração branca (Figura 1). Embora a ausência de β -caroteno, um precursor da vitamina A, não seja considerada um problema nutricional significativo, o leite de búfala é mais concentrado do que o de vaca, apresentando menos água e mais matéria seca.

Figura 1 – Animais búfalos e produtos bubalinos



Fonte: Disponível em: <<https://bebamaisleite.com.br/voce-ja-experimentou-produtos-feitos-com-leite-de-bufalas/>>. Acesso em: 31 jan 2024.

A gordura é o constituinte do leite com maior valor econômico, contribuindo para o sabor característico do leite e seus derivados, e melhorando a textura. Do ponto de vista nutricional, os lipídeos do leite apresentam níveis apreciáveis de ácidos graxos essenciais (NADER FILHO et al., 1984; MACEDO et al., 2001; MEDHAMMAR et al., 2012). Fernandes et al. (2011) e Costa Filho et al. (2015) relatam que o teor de gordura no leite de búfala se mantém sempre acima de 5,50%, uma característica distintiva da espécie, independentemente das condições ambientais. No Brasil, os teores variam entre 5,50% e 10,40%, com valores médios próximos a 6,00%, enquanto na Índia, os valores variam de 6,60% a 8,40% (BOVERA et al., 2001).

A concentração total de colesterol no leite de búfala é menor em comparação ao leite de vaca, com 275 mg versus 330 mg por 100 gramas de gordura. Além disso, o leite de búfala apresenta níveis mais elevados de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) do que o leite de vaca, mas é relativamente mais baixo em sódio (Na), potássio (K) e cloreto (Cl) (De FRANCISCIS e Di PALO, 1994; AMARAL et al., 2005c). Segundo Soares et al. (2013), os valores médios de proteína no leite de búfala variam entre 3,80% e 4,50%. Amaral et al. (2005) destacam que a porção proteica do leite de búfala é composta por 77,00% a 79,00% de caseína, principalmente na forma de micelas, com as frações α_{s1} , α_{s2} , β e κ constituindo, respectivamente, 4,00%, 6,30%, 35,00% e 4,00% do total de caseína.

3 O LEITE DE VACA

O leite de vaca é o tipo de leite mais amplamente utilizado na alimentação humana. Evidências arqueológicas mostram que a ordenha de vacas para obtenção de leite remonta a 9000 a.C., com os sumérios sendo os primeiros a criar gado de corte e utilizar o leite na alimentação e na fabricação de manteiga (ROQUE et al., 2003). Na pecuária, a vaca é a principal fonte de leite, com destaque mundial, enquanto outras espécies como a cabra, a ovelha e a búfala são usadas em menor escala (SÁ, 1998).

O leite bovino é rico em uma variedade de nutrientes, incluindo carboidratos (principalmente lactose), lipídeos (como ácidos graxos e fosfolipídios), caseínas (α_{s1} -caseína, α_{s2} -caseína, β -caseína e κ -caseína), proteínas do soro de leite (β -lactoglobulina, α -lactalbumina, imunoglobulinas, albumina de soro bovino e lactoferrina),

e enzimas (como lactoperoxidase, catalase, proteinase, xantina oxidase, lipase lipoproteica, fosfatase alcalina, aldolase e amilase). Além disso, contém vitaminas do complexo B, cobalamina, ácido ascórbico e vitaminas lipossolúveis (A, D, E e K), bem como minerais como cálcio, fósforo, magnésio, potássio, zinco e selênio (WALSTRA, 1990; MCSWEENEY; FOX, 2013).

Segundo Tronco (1996) o leite de vaca está formado aproximadamente por 7/8 de água e 1/8 de substâncias sólidas, (em massa), o que se denomina Extrato Seco Total. Em termos percentuais, tem-se: água, 87,0%; gordura, 4,0%; lactose, 4,8%; proteínas, 3,5%; sais minerais, 0,7%. A composição do leite varia de acordo com a raça do animal, a dieta, as estações do ano, a idade do animal, estágio de lactação e estado de saúde.

As proteínas do leite são majoritariamente caseínas, representando cerca de 80% do total, enquanto as proteínas do soro correspondem a 20%. As caseínas estão unidas ao fosfato de cálcio em complexos esféricos altamente hidratados conhecidos como micelas de caseína. A lactose é o carboidrato predominante, representando cerca de 50% dos sólidos no leite desengordurado, possui cerca de um quinto da doçura da sacarose e contribui para o sabor característico do leite. O leite bovino contém lipídeos complexos, com os triacilglicerídeos representando 96% a 98% do total. Outros lipídeos presentes incluem fosfolipídeos, colesterol, ácidos graxos livres, monoglicerídeos e diglicerídeos (WALSTRA; WOUTERS; GEURTS, 2005; DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010). A Tabela 2 apresenta a composição média do leite de vaca, destacando seu alto teor de lactose e gordura.

Tabela 2 – Composição média do leite de vaca

Constituinte	Teor (g/kg)	Variação (g/kg)
Água	873	855-887
Lactose	46	38-53
Gordura	39	24-55
Proteínas	32,5	23-44
Substâncias Minerais	6,5	5,3-8,0

Fonte: Adaptado de Walstra e Jenness (1984).

Segundo Silva (1997), o leite bovino fresco, produzido em condições ideais, tem um sabor suave, caracterizado pela relação entre lactose e cloretos, sendo descrito como doce e salgado, e não ácido ou amargo. O sabor e o odor pronunciados no leite fresco podem ser influenciados pela alimentação (ração, silagem) e pelo ambiente de ordenha. A cor branca do leite é resultado da dispersão da luz refletida pelos glóbulos de gordura e pelas partículas coloidais de caseína e fosfato de cálcio. A homogeneização aumenta a brancura do leite, melhorando a dispersão da luz (Figura 2).

Figura 2 – Representação do leite de vaca



Fonte: Disponível em: <<https://premix.com.br/blog/leite-de-vaca-conheca-seus-beneficios/>>. Acesso em: 31 jan. 2024.

4 O LEITE DE CABRA

O leite de cabra tem sido utilizado como alimento desde a antiguidade, com registros de consumo por povos egípcios e gregos. A lenda conta que Cleópatra foi uma das primeiras a promover o leite caprino ao usar banhos luxuosos com este produto (BENEVIDES; VEIGA, 2014).

De acordo com a FAO (2013), o leite de cabra representa apenas 0,5% do total de leite produzido globalmente no período de 2006 a 2009. Embora a produção de leite de cabra no Brasil seja relativamente baixa, ele é considerado uma alternativa produtiva

importante devido ao seu valor agregado e à relevância econômica em algumas regiões. A caprinocultura foi introduzida no Brasil pelos colonizadores portugueses por volta de 1535 (FIGUEIREDO, 1981, citado por MAIA, 1994).

Em 2017, a produção de leite de cabra no Brasil foi de 25 milhões de litros. A caprinocultura é mais comum nas regiões Norte e Nordeste, onde o mercado é caracterizado pela informalidade e parte da produção é destinada a programas de merenda escolar. A Região Sudeste é a segunda maior produtora de leite de cabra, com Minas Gerais ocupando a terceira posição entre as unidades da federação (IBGE, 2017). Cruz et al. (2016) destacam que, em regiões menos desenvolvidas, a criação de cabras é voltada principalmente para a subsistência familiar. A Tabela 3 mostra a produção de leite de cabra em litros por região nos anos de 2006 e 2017.

Tabela 3 – Produção de leite de cabra em litros por região

Região	2006	2017	Variação (%)
Centro-Oeste	1.015.186	443.501	- 56,31
Nordeste	26.780.781	17.692.834	- 33,93
Norte	180.391	181.995	0,89
Sudeste	6.194.894	6.257.380	1,01
Sul	1.568.936	777.614	- 50,44
Brasil	35.740.188	25.353.324	- 29,06

Fonte: IBGE (2017).

Apesar da redução na produção, Lucena (2018) observa uma tendência de melhoria no nível tecnológico das propriedades produtoras de leite, conforme revelado pelo último Censo Agropecuário.

O leite de cabra é amplamente consumido em todo o mundo e usado na fabricação de diversos produtos. O crescimento da caprinocultura é impulsionado pelo alto valor nutritivo do leite de cabra (RIBEIRO & RIBEIRO, 2010; PANDYA & GHODKE, 2007). Este leite pode ser considerado um alimento funcional devido a suas propriedades benéficas,

como altos teores de ácidos graxos benéficos ao organismo, qualidade nutricional e superior ao leite de vaca, e melhor digestibilidade. Também é hipoalergênico. Segundo o Ministério da Saúde, alimentos funcionais oferecem benefícios adicionais à saúde e podem ajudar a reduzir o risco de doenças crônicas degenerativas, como câncer e diabetes, dentre outras (ANVISA, 1999).

A demanda por leite de cabra tem aumentado devido a três aspectos principais: a capacidade da cabra de se adaptar a condições variáveis e inóspitas, o interesse por produtos de leite de cabra, especialmente orgânicos, queijos finos e iogurtes, e a necessidade de alternativas para pessoas com alergias ao leite de vaca e outras doenças gastrointestinais. Com uma maior conscientização sobre esses problemas e tratamentos específicos, o consumo de leite de cabra tem se expandido (HAENLEIN, 2004).

O leite de cabra é nutritivo e saudável, com altos níveis de vitamina A, cálcio, fósforo, potássio, magnésio e proteínas de alto valor biológico. É recomendado para uma ampla gama de consumidores, incluindo crianças, adultos, idosos e pessoas com restrições alimentares. Devido ao menor tamanho dos glóbulos de gordura, o leite de cabra é mais digestível do que o leite de vaca (LAGUNA, 2007). Características sensoriais, como sabor e aroma típicos, podem influenciar a aceitação ou rejeição dos produtos pelos consumidores (PARK; HAENLEIN, 2006; PARK et al., 2007; RIBEIRO; RIBEIRO, 2010, apud GARCIA e TRAVASSOS, 2012).

A composição química do leite de cabra varia consideravelmente durante o período de lactação. No final da lactação, os teores de gordura, proteína, sólidos e minerais aumentam, enquanto o conteúdo de lactose diminui (GUO et al., 2001; BROZOS et al., 1998; HAENLEIN, 2001; HAENLEIN, 2004).

De acordo com Cruz et al. (2016), o leite de cabra apresenta quantidades de nutrientes semelhantes ao leite de vaca. O extrato seco é de 12,5%, relacionado com o rendimento industrial na fabricação de derivados lácteos. O teor médio de lactose no leite caprino é de 4,8%, comparado a 4,5% no leite bovino. O conteúdo total de proteína no leite de cabra é menor do que no leite de vaca (3,1% contra 3,4%), e o teor de gordura é de cerca de 3,9%, enquanto no leite de vaca é 3,7%. Os minerais representam 1,0%.

A Tabela 4 apresenta os valores médios (%) e desvios padrões dos parâmetros físicos e químicos dos leites bovino, caprino e ovino.

Tabela 4 – Composição Centesimal dos leites bovino, caprino e ovino			
Características	Leite Bovino	Leite Caprino	Leite Ovino
Extrato Seco Total (%)	12,59 ± 0,69	12,71 ± 0,81	17,87 ± 2,07
Gordura (%)	3,57 ± 0,92	3,89 ± 0,68	5,88 ± 2,49
Proteína (%)	3,27 ± 0,3	3,23 ± 0,38	4,38 ± 0,53
Lactose (%)	5,18 ± 0,15	4,20 ± 0,22	4,85 ± 0,15
Acidez (%)	0,18 ± 0,02	0,18 ± 0,02	0,15 ± 0,006
Densidade (g/cm ³)	1.033,74 ± 0,79	1.030,2 ± 0,00	****
Cinzas (%)	0,53 ± 0,08	0,69 ± 0,03	0,85 ± 0,04

Fonte: Guerra et al. (2008).

A ausência de betacarotenos, pigmentos alaranjados e precursores da vitamina A, resulta em uma diferença na coloração do leite de cabra comparado ao leite de vaca. O leite de cabra possui uma coloração branco-porcelana (Figura 3), enquanto o leite de vaca é branco-amarelado (CRUZ et al., 2016).

Figura 3 – Representação do leite de cabra



Fonte: Disponível em: <<https://foodsafetybrazil.org/quais-os-possiveis-riscos-no-consumo-de-leite-de-cabra-cru/>>. Acesso em: 31 jan. 2024.

5 O LEITE DE OVELHA

O ovino é considerado um dos primeiros animais domesticados, sendo utilizado pelo homem para obter alimento, como carne e leite, e também para vestuário, através da pele e lã (RIBEIRO, 2005). A criação de ovinos de leite é crucial para a economia de vários países, especialmente nos países mediterrâneos, no Oriente Médio e no norte da África, que tradicionalmente são grandes produtores de leite de ovelha. No entanto, países da Oceania, América do Sul e Estados Unidos também têm dado atenção crescente a esse produto (BERGER et al., 2004; PARK et al., 2007; HERNANDEZ-LEDESMA et al., 2011).

De acordo com dados da FAO (2010), o leite de ovelha representa 1,4% da produção leiteira mundial, totalizando mais de 10 milhões de toneladas. Ele ocupa o quarto lugar entre os tipos de leite, após o leite bovino (82,9%), bubalino (13%) e caprino (2,3%). A região Mediterrânea é responsável por 66% da produção mundial de leite de ovelha, com França, Itália, Espanha e Grécia destacando-se com 14%, 8%, 4% e 8% da produção global, respectivamente (HAENLEIN, 2001).

No Brasil, a produção de leite de ovelha começou com a introdução da raça Lacaune em 1992, originária da França e adaptada ao sul do Brasil (BRITO et al., 2006). Atualmente, a produção é concentrada principalmente em Santa Catarina e Rio Grande do Sul, totalizando cerca de 509.000 litros (ROHENKOH et al., 2011). Apesar de ainda ser pouco conhecida, a produção tem crescido e a industrialização para a fabricação de queijos tem avançado.

O leite de ovelha é altamente valorizado por suas qualidades gastronômicas e é amplamente consumido na forma de queijos, iogurtes e sorvetes, com uma pequena proporção sendo utilizada como leite fluido (SILVA, 2014). Este tipo de leite é conhecido por ser o mais rico entre os leites usados na fabricação de laticínios (Figura 4). Sua alta concentração de sólidos totais contribui para um elevado rendimento na produção de queijos, como o Roquefort, onde 100 litros de leite podem resultar em até 22 kg de queijo (FURTADO, 2003).

Figura 4 – Representação do leite de ovelha



Fonte: Disponível em: <https://br.freepik.com/fotos-gratis/homem-segurando-uma-garrafa-de-leite-de-cabra_10132736>. Acesso em: 31 jan. 2024.

De acordo com Park et al. (2007) e Stubbs et al. (2009), as principais características do leite de ovelha incluem elevados teores de proteínas, cálcio, fósforo e lipídeos de alta qualidade. A composição média do leite de ovelha é de 7,6% de gordura, 5,6% de proteína, 19,0% de sólidos totais, 10,3% de sólidos desengordurados, 4,7% de lactose e 4,6% de caseína. Esses valores podem variar devido a fatores como dieta, raça, características individuais, sazonalidade, nutrição, condições de manipulação e estágio da lactação. A gordura é o componente com maior amplitude de variação, podendo variar entre dois a três pontos percentuais dependendo da dieta dos animais (HAENLEIN, 2001; PERES, 2001; ZAMIRI et al., 2001; NUDDA et al., 2002; SILVA, 2003; SEVI et al., 2004; HILALI et al., 2011).

Oliveira (2012) encontrou teores médios de gordura de 4,75% para ordenhas realizadas no período da manhã e 6,97% para ordenhas no período da tarde, indicando que o período do dia influencia a quantidade de gordura no leite. Brito et al. (2006) observaram um aumento gradual no teor de gordura ao longo de 140 dias, de 5,3% no início da lactação para 7,4% ao final, com um valor médio de 6,35%.

O teor de sólidos totais, que inclui todos os componentes do leite exceto a água, é significativamente influenciado pelo teor de gordura (PERES, 2001). Wendorff (2002)

relatou que teores de extrato seco total variaram entre 15,42 e 20,61% em raças europeias e asiáticas. A lactose, principal açúcar do leite e fonte de energia para neonatos e bactérias ácido lácticas que participam da transformação do leite em seus derivados (BRITO et al., 2006), sofre pouca variação durante a lactação, sendo sua produção regulada de acordo com a produção de leite (PERES, 2001). Os valores de lactose encontrados por Oliveira (2012) variaram de 4,97% no início da lactação para 4,48% no final do período, corroborando dados de Assenat (1991) e Scholz (1997).

Segundo Penna (2011) os teores de proteína encontrados na literatura variam de 4,2 a 7,2 %. Ochoa-Cordero et al. (2002), compararam diferentes raças e condições ambientais e observaram valores médios de proteína variáveis de 3,4 a 6,5 %. Ovelhas mestiças Lacaune e mestiças Lle de France x Texel, criadas no Rio Grande do Sul, produziram leite com valor médio de proteína de 4,75 % e 4,97%, respectivamente (PELLEGRINI, 2012).

A Tabela 5 mostra a composição do leite de ovelha comparada com os leites de cabra, vaca e búfala.

Tabela 5 – Composição do leite de ovelha comparado ao de outras espécies produtoras

Constituinte	Ovelha	Cabra	Vaca	Búfala
Sólidos totais (%)	17,4-18,9	11,9-14,0	10,5-14,3	19,2
Gordura (%)	6,0-7,5	4,1-4,5	2,8-4,8	8,8
Proteína total (%)	5,98	3,56	3,29	4,4
Caseína (%)	4,3-4,6	2,5-3,3	2,5-3,6	3,8
Lactose (%)	4,3-4,8	4,1-4,4	4,2-5,0	4,4
Cálcio (mg/L)	193	134	119	190
Sódio (mg/100g)	44	50	49	-
Ferro (MG/100g)	0,10	0,05	0,05	-
Fósforo (mg/100g)	158	111	93	-
Vitamina A (mg/L)	0,5	-	0,3	-
Vitamina E (mg/L)	15,8	-	7	-
Vitamina C (mg/L)	40	-	22	-

Fonte: Adaptada de Ferreira (2009).

Observa-se que o leite de ovelha é uma excelente fonte de cálcio, fósforo, vitaminas e lipídios de alta qualidade. Seu rendimento em produtos lácteos é comparável ao do leite de búfala, devido ao alto teor de sólidos e à sua cremosidade e untuosidade, proporcionada pelo teor de gorduras. Comparado ao leite de vaca, o leite de ovelha apresenta teores superiores de proteína, cálcio, fósforo e lipídios de alta qualidade, além de ser mais nutritivo e de fácil digestão devido aos seus pequenos glóbulos de gordura, que facilitam a digestão (SOUZA et al., 2005). Mundialmente, o leite de ovelha é apreciado por suas qualidades gastronômicas e é consumido na forma de queijos, iogurtes e sorvetes, com uma pequena proporção utilizada como leite fluido (SILVA, 2014).

O uso de leite concentrado para a fabricação de derivados lácteos tem sido estudado há anos. A concentração do leite aumenta sua densidade, refração e reduz a condutividade térmica. Menor atividade de água exige mais energia para remover a água do produto (WALSTRA; JENNESS, 1984). Segundo Coimbra e Teixeira (2010), a concentração por evaporação é um estágio fundamental no desenvolvimento de estratégias para purificação de componentes biológicos com elevado valor agregado.

6 PRODUTOS LÁCTEOS CONCENTRADOS

O processo de concentração e evaporação do leite por aplicação de calor começou em 1856 com Gail Borden (HALL & HEDRICK, 1971). A evaporação remove a água do leite por ebulição, um método utilizado na fabricação de leite em pó.

De acordo com Perrone et al. (2013), a aplicação de calor ao leite causa várias modificações: 1) eliminação de gases, incluindo CO_2 , e redução de O_2 , o que afeta a velocidade das reações de oxidação e o desenvolvimento de bactérias; 2) aumento do fosfato coloidal e redução da concentração de $[\text{Ca}^{2+}]$, modificações que são reversíveis com o tempo; 3) isomerização e degradação parcial da lactose, formando lactose e ácidos orgânicos; 4) hidrólise dos ésteres fosfóricos das caseínas; 5) redução do pH e aumento da acidez; 6) desnaturação de proteínas do soro, resultando em insolubilização; 7) inativação de enzimas; 8) reação de Maillard entre proteínas e lactose, diminuindo a lisina disponível; 9) formação de grupos sulfidril livres; 10) agregação das micelas de

caseína, que pode causar coagulação; 11) formação de lactonas e metilcetonas a partir da gordura; 12) degradação de algumas vitaminas.

Kessler (2002) descreve a evaporação na indústria de laticínios como a operação de obtenção de produtos lácteos líquidos concentrados, através da remoção de água no ponto de ebulição. Walstra, Wouters e Geurts (2005) explicam que, para leite e soro de leite, a evaporação a vácuo (sob pressão reduzida) é usada para fabricar produtos concentrados como leite evaporado, leite condensado e iogurte concentrado. Também é uma etapa intermediária na produção de leite em pó e na recristalização da lactose do soro.

A evaporação a vácuo retira água por meio do fornecimento de calor ao leite e soro sob pressão inferior à atmosférica. Esta técnica ocorre em temperaturas entre 40°C e 75°C, minimizando modificações nos constituintes do leite e soro. Na evaporação a vácuo o leite e o soro são concentrados a teores de sólidos lácteos entre 50 % m/m e 60 %m/m. Em comparação com o secador spray, a evaporação a vácuo é até vinte vezes mais econômica em termos de energia por quilograma de água evaporada (SCHUCK et al., 2005). A Figura 5 ilustra um evaporador rotativo a vácuo.

Figura 5 – Evaporador rotativo à vácuo



Fonte: Disponível em: < <https://www.lumilabor.com.br/equipamentos/evaporador-rotativo-a-vacu-804-fisatom?variant>>. Acesso em: 10 jul. 2024.

Walstra, Wouters e Geurts (2005) indicam que a evaporação a vácuo é utilizada para elaborar produtos concentrados, como leite evaporado, leite condensado e iogurte concentrado, além de servir como etapa intermediária na produção de leite em pó e recristalização de lactose do soro.

A concentração do leite pode provocar modificações como diminuição da atividade de água, aumento da higroscopicidade, mudanças no equilíbrio salino e na conformação das proteínas. Propriedades físico-químicas, como pressão osmótica, ponto de ebulição, condutividade elétrica, densidade e índice de refração aumentam, enquanto o ponto de congelamento diminui, afetando também as propriedades reológicas e diminuindo os coeficientes de difusão (WALSTRA; WOUTERS; GEURTS, 2005). Essas mudanças que ocorrem pela retirada de água na concentração do leite são observadas nas suas propriedades físicas e químicas, e a compreensão dessas alterações ajudam nas aplicações tecnológicas e da engenharia (COSTA, 2014).

7 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS ALIMENTOS

As propriedades termofísicas compreendem o conjunto de parâmetros físicos que afetam os mecanismos de armazenamento e transferência de calor em um material, variando em função de variáveis de estado como temperatura, pressão e composição, sem que ocorra alteração de sua identidade química. Em alimentos, essas propriedades são fundamentais para a compreensão do comportamento térmico durante operações unitárias e processos industriais que envolvem aquecimento e resfriamento.

No processamento de produtos lácteos, as variações de temperatura são inerentes a operações como pasteurização, esterilização, resfriamento, concentração e armazenamento refrigerado. Para compreender, modelar e controlar adequadamente esses processos, bem como para o correto dimensionamento de equipamentos, é indispensável o conhecimento das propriedades termofísicas dos leites. Além disso, a confiabilidade dos dados dessas propriedades é um fator determinante para a elaboração de balanços de massa e energia precisos, evitando perdas operacionais, erros de projeto e custos excessivos de processo.

Entre as principais propriedades termofísicas de interesse em alimentos líquidos destacam-se a densidade, o calor específico, a condutividade térmica e a difusividade térmica, as quais, de forma integrada, descrevem a resposta do material às variações de temperatura e às trocas de energia térmica.

A densidade, também denominada massa específica, é definida como a razão entre a massa e o volume de um material e constitui uma propriedade amplamente utilizada em cálculos de engenharia de processos. Em sistemas alimentícios, a densidade depende principalmente da temperatura e da composição do produto. De maneira geral, o aumento da temperatura promove a redução da densidade em função da expansão térmica do fluido. Em matrizes lácteas, essa propriedade é fortemente influenciada pelo teor de sólidos totais, especialmente pela fração de gordura, proteínas, lactose e sais minerais. Valores típicos de densidade para alimentos e materiais biológicos situam-se em uma faixa relativamente ampla, refletindo a diversidade composicional desses sistemas. A densidade é frequentemente determinada por técnicas como a picnometria, além do uso de densímetros baseados em tubos oscilantes, que permitem medições rápidas e aplicação em sistemas contínuos de produção.

O calor específico, ou capacidade térmica específica, é definido como a quantidade de energia necessária para elevar a temperatura de uma unidade de massa do material em uma unidade de temperatura. Essa propriedade está diretamente relacionada à capacidade do alimento de armazenar energia térmica. Em alimentos líquidos com elevado teor de água, como o leite, o calor específico apresenta valores relativamente altos, uma vez que a água possui elevada capacidade de armazenamento de calor em comparação aos demais constituintes. O calor específico é influenciado tanto pela composição química quanto pela temperatura do sistema, sendo um parâmetro essencial para o cálculo da energia requerida em operações térmicas industriais. Sua determinação pode ser realizada por meio de equações empíricas ou métodos experimentais, como métodos de mistura, comparação calorimétrica, métodos adiabáticos e calorimetria exploratória diferencial (DSC), sendo esta última amplamente utilizada por permitir a obtenção do calor específico como função da temperatura.

A condutividade térmica é uma propriedade de transporte que expressa a capacidade de um material conduzir calor e é descrita pela lei de Fourier da condução

térmica. Trata-se de uma propriedade intrínseca da matéria, fortemente dependente da composição, do teor de água, da estrutura física e de fatores como porosidade e presença de fases dispersas. Em alimentos líquidos, a condutividade térmica tende a aumentar com o aumento da temperatura e do teor de água, enquanto a elevação do teor de sólidos, especialmente lipídios, promove sua redução. No caso do leite e de produtos lácteos, essa propriedade exerce papel fundamental na estimativa de coeficientes globais e convectivos de transferência de calor, sendo indispensável para a modelagem térmica de processos industriais. Diversas técnicas experimentais são empregadas para a determinação da condutividade térmica, podendo ser classificadas em métodos de estado estacionário, quase estacionário e transiente, sendo os métodos transientes os mais utilizados em alimentos devido à rapidez das medições e à menor quantidade de amostra requerida.

A difusividade térmica é uma propriedade derivada, definida como a razão entre a condutividade térmica e o produto da densidade pelo calor específico. Essa propriedade indica a rapidez com que um material responde a variações de temperatura, representando a velocidade de propagação do calor no interior do sistema. Alimentos com maior difusividade térmica atingem o equilíbrio térmico mais rapidamente, enquanto sistemas com menor difusividade apresentam maior resistência às variações de temperatura. Em produtos lácteos, a difusividade térmica é influenciada pela composição e pela temperatura, sendo um parâmetro relevante para a análise de tempos de aquecimento e resfriamento em operações térmicas.

De forma geral, o conhecimento integrado das propriedades termofísicas é essencial para a compreensão do comportamento térmico de alimentos líquidos e para o desenvolvimento de modelos matemáticos confiáveis, contribuindo para a otimização de processos, melhoria da eficiência energética e garantia da qualidade dos produtos.

8 REOLOGIA DE ALIMENTOS

O termo reologia foi criado como derivação do termo grego “rheos” que significa fluir. A reologia é o estudo do escoamento e deformação dos materiais e esta definição foi aceita desde a criação da Sociedade Americana de Reologia em 1929 (EGAWA,

2007). A reologia é a ciência que estuda o escoamento e as deformações dos sólidos e fluidos, quando submetidos à ação de forças mecânicas, isto é, a forma como os materiais respondem à aplicação de tensões e deformações (TELIS-ROMERO; DITCHFIELD, 2019).

De acordo com Lannes et al. (2002), os dados reológicos são essenciais na indústria de alimentos para determinar a funcionalidade dos ingredientes no desenvolvimento de produtos, controlar a qualidade do produto final ou intermediário, avaliar a vida de prateleira, correlacionar a textura com dados sensoriais e calcular aspectos relacionados ao processo, como o funcionamento de agitadores, extrusoras, bombas, trocadores de calor, tubulações e homogeneizadores.

Telis-Romero e Ditchfield (2019) destacam as aplicações da reologia na indústria de alimentos: caracterização física de alimentos sólidos, líquidos ou pastosos; desenvolvimento ou reformulação de produtos; controle de qualidade de produtos finais ou intermediários; correlação com a avaliação sensorial da textura; e obtenção de informações sobre a estrutura dos materiais e produtos.

Na reologia de sólidos, a elasticidade é a propriedade de maior interesse, enquanto em líquidos, a viscosidade caracteriza a resistência ao escoamento. A viscosidade é a propriedade física de um líquido de resistir ao fluxo induzido pela tensão aplicada (cisalhamento). É influenciada pela natureza físico-química da substância, temperatura, pressão, taxa de cisalhamento e tempo. Para definir a viscosidade em função de um desses fatores, os outros devem ser mantidos constantes e bem definidos (CASTRO, 2007).

De acordo com Lewis (1993) citado por Bhattacharya (1998), observa que a consistência e a composição dos alimentos podem variar significativamente durante o processamento devido a etapas como mistura, aquecimento, resfriamento, homogeneização, aeração, fermentação e cristalização, o que afeta a viscosidade. Vriesman (2008) acrescenta que a viscosidade não pode ser medida diretamente, sendo determinada por força, torque e rotação, utilizando equipamentos como sistemas capilares e rotacionais.

O comportamento reológico dos produtos lácteos varia conforme a sua composição, microestrutura e condições de processamento. Matrizes lácteas, como leite

e soro, apresentam comportamentos diferentes influenciados por fatores como temperatura, conteúdo de proteínas, lipídeos, sólidos totais, minerais, pré-tratamento térmico e tempo de retenção no evaporador (BIENVENUE; JIMÉNEZ-FLORES; SINGH, 2003a, 2003b; TRINH; HAISMAN; TRINH, 2007; VÉLEZ-RUIZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 1998). O leite geralmente exibe comportamento newtoniano, enquanto o leite concentrado apresenta comportamento pseudoplástico. Manteiga e leite condensado têm comportamento viscoelástico, e iogurte e sorvete apresentam comportamento tixotrópico (VÉLEZ-RUIZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 1997).

8.1 Classificação dos fluidos

Os fluidos são classificados com base em seu comportamento reológico, analisando a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação sob condições estabelecidas de temperatura e pressão. Reologicamente, os fluidos são divididos em duas categorias principais: newtonianos e não-newtonianos (STEFFE, 1996).

Os fluidos newtonianos mantêm uma relação linear entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento, o que resulta em uma viscosidade constante. Exemplos incluem água, soluções de sacarose e óleos (TELIS-ROMERO; DITCHFIELD, 2019). Para esses fluidos, a viscosidade, medida pela Equação 1, é independente da taxa de cisalhamento.

$$\sigma = \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

em que, σ é a tensão de cisalhamento (Pa), $\dot{\gamma}$ a taxa de deformação (s^{-1}) e μ a viscosidade do fluido (Pa·s).

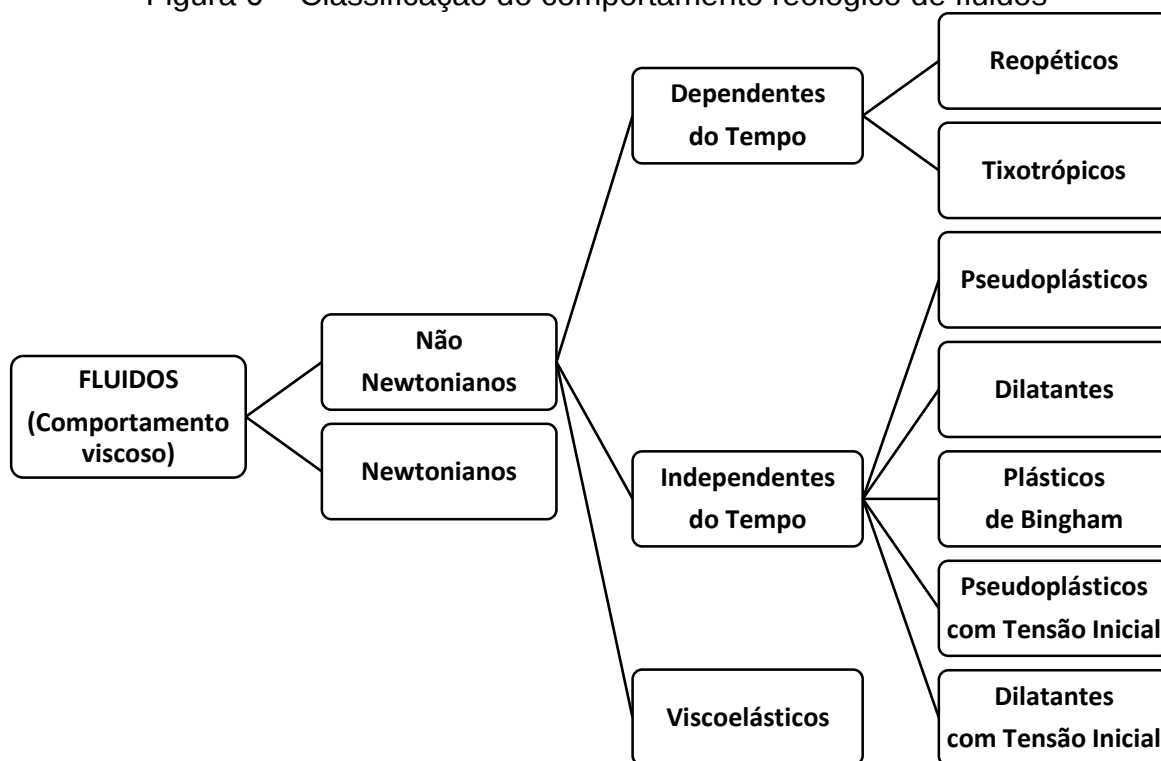
Alimentos como leite, suco de maçã, suco de laranja, água, vinho, cerveja e óleo vegetal frequentemente exibem comportamento newtoniano (SHARMA et al., 2000). O leite e o soro in natura são exemplos de fluidos newtonianos, assim como algumas matrizes lácteas concentradas, como leite integral evaporado com 19,6% de sólidos (VÉLEZ-RUIZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 1998), leite desnatado com 17,2% de sólidos

totais (VÉLEZ-RUIZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 2000) e leite desnatado microfiltrado com 15,9% de sólidos totais (SOLANKI; RIZVI, 2001).

Os fluidos não-newtonianos, por outro lado, apresentam uma relação não linear entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento. Nesse caso, a viscosidade, chamada de viscosidade aparente (μ_{ap}), varia com a taxa de cisalhamento. Esse conceito é amplamente utilizado na indústria para controle de qualidade, pois fornece um valor de viscosidade para condições específicas de teste (TELIS-ROMERO; DITCHFIELD, 2019).

Os fluidos não-newtonianos são subdivididos em dois grupos: independentes do tempo e dependentes do tempo (EGAWA, 2007). Para os fluidos independentes do tempo, a viscosidade aparente depende apenas da taxa de cisalhamento e é constante para uma temperatura fixa e são divididos em dilatantes, pseudoplásticos, plásticos de Bingham, entre outros. Já nos fluidos dependentes do tempo, a viscosidade aparente também depende do tempo de aplicação da tensão de cisalhamento, sendo divididos em tixotrópico e reopético (Figura 6).

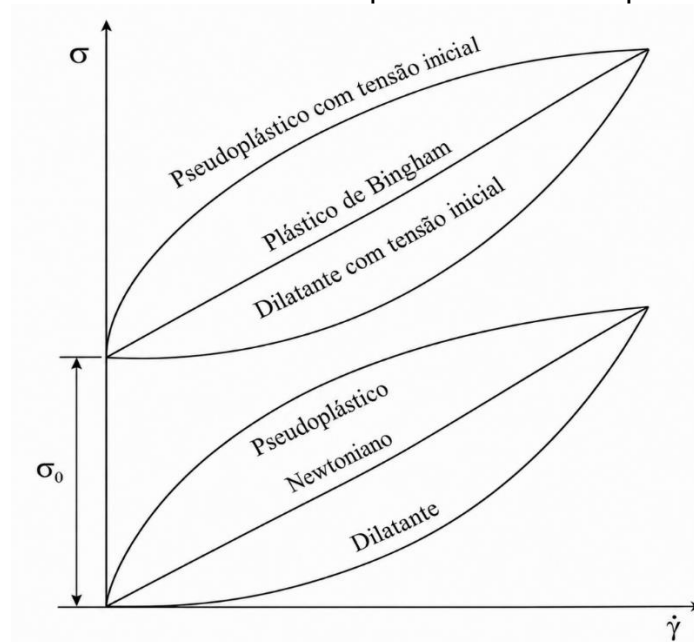
Figura 6 – Classificação do comportamento reológico de fluidos



Fonte: Tadini et al. (2019).

A maioria dos fluidos não-newtonianos é independente do tempo e exibe comportamento pseudoplástico, no qual a tensão de cisalhamento aumenta mais lentamente com o aumento da taxa de cisalhamento. Exemplos incluem polpas e sucos concentrados de frutas e leite de vaca concentrado (TELIS-ROMERO; DITCHFIELD, 2019). A Figura 7 ilustra as curvas características de comportamento reológico para fluidos não-newtonianos independentes do tempo.

Figura 7 – Curvas características de comportamento reológico de fluidos newtonianos e não newtonianos independentes do tempo



Fonte: Tadini et al. (2019).

Segundo Diniz (2009), no comportamento pseudoplástico, a viscosidade aparente do fluido é dependente da tensão de cisalhamento, demonstrando um decréscimo na viscosidade quando há um aumento na tensão. Esses fluidos em repouso apresentam um estado desordenado e, quando submetidos a uma tensão de cisalhamento, suas moléculas tendem a se orientar na direção da força aplicada. Quanto maior a tensão aplicada, maior será a ordenação e, conseqüentemente, menor será a viscosidade aparente. Essa classe é representada por produtos como polpas e sucos concentrados

de frutas, caldos de fermentação, melaço de cana, molhos para saladas e soluções de pectina (CHARM, 1963; HOLDSWORTH, 1971; VITALI; RAO, 1984), sendo bastante comum em leites de vaca concentrados (VÉLEZ-RUIZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 1998).

Outra categoria de fluidos não-newtonianos independentes do tempo são os chamados fluidos dilatantes, que exibem um comportamento oposto ao pseudoplástico, ou seja, a taxa de acréscimo da tensão de cisalhamento aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento. Esse tipo de fluido raramente é encontrado; no entanto, alguns exemplos de produtos com esse comportamento incluem alguns tipos de mel e suspensões de amido (TELIS-ROMERO; DITCHFIELD, 2019).

Chhabra e Richardson (2008) afirmam que o comportamento dilatante é caracterizado pelo aumento da viscosidade aparente com o aumento da taxa de cisalhamento. Isso resulta na ruptura da estrutura, aumentando o atrito quando a quantidade de líquido não é mais suficiente para a lubrificação. Esse comportamento é explicado assumindo que o fluido é constituído de partículas densamente empacotadas, com pequenos espaços intersticiais preenchidos com líquidos. Para Bourne (2002), o comportamento dilatante é raramente encontrado na indústria de alimentos e extremamente raro em produtos alimentares acabados, tendo sido reportado em suspensões de goma de amido, mel de abelha e xaropes de chocolate.

Fluidos dilatantes e pseudoplásticos são matematicamente descritos pelo modelo de Ostwald De Waelle ou Lei da Potência (Eq. 2).

$$\sigma = K(\dot{\gamma})^n \quad (2)$$

Em que, σ é a tensão de cisalhamento (Pa), $\dot{\gamma}$ a taxa de deformação (s^{-1}), K o coeficiente de consistência ($Pa.s^n$), e n o índice de comportamento ao escoamento. Para fluidos pseudoplásticos, < 1 , enquanto para fluidos dilatantes, > 1 .

Existem ainda, os fluidos independentes do tempo denominados plásticos, que não podem ser representados pelo modelo Lei da Potência, pois em razão de sua estrutura interna que impede a deformação, necessitam de uma tensão inicial para o início do escoamento. Abaixo dessa tensão, o material exibe a característica de um sólido e permanece em repouso, só começando a escoar quando submetido a uma tensão

superior a inicial (TELIS-ROMERO; DITCHFIELD, 2019). Esse tipo de material apresenta uma tensão residual ou crítica (yield stress), de forma que só escoar quando é excedida. Emulsões alimentícias como margarina e manteiga fazem parte dessa classificação de fluidos (COSTA, 2014).

Bienvenue et al. (2003b) avaliaram as propriedades de leite de vaca desnatado concentrado com 45 % sólidos e diferentes teores de minerais, estocado a 50 °C, e observaram que a viscosidade aumenta significativamente depois de 4 horas de estocagem apresentando comportamento plástico. O modelo Plástico de Bingham (Eq. 3), a qual apresenta comportamento linear para tensões acima da tensão residual, foi aplicado nessas amostras de leite.

$$\sigma = \sigma_0 + \mu_{PL}\dot{\gamma} \quad (3)$$

em que, σ é a tensão de cisalhamento (Pa), σ_0 a tensão inicial de escoamento (Pa), μ_{PL} a viscosidade plástica de Bingham (Pa·s) e $\dot{\gamma}$ a taxa de deformação (s^{-1}).

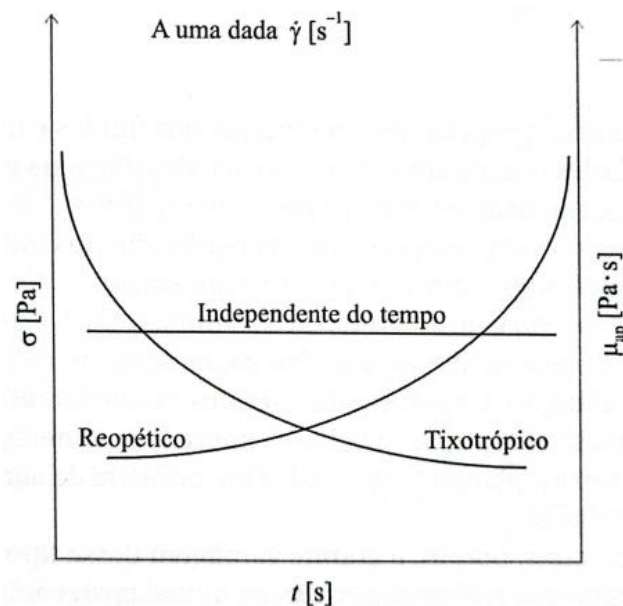
Segundo Costa (2014) existem muitos produtos alimentícios com comportamento plástico, porém não apresentam relação linear entre a taxa de deformação e tensão cisalhante depois de ultrapassada a tensão residual. São exemplos de matrizes lácteas que apresentam esse comportamento, especificamente o fenômeno de espessamento por tempo de permanência: o leite de vaca integral evaporado com 45 % a 48 % (VÉLEZ-RUIZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 1998), leite de vaca desnatado evaporado com 41,8 % a 46,7 % de sólidos (VÉLEZ-RUIZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 2000) e leite de vaca integral reconstituído com 48 % de sólidos (TRINH; HAISMAN; TRINH, 2007). Esses materiais foram descritos pelo modelo de Herschel-Bulkley (Eq. 4).

$$\sigma = \sigma_0 + K(\dot{\gamma})^n \quad (4)$$

em que, σ é a tensão de cisalhamento (Pa), $\dot{\gamma}$ a taxa de deformação (s^{-1}), K o coeficiente de consistência (Pa·sⁿ), e n o índice de comportamento ao escoamento.

Os fluidos não newtonianos dependentes do tempo podem ser subdivididos em tixotrópicos e reopéticos. Para os fluidos denominados tixotrópicos, a viscosidade aparente diminui com o tempo a uma taxa de cisalhamento constante, já para os fluidos denominados reopéticos ocorre o inverso, pois a viscosidade aparente aumenta (TELIS-ROMERO; DITCHFIELD, 2019). A Figura 8 apresenta as curvas características de comportamento reológico de fluidos dependentes do tempo.

Figura 8 – Curvas características de comportamento reológico de fluidos dependentes do tempo



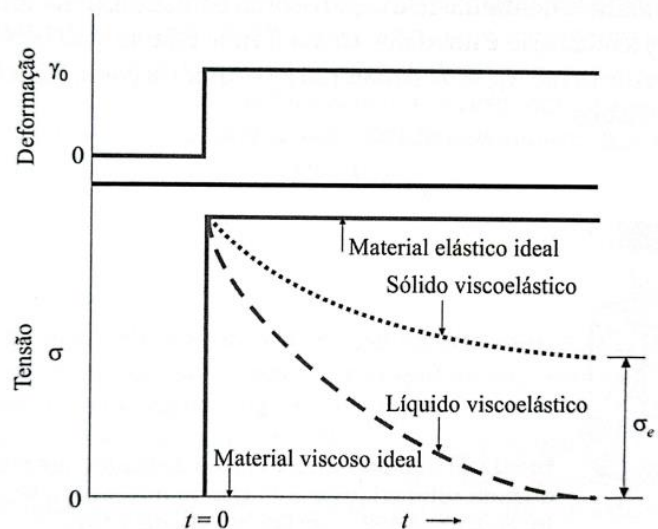
Fonte: Tadini et al. (2019).

A tixotropia refere-se à diminuição reversível na viscosidade aparente com o tempo de aplicação a uma taxa de deformação constante. Dado tempo suficiente, a estrutura alcançará um estado de equilíbrio, em que a taxa de “quebra” na estrutura do material será igual a taxa de reestruturação, não resultando em mudanças na estrutura com o tempo. A existência de uma condição de equilíbrio faz com que haja mudanças estruturais reversíveis (BARNES, 1997). Exemplos desse fluido são gelatinas, clara de ovo, leite condensado açucarado, maionese, cremes, manteigas, molhos para saladas, suco de maçã com polpas, sucos concentrados de maracujá e laranja (VITALI; RAO, 1984; SHARMA; RIZVI, 2000).

Por sua vez, os fluidos reopéticos, são aqueles que apresentam um acréscimo na viscosidade do fluido com o aumento da taxa de deformação. Assim como os fluidos tixotrópicos, após o repouso, o fluido tende a retornar ao seu comportamento reológico inicial. Este tipo de comportamento não é comum em alimentos, mas pode ocorrer em soluções de amido altamente concentradas ou em casos de formação de estruturas como na preparação de “creme de chantilly” e de clara em neve (DINIZ, 2009).

Outro grupo de fluidos que não se enquadra na classificação anterior são os viscoelásticos, que apresentam um comportamento híbrido entre o dos sólidos hookianos e o dos fluidos puramente viscosos, isto é, ao mesmo tempo em que uma parte da energia recebida durante a sua deformação é armazenada, como nos sólidos elásticos, outra parte é dissipada, como ocorre nos fluidos puramente viscosos (TELIS-ROMERO; DITCHFIELD, 2019). A Figura 9 apresenta a curva característica de comportamento reológico de fluidos viscoelásticos.

Figura 9 – Curva típicas de relaxamento da tensão de materiais com comportamento elástico ideal, viscoso ideal e viscoelásticos



Fonte: Tadini et al. (2019).

8.2 Modelos reológicos

Para facilitar os cálculos de engenharia, a descrição do comportamento reológico é feita através de modelos, que são usados para relacionar tensão de cisalhamento e

taxa de deformação (PEREIRA, 2007). Um modelo reológico traduz-se por uma expressão matemática, que descreve o comportamento reológico dos fluidos. Os modelos relacionam grandezas reológicas, como a tensão de cisalhamento, viscosidade e taxa de deformação, podem relacionar grandezas práticas, como a concentração, temperatura, pH ou índice de maturação e outros parâmetros e constantes (MORENO, 2018).

No estudo reológico é necessário estabelecer a relação entre deformação e tensão ao longo do tempo, do material estudado, assim como as relações do comportamento reológico de um material e sua estrutura de composição e condições ambientais como temperatura e pressão (MENEZES, 2018). O fluido, quando submetido a forças externas se deforma em maior ou menor proporção. As forças que atuam nesses fluidos são representadas matematicamente por cisalhamento ou tensão de cisalhamento e a resposta dinâmica do fluido é quantificada pela velocidade ou taxa de deformação ou cisalhamento (GOMÉZ, 2021). A modelagem matemática permite estabelecer equações matemáticas que podem explicar e nos ajudar a compreender fenômenos da natureza, através desses modelos é possível estimar os parâmetros relacionados a reologia dos produtos.

Diante disso, os modelos mais utilizados são aqueles que tiveram maior taxa de sucesso em análises em diferentes materiais. Um modelo reológico permite prever o escoamento do fluido e controlar as tensões a aplicar, sabendo como este irá reagir. Existem várias equações que descreve o comportamento de um fluido, no entanto, um modelo geral que se aplique a todas as situações não existe. O modelo reológico mais simples é o newtoniano e na maioria dos alimentos, não apresenta esse tipo de comportamento e requer modelos mais complexos para sua caracterização (TABILO-MUNIZAGA; BARBOSA-CÁNOVAS, 2005).

Silva (2014) afirma que na literatura existem muitos modelos reológicos propostos e a escolha do modelo a ser utilizado é uma função das características do fluido. O modelo é considerado apropriado para descrever tal comportamento, quando este proporciona os melhores ajustes dos dados experimentais. Os modelos mais comumente utilizados, segundo dados da literatura são: Ostwald-de-Waele (Lei da Potência), Herschel-Bulkley e Plástico de Bingham, representados no Quadro 1.

Quadro 1 – Modelos de reológicos de Ostwald-de-Waele, Herschel-Bulkley e Plástico de Bingham

Modelos	Equação	Aplicação
Ostwald-de-Waele	$\sigma = K(\dot{\gamma})^n$	É bastante utilizado devido à sua simplicidade, contudo descreve de forma aproximada o comportamento de um fluido não-newtoniano (MORENO, 2018). Índice do comportamento do fluido (n) é uma grandeza adimensional que indica fisicamente, o afastamento do fluido considerado do modelo newtoniano. Índice de consistência (K) indica o grau de resistência do fluido diante do escoamento. O comportamento do fluido se apresenta como dilatante quando (n) for maior do que uma unidade e, quando menor que a unidade, o modelo descreve o comportamento de fluido pseudoplástico. Quando n for igual à unidade, o modelo representa um comportamento newtoniano e, K corresponde a viscosidade do fluido. Comportamento reológico de água, leite, mel, suco de fruta clarificado (SILVA, 2014).
Herschel-Bulkley	$\sigma = \sigma_0 + K(\dot{\gamma})^n$	A equação para o modelo de Herschel-Bulkley é da mesma forma que a equação do modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência), mas com a adição do termo de tensão inicial (σ_0), que significa que, para haver escoamento do fluido, se torna necessária a aplicação de uma força que consiga romper esta tensão inicial (BOURNE, 2002). É usado para fluidos que só iniciam o processo de escoamento quando a tensão de cisalhamento aplicada supera uma tensão inicial que é própria do material (VIDAL, 2000). Comportamento reológico de leite concentrado (VÉLEZ-RUIZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 1998) e de purê de banana (GUERRERO; ALZAMORA, 1997; DITCHFIELD et al., 2004).
Plástico de Bingham	$\sigma = \sigma_0 + \mu_{PL}\dot{\gamma}$	De acordo com Skelland (1967) o modelo Plástico de Bingham é uma adaptação do modelo de Ostwald-de-Waele para fluidos newtonianos. A diferença entre ambos é a presença de uma tensão de cisalhamento crítica. Esses materiais possuem uma estrutura interna capaz de impedir o escoamento para valores de tensão de cisalhamento inferiores a um valor limite (σ_0). Quando a tensão de cisalhamento é maior que o valor limite, a estrutura interna colapsa, favorecendo o escoamento do material como um fluido.

8.3 Efeito da temperatura e da concentração sobre o comportamento reológico

A temperatura é um dos principais fatores que afetam a viscosidade dos fluidos. Quando a temperatura aumenta, a viscosidade da fase líquida geralmente diminui, facilitando o movimento das partículas em suspensão (PELEGRINE, 1999). De acordo com Krokida et al. (2001), a temperatura tem um impacto mais significativo no índice de consistência (K) dos fluidos alimentícios não-newtonianos do que no índice de comportamento (n).

Cabral (2008) e Steffe (1996) destacam que alguns modelos na literatura frequentemente correlacionam grandezas práticas, como concentração, temperatura, pH, que são úteis no dimensionamento de equipamentos e no controle de processos na Engenharia de Alimentos. Entre esses fatores, a temperatura é um dos mais influentes sobre a viscosidade.

Para avaliar o efeito da temperatura no comportamento reológico de diferentes matérias alimentares, uma equação do tipo Arrhenius (Eq. 5) tem sido aplicada com sucesso para vários sistemas alimentícios como leites de vaca reconstituídos e concentrados (REDDY; DATTA, 1994; VÉLEZ-RUIZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 1998), proteínas – glicomacropéptido (AHMED; RAMASWAMY, 2003), suco de frutas (TELIS-ROMERO; TELIS; YAMASHITA, 1999) e gema de ovo (TELIS-ROMERO et al., 2006), dentre outros (RAO, 2007). A viscosidade aparente diminui em uma função exponencial com o aumento da temperatura (STEFFE, 1996).

$$\mu = f(T) = A \cdot e^{\left(\frac{-Ea}{RT}\right)} \quad (5)$$

Em que, μ é a viscosidade (Pa.s), A é o parâmetro de ajuste da equação, Ea é a energia de ativação (J/mol), R é a constante dos gases 8,314 J/mol.K e T é a temperatura em Kelvin.

A concentração também exerce um efeito significativo sobre o comportamento reológico dos fluidos. À medida que a concentração de sólidos aumenta, a viscosidade geralmente aumenta devido ao aumento das interações entre as partículas. Isso ocorre porque partículas mais concentradas tendem a formar uma rede mais densa, o que

dificulta o movimento das partículas individuais e aumenta a resistência ao escoamento (VÉLEZ-RUIZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 1998). Por exemplo, em soluções e suspensões alimentícias, como purês e molhos, um aumento na concentração de sólidos pode levar a um aumento substancial na viscosidade, o que é crucial para o controle de processos e formulação de produtos (TELIS-ROMERO; DITCHFIELD, 2019). O efeito da concentração sobre a viscosidade pode ser modelado através de equações empíricas que relacionam a viscosidade com a concentração de sólidos, ajudando na previsão e controle das propriedades reológicas dos produtos alimentícios.

REFERÊNCIAS

AHMED, J.; RAMASWAMY, H. S. Effect of high-hydrostatic pressure and temperature on rheological characteristics of glycomacropeptide. **Journal of Dairy Science**, v. 86, n. 5, p. 1535–1540, 2003.

ALIMENTOS Funcionais. Brasília, DF: Biblioteca Virtual em Saúde, Ministério da Saúde, 2015. Disponível em: <<https://bvsms.saude.gov.br/alimento-funcionais/>>. Acesso em: 10 jun. 2024.

AMARAL, F. R.; ESCRIVÃO, S. C. Aspectos Relacionados à Búfala Leiteira. **Revista Brasileira de Reprodução Animal**, Belo Horizonte, v. 29, n. 2, p. 11–117, 2005.

ANDRADE, K. D. **Qualidade do leite de búfala (*bubalus bubalis*) suplementada com selênio**. 2015. 61 f. Dissertação (Mestrado em Produção Animal) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Macaíba, RN, 2015.

ANDRADE, K. D. et al. Efeito da estação do ano na qualidade do leite de búfalas. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 6, n. 3, p. 33-37, 2011.

ASSENAT, L. Leche de oveja: composición y propiedades. In: LUQUET, F. M.; KEILLING, J.; WILDER, R. **Leche y productos lácteos**: vaca – oveja – cabra. Zaragoza: Editorial Acribia, 1991. v. 1, p. 277-313.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNE - ABIEC. **Perfil da Pecuária no Brasil: relatório anual**. 2018. 48 p.

BARNES, H. A. Thixotropy: a review. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 70, n. 1–2, p. 1-33, 1997.

BEBA MAIS LEITE. **Você já experimentou produtos feitos com leite de búfalas?** 2024. Disponível em: <<https://bebamaisleite.com.br/voce-ja-experimentou-produtos-feitos-com-leite-de-bufalas/>>. Acesso em: 31 jan 2024.

BENEVIDES, I. de A.; VEIGA, A. Aspectos históricos, fisiológicos e antroposóficos do leite na alimentação humana: uma introdução ao tema. **Revista Arte Médica Ampliada**, v. 34, n. 1, 2014. Disponível em: <http://abmanacional.com.br/arquivo/7b0747f7f6bf9148dff2d8dcec4efff7688198b-34-1-leite.pdf>>. Acesso em: 31 jan. 2024.

BERGER, Y.; et al.; **Principles of sheep dairying in North America**. Cooperative Extension Publishing: University of Wisconsin, 156p. 2004.

BIENVENUE, A.; JIMÉNEZ-FLORES, R.; SINGH, H. Rheological properties of concentrated skim milk: influence of heat treatment and genetic variants on the changes in viscosity during storage. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 51, n. 22, p. 6488–94, 2003. a.

BIENVENUE, A.; JIMÉNEZ-FLORES, R.; SINGH, H. Rheological properties of concentrated skim milk: importance of soluble minerals in the changes in viscosity during storage. **Journal of dairy science**, v. 86, n. 12, p. 3813–3821, 2003. b.

BLOG PREMIX. **Leite de vaca: conheça seus benefícios**. 2024. Disponível em: <<https://premix.com.br/blog/leite-de-vaca-conheca-seus-beneficios/>>. Acesso em: 31 jan. 2024.

BOURNE, M.C. **Food texture and viscosity: concept and measurement**. New York: Academic Press, 2002.

BOVERA, F. et al. Influence of diet characteristics and productions levels on blood and milk urea concentrations in buffalo. In: WORLD BUFFALO CONGRESS, 6. Maracaibo, 2001. **Proceedings**. Maracaibo: Zulia University Tech Park, 2001. p. 506-511.

BRASIL. Portaria nº 398. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. 30 de abril de 1999. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 abr. 1999.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa 62 de 29 de dezembro de 2011. Dispõe sobre regulamentos técnicos de produção, identidade, qualidade, coleta e transporte do leite. **Diário Oficial da União**, Brasília, Seção 1, 30 dez. 2011.

BRITO, M. A. et al. Composição do sangue e do leite em ovinos leiteiros do sul do Brasil: variações na gestação e na lactação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 3, n. 36, p. 942-948, 2006.

BROZOS, C. et al. Effects of long-term recombinant bovine somatotropin (bST) administration on milk yield, milk composition and mammary gland health of dairy ewes. **Small Ruminant Research**, v. 29, n. 1, p. 113-120, 1998.

CABRAL, R. A. F. **Propriedades reológicas de fluidos alimentícios e aplicações no projeto de equipamentos de processo**. 2008. 179f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas: São José do Rio Preto, 2008.

CALLEFE, J. L. R.; LANGONI, H. Qualidade do leite: uma meta a ser atingida. **Revista Veterinária e Zootecnia**, v. 22, n. 2, p. 151-162, 2015.

CASTRO, A. L. de. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. Orientador: Jefferson Libório. 2007. 302 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CAVALI, J. PEREIRA, R. G. de A. Produção leiteira de búfalos. In: SALMAN, A. K. D.; PFEIFER, L. F. M. (Ed.) **Pecuária leiteira na Amazônia**. C.17,. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 391-399.

CHARM, S.E. The direct determination of shear stress-shear rate behavior of foods in the presence of yield stress. **Journal of Food Science**, Massachusetts, v. 28, n. 1, p.107-117, 1963.

CHHABRA, R. P; RICHARDSON, J.F, **Non-Newtonian flow and Applied Rheology. Engineering applications**. 2 ed., Amsterdam, Holanda, Elsevier, 2008.

CHORNOBAI, C. A.; DAMASCENO, J. C.; VISENTAINER, J. V.; SOUZA, N. E. Physycal chemical composition of in nature goat milk from cross Saanen throughout lactation period. **Archivos Latinoamericanos de Nutritión**, v. 49, n. 3, p. 283-286, 1999.

COIMBRA, J. S. R.; TEIXEIRA, J. A. **Engineering Aspects of Milk and Dairy Products**. Boca Raton: Taylor & Francis, 2010.

COSTA, A. R. **Propriedades termofísicas, reológicas e interfaces de leite e soro bovinos concentrados em evaporador a vácuo**. 2014. 75 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa, Minas Gerais, 2014.

COSTA FILHO, M. H. B., et al. Sazonalidade e variação na qualidade do leite de búfalas no Rio Grande do Norte. **Acta Veterinária Brasília**, Mossoró, v. 3, n. 8, p. 201-208, 2015.

CRUZ, A. G. et al. **Química, bioquímica, análise sensorial e nutrição no processamento de leite e derivados**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L.; FENNEMA, O. R. **Química de Alimentos de Fennema**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

DE FRANCISCIS, G., Di PALO, R. Buffalo Milk Production In: WORLD BUFFALO CONGRESS, 6, 1994, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo, 1994. p. 137-146.

DINIZ, M. D.S. **Caracterização do comportamento reológico e determinação de propriedades termofísicas da polpa de manga Ubá**. 2009. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Viçosa - UFV. Viçosa, Minas Gerais, 2009.

DITCHFIELD, C. **Estudo do processamento contínuo do purê de banana**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

EGAWA, E, Y., **Caracterização térmica e reológica de blendas de glicerol: colágeno tipo I de diferentes tecidos**. 2007, 106 p. Dissertação (Mestrado em Ciência - Química Analítica), Instituto de Química de São Paulo, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2007.

EMBRAPA. **Anuário Leite 2025**. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2025. 65 p.

EVANGELISTA, R. R.; SANCHES, M. A. R.; DE CASTILHOS, M. B. M.; CANTÚ-LOZANO, D.; TELIS-ROMERO, J. Determination of the rheological behavior and thermophysical properties of malbec grape juice concentrates (*Vitis vinifera*). **Food Research International**, [s. l.], v. 137, n. 109431, p. 109431, 2020.

FAO - **Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2010**. Disponível em: <<http://www.fao.org/corp/statistics/es/>>. Acesso em: 15 abr. 2024.

FAO – **Food And Agriculture Organization of the United Nations, 2013**. Disponível em: <<http://www.fao.org/statistics/en/>>. Acesso em: 15 maio 2024.

FAO – **Food And Agriculture Organization of the United Nations, 2018**. Disponível em: <<http://www.fao.org/statistics/en/>>. Acesso em: maio 2024.

FAO - **Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2025**. Disponível em: <<http://www.fao.org/corp/statistics/es/>>. Acesso em: 15 mar. 2026.

FERNANDES, R. V. B. et al. Avaliação físico-química, microbiológica e microscópica do

queijo artesanal comercializado em Rio Paranaíba-MG. **Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes**, Juiz de Fora, v. 382, n. 66, p. 21-26, 2011.

FERREIRA, M. I. C. **Produção e composição do leite de ovelhas santa inês e mestiças lacaune x santa inês e biometria de seus cordeiros**. 2009. 80 p. Tese (Doutorado em Zootecnia). Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2009.

FOOD SAFETY BRAZIL. **Quais os possíveis riscos no consumo de leite de cabra cru?** 2024. Disponível em: <<https://foodsafetybrazil.org/quais-os-possiveis-riscos-no-consumo-de-leite-de-cabra-cru/>>. Acesso em: 31 jan. 2024.

FREEPIK – 2024. Disponível em: <https://br.freepik.com/fotos-gratis/homem-segurando-uma-garrafa-de-leite-de-cabra_10132736.htm#query=leite%20de%20ovelha&position=1&from_view=keyword&track=ais_user&uuid=076e9a46-fc1f-4fd2-a1d8-79af58d15b00>. Acesso em: 31 jan. 2024.

FURTADO, M. M. **Queijos finos maturados por fungos**. São Paulo: Milkbuzz, p.128, 2003.

GARCÍA-PÉREZ, F. J.; LARIO, Y.; FERNÁNDEZ-LÓPEZ, J.; SAYAS, E.; PÉREZALVAREZ, J. A.; SENDRA, E. Effect of orange fiber addition on yogurt color during fermentation and cold storage. **Industrial Applications**, v. 30, n. 6, p. 457- 463, 2005.

GARCIA, R. V.; TRAVASSOS, A. E. R. Aspectos gerais sobre o leite de cabra: uma revisão. **Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes**, Juiz de Fora, v. 67, n. 386, p. 81-88, maio/ jun. 2012.

GUERRA, I. C. D.; et al. Análise comparativa da composição centesimal de leite bovino, caprino e ovino. **Encontro de Iniciação à Docência**, v. 10, 2008. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2008.

GUERRERO, S. N.; ALZAMORA, S. M. Effect of pH, temperature and glucose addition on flow behaviour of fruit purées – I. Banana purée. **Journal of Food Engineering**, 33 (3-4), 1997, 239-256.

GUO, M. R.; DIXON, P.H.; PARK, Y. W.; GILMORE, J. A.; KINDSTEDT, P. S. Seasonal changes in the chemical composition of commingled goat milk. **Journal Dairy Science**, v. 84, (Suppl. E), p. 79 - 83, 2001.

HAENLEIN, G.F.W. The nutritional value of sheep milk. **International of Journal Animal Science**, v. 16, p. 253-268, 2001.

HAENLEIN, G. F. W. Goat milk in human nutrition. **Small Ruminant Research**, v. 51, n. 1, p. 155-163, 2004.

HALL, C. W.; HEDRICK, T. I. **Drying of milk products**. 2. ed. Westport: AVI Publishing, 1971. 323 p.

HERNÁNDEZ-LEDESMA, B.; et al. Bioactive componentes of ovine and caprine chese whey. **Small Ruminant Research**, v. 101, p. 196-204, 2011.

HILALI, M; EL-MAYDA, E; RISCHKOWSKY, B. Characteristics and utilization of sheep and goat milk in the Middle East. **Small Ruminant Research**, Amsterdam, n. 101, p. 92-101, 2011.

HOLDSWORTH, S.D. Applicability of rheological models to the interpretation of flow and processing behaviour of fluid food products. **Journal of Texture Studies**, v. 2, n. 4, 1971.

HÜHN, S.; LOURENÇO JUNIOR, J.B.; MOURA CARVALHO, L.O.D.; NASCIMENTO, C.N.B.; VIEIRA, L.C. Aproveitamento do leite de búfala em produtos derivados. In: Simpósio do Trópico Úmido, 1, 1984, Belém. **Anais**. Belém: Embrapa-CPATU, 1986. v.5, p.265-269. (Embrapa-CPATU. Documentos, 36).

IAL - Instituto Adolfo Lutz. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4 ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020 p.

IBGE. Censo Agropecuário 2017. Rio de Janeiro: IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>>. Acesso em: 08 abr. 2024.

KESSLER, H. G. **Food and Bio Processing Engineering: Dairy Technology**. Munich: House A Kessler, 2002.

KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B.; SARAVACOS, G. D. Rheological properties of fluid fruit and vegetable puree products: compilation of literature data. **International Journal of Food Properties**, v. 4, n. 2, p. 179-200, 2001.

LAGUNA, L. E. **O leite de cabra como alimento funcional**. ZOOTECHNIA BRASIL. Seção Caprinocultura. 2007. Disponível em: <<http://www.zootecniabrasil.com.br/sistema/modules/wfsection/article.php?articleid=8>>. Acesso em: 18 abr. 2024.

LANNES, S. C. S.; MEDEIROS, M. L.; AMARAL, R. L. Formulação de chocolate de cupuaçu e reologia do produto líquido. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, v. 38, n. 4, out.-dez, 2002.

LEWIS, M. J. **Propriedades de los aliemntos y de los sistemas de procesado**. Zaragoza: Acribia, 1993. 494 p.

LUCENA, C. **Novo Censo Agropecuário mostra crescimento de efetivo de caprinos e ovinos no Nordeste**. Portal Embrapa, 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/17937427/embrapa-caprinos-cria-nucleo-sudeste->>. Acesso em 12 jul. 2024.

LUMILABOR. Equipamentos de Laboratório. 2024. Disponível em: <<https://www.lumilabor.com.br/equipamentos/evaporador-rotativo-a-vacuo-804-fisatom>>. Acesso em: 10 jul. 2024.

MACEDO, M. P. et al. Composição físico-química e produção do leite de búfalas da raça Mediterrâneo no oeste do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 30, n. 3, p. 1084-1088, 2001.

MAIA, M. da S. **Considerações sobre a caprinocultura no Brasil**. Rio Branco, AC: EMBRAPACPAF-Acre, 1994. 28 p. (EMBRAPA-CPAF-Acre. Documentos, 17).

MCSWEENEY, P. L. H.; FOX, P. F. **Advanced Dairy Chemistry**. 4. ed. Boston: Springer US, 2013. v. 1A. 548 p.

MEDHAMMAR, E. et al. Composition of milk from minor dairy animals and buffalo breeds: A biodiversity perspective. **Journal of Agricultural Science**, v. 2, n. 9, p.445-474. 2012.

MENEZES, M. S. **Reologia de alimentos modelos**. Monografia. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, Brasil, 2018.

MORENO, A. F. N. **Modelos reológicos para caracterização de caldas hidráulicas**. 2018. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciência e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2018.

NADER FILHO, A. et al. Estudo da variação do ponto crioscópico do leite de búfala. **Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes**, Juiz de Fora, v. 39, n. 234, 1984.

NUDDA, A. et al. The yield and composition of milk in Sarda, Awassi, and Merino sheep milked unilaterally at different frequencies. **Journal of Dairy Science**, Champaign, v. 85, n. 11, p. 2879-2884, 2002.

OCHOA-CORDERO, M. A. et al. Milk yield and composition of Rambouillet ewes under intensive management. **Small Ruminant Research**, Amsterdam, v. 43, n. 3, p. 269-274, 2002.

OLIVEIRA, A. A. **Produção e composição do leite de ovelhas da raça bergamácia suplementadas com óleo de linhaça (*Linum usitatissimum* L.)**. 2012. 81 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia de Botucatu, 2012.

ORDÓÑEZ, Juan A. **Tecnologia de Alimentos: Alimentos de origem animal**. v.2. Porto Alegre: Artmed, 2005.

PACHECO, M. T. B. et al. Propriedades funcionais de hidrolisados obtidos a partir de concentrados proteicos de soro de leite. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 25, n. 2, p. 333-338, 2005.

PANDYA, A. J.; GHODKE, K. M. Goat and sheep milk products other than cheeses and yoghurt. **Small Ruminant Research**, v. 68, p. 193-206, 2007.

PARK, Y. W. Minor Species Milk. In: PARK, Y. W., HAENLEIN, G. F. W. Handbook of Milk of Non-bovine Mammals. **Oxford: Blackwell Publishing Professional**, 2006. p. 393-406.

PARK, Y. W., et al. Physico-chemical characteristics of goat and sheep milk. **Small Ruminant Research**, v. 68, p. 88-113, 2007.

PELEGRINE, D.H. **Comportamento reológico das polpas de manga e abacaxi**. 1999. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – FEA, UNICAMP, Campinas, 1999.

PELLEGRINI, L. G. **Caracterização do leite ovino em função do período de lactação**. 2012. 60 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Alimentos) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

PENNA, C. F. A. M. **Produção e parâmetros de qualidade de leite e queijos de ovelhas Lacaune, Santa Inês e suas mestiças submetidas a dietas elaboradas com soja ou linhaça**. 2011. 155 f. Tese (Doutorado em Produção Animal) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

PEREIRA, E. A. **Influência de biopolímeros no comportamento reológico de polpa de umbu**. 2007. 165 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

PERES, J. R. O leite como ferramenta do monitoramento nutricional. In: GONZÁLEZ, F. H. D.; DÜRR, J. W.; FONTANELI, R. S. (Ed.). **Uso do leite para monitorar a nutrição e o metabolismo de vacas leiteiras**. Porto Alegre: UFRGS, 2001. p. 29-43.

PERRONE, I. T. et al. Determinação da composição e do rendimento de queijo prato obtido a partir de leite concentrado por evaporação a vácuo. **Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes**, [S.l.], v. 65, n. 376, p. 35-41, dez. 2013.

PIMENTEL, M.V.S.; BARBOSA, M.M.M.; ANDRADE, S.C. de; NASCIMENTO, W.G. do. Evolução da bubalinocultura no Nordeste brasileiro: uma revisão bibliográfica. In: Jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão- JEPEX, 10, 2010, Garanhuns. **Anais...** Garanhuns: UFRPE- UAG, 2010.

RAO, M. A. **Rheology of Fluid and Semisolid Foods: Principles and Applications**. 2nd. ed. Washinton: Springer, 2007.

REDDY, C. S.; DATTA, A. K. Thermophysical Properties of Concentrated Reconstituted Milk during Processing. **Journal of Food Engineering**, v. 21, p. 31–40, 1994.

RIBEIRO, L. C. **Produção, composição e rendimento em queijo de ovelhas Santa Inês**. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005, 64p.

RIBEIRO, A. C.; RIBEIRO, S. D. A. Specialty products made from goat milk. **Small Ruminant Research**, v. 89, p. 225-233, 2010.

ROBINSON, R.; ITSARANUWAT, P. Dairy Microbiology Handbook: **The Microbiology of Milk and Milk Products**, Third Edition. p. 175-211, 2005.

ROQUE, R. A; SCHUMACHER, S. S. P; PAVIA, P. C. Quantificação dos microorganismos psicotróficos em leites pasteurizados tipo B e C, comercializados na cidade de São Paulo, SP. **Higiene Alimentar**, v. 17, n. 112, p. 59-68, 2003.

SEVI, A.; ALBENZIO, M.; MARINO, R. et al. Effects of lambing season and stage of lactation on ewe milk quality. **Small Ruminant Research**, Amsterdam, v. 51, n. 3, p. 251-259, 2004.

SCHOLZ, W. **Elaboración de quesos de oveja y de cabra**. Zaragoza: Acribia, 1997. 145 p.

SCHUCK, P.; MÉJEAN, S.; DOLIVET, A.; BEAUCHER, E.; FAMELART, M. Pump amperage: a new method for monitoring viscosity of dairy concentrates before spray drying. **Lait**, v. 85, p. 361–367, 2005.

SHARMA, S. K., MULVANEY, S. J., RIZVI, S. S. H. **Food processing engineering: theory and laboratory experiments**. United States of America: WileyInterscience. 2000, 348p.

SILVA, Laíse Teles da Silva. **Propriedades Termofísicas e Comportamento Reológico do leite e do soro de búfala**. 2014. 75 p. Mestrado (Engenharia e Ciência De Alimentos Campus Juvino Oliveira) - Universidade Estadual Do Sudoeste Da Bahia – UESB, Itapetinga, 2014.

SILVA, M. S. T.; LOURENÇO JUNIOR, J. B.; MIRANDA, H. A.; ERCHESEN, R.; FONSECA, R. F. S. R.; MELO, J. Á.; COSTA, J. M. **Programa de incentivo à criação de búfalos por pequenos produtores: PRONAF-Pará**, Belém, PA: EMBRAPA-CPATU, 2003. 20 p.

SILVA, Paulo Henrique Fonseca da. Leite: Aspectos de Composição e Propriedades. **QUÍMICA NOVA NA ESCOLA Leite**, n. 6, novembro, 1997.

SILVA, M. G. C. M. **Produção de caprinos**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2003. 56 p.

SKELLAND, A. **Non-newtonian flow and heat transfer**. New York London Sydney: John Wiley E Sons, Imc., 1967.

SOARES, A. D. et al. Composição do leite de búfala em diferentes ordens de parto. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Campina Grande, v. 4, n. 9, p. 53-60, 2013.

SOLANKI, G.; RIZVI, S. S. Physico-chemical properties of skim milk retentates from microfiltration. **Journal of Dairy Science**, v. 84, n. 11, p. 2381–2391, 2001.

SOUZA, A. C. K. O. et al. Produção, composição química e características físicas do leite de ovinos da Raça Corriedale. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 11, n. 1, p. 73-77, 2005.

SOUZA, J.; SOUZA, J.; SOUZA, F. V. C. Desenvolvimento, parâmetros físico-químicos e avaliação sensorial de sobremesas lácteas elaboradas com soro de queijo e gomas. **Revista Instituto Laticínios Cândido Tostes**, Minas Gerais, n. 393, p. 16-25, jul. 2013.

STEFFE, J.F. **Rheological methods in food process engineering**. 2. ed. Freeman Press, 1996. 412p.

STUBBS, A.; ABUD, G.; BENCINI, R. **Dairy sheep manual: farm management guidelines**. Kingston: RIRDC, 2009. 69 p.

TABILO-MUNIZAGA, G.; BARBOSA-CÁNOVAS, G.V. Rheology for the food industry. **Journal of Food Engineering**, v. 67, p. 147-156, 2005.

TADINI, C.C.; TELIS, V.R.N.; MEIRELLES, A.J.A.; PESSOA-FILHO, P.A. (Eds) **Operações Unitárias na Indústria de Alimentos**, v. 1. Rio de Janeiro: LTC, 2015. 562p.

TELIS ROMERO, J.; DITCHFIELD, C. Reologia de produtos alimentícios. In: TADINI, C. C., et al. **Operações Unitárias na Indústria de Alimentos**. v. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, 2019. Cap. 3, p. 63-168.

TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N.; YAMASHITA, F. Friction factors and rheological properties of orange juice. **Journal of Food Engineering**. Oxford: Elsevier, v. 40, p. 101-106, 1999.

TELIS-ROMERO, J.; THOMAZ, C.E.P.; BERNARDI, M. TELIS, V.R.N. GABAS, A.L. Rheological properties and fluid dynamics of egg yolk. **Journal of Food Engineering**, v. 74, n. 2, p. 191-197, 2006.

TRINH, B.; HAISMAN, D.; TRINH, K. T. Rheological characterisation of age thickening with special reference to milk concentrates. **The Journal of dairy research**, 51 v. 74, n. 1, p. 106–15, 2007.

TRONCO, V. M. **Aprimoramento do Leite: Elaboração de seus Derivados na Propriedade rural**. Guaíba-RS, Livraria e Editora agropecuária Ltda, 1996. 144p.

VÉLEZ-RUIZ, J. F.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. **Effects of temperature and concentration on the rheology of concentrated milk**. Transactions of the ASAE, v. 40, p. 1113-1118, 1997.

VÉLEZ-RUIZ, J. F.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. Flow and Structural Characteristics of Concentrated Milk. **Journal of Texture Studies**, v. 31, n. 3, p. 315-333, 2000.

VÉLEZ-RUIZ, J. F.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. Rheological Properties of Concentrated Milk as a Function of Concentration, Temperature and Storage Time. **Journal of Food Engineering**, v. 35, p. 177–190, 1998.

VERRUMA, M. R.; SALGADO, J. M. Análise química do leite de búfala em comparação ao leite de vaca. **Scientia Agricola**, v. 51, n. 1, p. 131-137, 1994.

VIDAL, J.R.M.B.; GASPARETTO, C.A.; GRANDIN, A. Efeito da temperatura no comportamento reológico da polpa de manga. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v.1, n. 2, p. 69-76, 2000.

VITALI, A. A.; RAO, M. A. Flow Properties of low-pulp concentrated orange juice: effect of temperature and concentration. **Journal of Food Science**, v. 49, n. 3, p. 882-888, 1984.

WALSTRA, P. On the stability of casein micelles. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], v. 73, n. 8, p. 1965-1979, 1990.

WALSTRA, P. & JENNESS, R. **Dairy chemistry and physics**. Nova York: John Wiley & Sons, 1984.

WALSTRA, P.; WOUTERS, J. T. M.; GEURTS, T. J. **Dairy science and technology, second edition**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2005. 808 p.

WENDORFF, B. Milk composition and cheese yield. In: **Great lakes dairy sheep symposium**, 2002, Ithaca. Proc ... Ithaca: Cornell University, 2002. p. 104-117.

ZAMIRI, M. J.; QOTBI, A.; IZADIFARD, J. Effect of daily oxytocin injection on milk yield and lactation length in sheep. **Small Ruminant Research**, Amsterdam, v. 40, n. 2, p. 179-185, 2001.

5 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO LEITE DE VACA, CABRA, BÚFALA E OVELHA CONCENTRADO EM EVAPORADOR A VÁCUO

Artigo de Pesquisa

Será elaborada uma versão em inglês para submissão ao periódico “*Food Science and Technology*”.

Alexsander Saves dos Santos¹, Cleberyanne da Silva Carvalho¹, Marcio Augusto Ribeiro-Sanches^{1*}, Javier Telis-Romero¹

¹Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas (Ibilce), Campus São José do Rio Preto, São Paulo, 15054-000, Brasil.

*Autor a quem a correspondência pode ser endereçada. E-mail: mar.sanches@unesp.br (Márcio Augusto Ribeiro Sanches).

RESUMO

O leite é um dos alimentos mais consumidos globalmente, sendo fundamental tanto em sua forma pura quanto concentrada, além de servir como base para diversos produtos lácteos. Entre as variedades de leite, o de vaca é o mais amplamente utilizado, enquanto os leites de cabra, búfala e ovelha também têm relevância significativa, dependendo da região, clima e preferências alimentares locais. Este trabalho visa investigar os efeitos do processo de concentração a vácuo sobre a composição química de leites de diferentes espécies: bovinos, bubalinos, caprinos e ovinos. O leite foi submetido a um processo de concentração em um evaporador a vácuo (Fisatom, São Paulo, Brasil), operando em batelada. Alíquotas dos concentrados foram coletadas em intervalos de 6 minutos, durante um período total de 60 minutos. A análise da composição química das amostras incluiu a quantificação de água, proteínas, gordura, cinzas, sólidos totais e carboidratos, seguindo as metodologias da “Association of Official Analytical Chemists” (AOAC) e do

Instituto Adolfo Lutz (IAL). Os resultados mostraram que, em sua forma *in natura*, os leites de búfala e ovelha apresentam maiores teores de proteínas, gordura, cinzas e sólidos totais em comparação com os de vaca e cabra, com o leite de ovelha destacando-se como o mais proteico. Apenas os leites de vaca e ovelha diferem significativamente em termos de carboidratos, com o leite de vaca apresentando níveis mais elevados. Após a concentração, houve um aumento na composição química dos leites, atingindo níveis de aproximadamente 20% de proteínas, 30% de gordura, 4% de cinzas, 25% de carboidratos e 68% de sólidos totais, com a água reduzida a até 32%. Os leites concentrados de búfala e ovelha mostraram níveis mais altos de gorduras, com o leite de ovelha se destacando como o mais rico em proteínas. Leites concentrados de cabra e vaca apresentaram níveis similares de proteínas e os de búfala e ovelha tiveram maior teor de gordura. Leites de vaca e cabra, por outro lado, apresentaram maiores quantidades de água, cinzas e carboidratos, além de menores níveis de sólidos totais em comparação com os leites de búfala e ovelha. Concluiu-se que a caracterização das propriedades dos leites de vaca, cabra, búfala e ovelha, considerando os efeitos da concentração e as diferenças na composição físico-química, fornece informações essenciais para a engenharia de processos, contribuindo para o desenvolvimento de processos mais eficientes e para a garantia da qualidade e da segurança dos produtos lácteos.

Palavras-chave: leite; análise físico-química; concentração de sólidos; proteína; gordura; produtos lácteos.

1 INTRODUÇÃO

O leite é um dos alimentos mais consumidos no mundo, seja na forma pura, em seus derivados ou como ingrediente em diversos produtos alimentícios. Além da sua importância nutricional, sua ingestão é recomendada em todas as fases da vida (Melo Moreira et al., 2024). O Brasil é o terceiro maior produtor de leite de vaca do mundo, com uma produção estimada em 34,60 bilhões de litros em 2022 (IBGE, 2022).

O leite bovino é predominante na produção leiteira, mas os leites de cabra, ovelha e búfala também são significativos, cada um oferecendo características únicas que contribuem para uma variedade de produtos lácteos. A indústria leiteira desses leites não convencionais aumentou consideravelmente nas últimas décadas (Pérez Núñez et al., 2024).

O leite concentrado, obtido por evaporação a vácuo, é um produto fundamental na indústria de laticínios. Este processo envolve a remoção parcial da água do leite fluído, resultando em um produto com maior concentração de sólidos. A evaporação a vácuo é preferida devido à sua eficiência e baixo custo energético comparado a outros métodos, como a secagem por spray dryer (ROSA & PRUDENCIO, 2023). Cada tipo de leite concentrado, seja de vaca, cabra, búfala ou ovelha, contribui com características únicas, influenciando as propriedades finais dos produtos e ampliando as opções disponíveis no mercado (ABDULWAHID JABER, 2022).

Não foram identificados outros estudos comparativos sobre os leites bubalinos, bovinos, caprinos e ovinos após concentração em evaporador. Considerando esses aspectos, o presente trabalho tem o objetivo de avaliar os efeitos do processo de concentração em evaporador a vácuo sobre a composição química de leites bubalinos, bovinos, caprinos e ovinos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Preparo das amostras de leite concentrado

As amostras de leite das quatro espécies foram coletadas entre 2022 e 2023 em fazendas localizadas na região de São José do Rio Preto/SP. As amostras de leite cru, com um volume de 10 litros cada, foram refrigeradas a uma temperatura de 4 a 7°C imediatamente após a ordenha. O leite foi acondicionado em tambores de leite, que foram previamente higienizados e esterilizados, e então transportado para o Laboratório de Medidas Físicas II do Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos (DETA) do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas (IBILCE) da Universidade Estadual

Paulista (UNESP) – Campus de São José do Rio Preto – SP. A soma de todas coletas realizadas, totalizaram 50 litros de leite para cada espécie.

Os leites foram inicialmente tratados por pasteurização lenta a 65°C por 30 minutos, em um tanque encamisado, antes de serem concentrados. Após a pasteurização, os leites foram preaquecidos a temperaturas entre 65 e 70°C antes de serem submetidos ao processo de evaporação. Amostras de 2 litros de leite foram então adicionadas a um evaporador (Fisatom, São Paulo, Brasil) operando em batelada sob vácuo. Durante todo o processo, o ponto de ebulição foi mantido em baixa temperatura ($\pm 68^\circ\text{C}$) para evitar alterações significativas nos constituintes do leite. Alíquotas dos concentrados foram retiradas do evaporador a cada 6 minutos, totalizando 60 minutos de processo. Após a concentração, todas as amostras foram armazenadas em refrigeração ($1 - 4^\circ\text{C}$) até a realização das análises.

2.2 Caracterização físico-química

2.2.1 Determinação do teor de sólidos totais

Para a determinação do teor de sólidos totais das amostras, foi utilizado o método gravimétrico (método 012/IV). Inicialmente, cerca de 5 g da amostra foram pesados em uma balança analítica (AY220, Shimatzu, Japão, com precisão de $\pm 0,1$ mg). Utilizaram-se placas de vidro, previamente lavadas e secas na mesma temperatura de análise. A amostra foi seca em uma estufa com circulação forçada (Quimis, Brasil) a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ e, posteriormente, resfriada em dessecador. Após o resfriamento, a amostra foi pesada até que se alcançasse massa constante. O conteúdo de sólidos totais (TST) foi calculado conforme a Equação 1.

$$TST = \frac{M_s}{M_a} \times 100 \quad (1)$$

em que, M_a é a massa (g) inicial da amostra e M_s a massa (g) da amostra seca.

2.2.2 Determinação do conteúdo de proteína

A quantificação de proteínas nas amostras foi obtida pelo conteúdo de nitrogênio total usando o método de Kjeldahl (AOAC - método 991.20). Cerca de 2 g de amostra foram pesados (Shimatzu AY220, Japão, precisão $\pm 0,1$ mg) e transferidos para o tubo de Kjeldahl. Foram adicionados 7,5 mL de ácido sulfúrico concentrado e 2,5 g de mistura catalítica composta por sulfato de potássio (K_2SO_4) e sulfato de cobre penta hidratado ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$). A amostra foi aquecida em bloco digestor gradativamente até atingir $400^\circ C$. Após a digestão, a amostra foi alcalinizada com cerca de 20 mL hidróxido de sódio (50 % m/m) e destilada. A amônia liberada foi recolhida em 20 mL de ácido bórico a 4% (m/v), em seguida contra titulada e o sal formado foi titulado diretamente com solução de ácido clorídrico $0,1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$. O volume de ácido usado na titulação foi relacionado ao conteúdo N da amostra pela Equação 2.

$$N = \frac{V \times C \times f \times 14}{M_a \times 1000} \times 100 \quad (2)$$

em que, V é o volume da solução de ácido clorídrico gasto na titulação (mL), C a concentração da solução ($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), f o fator de correção da concentração da solução de ácido clorídrico e M_a a massa pesada da amostra (g).

O conteúdo de proteína (Pta) foi obtido utilizando o fator de correção de nitrogênio em proteína de 6,38 para produtos lácteos (INSTITUTO ADOLF LUTZ, 2008), de acordo com a Equação 3.

$$Pta = N \times 6,38 \quad (3)$$

2.2.3 Determinação do conteúdo de lipídeos

Para a análise do teor de gordura pelo método de Gerber, 11 mL de leite foram transferidos para o butirômetro de Gerber, contendo 10 mL de H_2SO_4 concentrado ($1,825 \text{ g/cm}^3$ a $20^\circ C$) e 1 mL de álcool isoamílico. O butirômetro foi então fechado, agitado e

centrifugado a 1200 rpm por 5 minutos em uma centrífuga. O percentual mássico de gordura foi lido diretamente na escala do butirômetro.

2.2.4 Determinação do conteúdo de cinzas

O conteúdo de cinzas foi determinado pelo método gravimétrico por incineração em mufla. Aproximadamente 5 g de amostra foram pesados em cadinho de porcelana previamente preparado. A amostra foi inicialmente carbonizada em chapa aquecedora. Em seguida, o cadinho foi transferido para um forno mufla e aquecido a 550 °C até a obtenção de cinzas brancas ou cinza claro. Após a incineração, o cadinho foi resfriado em dessecador e novamente pesado. O teor de cinzas foi calculado pela diferença de massa antes e após a incineração. Os resultados foram expressos pela Equação 4.

$$Cin = \frac{M_c}{M_a} \times 100 \quad (4)$$

em que, M_a é a massa (g) inicial da amostra e M_c a massa (g) da amostra incinerada.

2.2.5 Determinação do conteúdo de carboidratos totais

O conteúdo de carboidratos totais foi determinado por diferença pela Equação 5.

$$CT = 100 - [\%Gordura + \%Proteína + \%Água + \%Cinzas] \quad (5)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização físico-química do leite *in natura*

A composição química do leite *in natura* de búfala, vaca, cabra e ovelha é apresentada na Tabela 1. Observam-se diferenças significativas entre as espécies quanto aos teores de seus principais constituintes. Essas variações composicionais

podem alterar o comportamento reológico do leite, afetando parâmetros como viscosidade e escoamento. Dessa forma, o conhecimento da composição química é fundamental para compreender as características e o processamento dos leites provenientes de diferentes espécies.

Tabela 1 – Composição química do leite in natura de diferentes espécies

Componente	Búfala	Vaca	Cabra	Ovelha
Proteínas	3,08 ± 0,01 ^b	3,10 ± 0,03 ^b	3,07 ± 0,01 ^b	5,45 ± 0,06 ^a
Gordura	6,93 ± 0,03 ^b	3,35 ± 0,01 ^c	3,09 ± 0,01 ^d	7,40 ± 0,04 ^a
Água	84,65 ± 0,31 ^c	88,12 ± 0,33 ^b	88,54 ± 0,33 ^a	82,02 ± 0,30 ^d
Cinzas	0,72 ± 0,01 ^b	0,68 ± 0,01 ^c	0,68 ± 0,01 ^c	0,87 ± 0,01 ^a
Carboidratos	4,60 ± 0,03 ^{ab}	4,72 ± 0,33 ^a	4,59 ± 0,34 ^{ab}	4,24 ± 0,30 ^b
Sólidos Totais	15,34 ± 0,31 ^b	11,87 ± 0,33 ^c	11,45 ± 0,33 ^d	17,97 ± 0,30 ^a

Letras diferentes na mesma linha, indicam diferença significativa de acordo com a Análise de Variância (ANOVA) ($P < 0,05$) e teste de comparação múltipla de Tukey ($\alpha = 0,05$).

O leite de ovelha apresentou um teor de proteína significativamente maior ($P < 0,05$) em comparação ao leite das outras espécies, com um valor médio 77% superior. Este leite é também a principal fonte de proteína do soro do leite, com uma concentração de 1,02 g/100 g, destacando-se a β -lactoglobulina como a principal proteína do soro. Além disso, o leite de ovelha contém a maior concentração de caseína, 4,18 g/100 g, quando comparado aos demais tipos de leite (MOHAPATRA et al., 2019).

Os teores de proteína dos leites de búfala, vaca e cabra foram semelhantes ($P > 0,05$). Contudo, as frações de caseínas presentes no leite de búfala diferem substancialmente; este leite pode conter até o dobro da α s2-caseína e β -caseína, com menores concentrações de α s1-caseína, em comparação ao leite de vaca (FELIGINI et al., 2009; SHAKERIAN et al., 2016). O leite de cabra, por sua vez, é predominantemente composto por β -caseína, que representa aproximadamente 53% do total de caseínas, enquanto no leite de vaca essa proporção não excede 40% (DELGADO-JÚNIOR, SIQUEIRA, & STOCK, 2020).

Comparando os resultados obtidos com dados da literatura, Souza et al. (2003) relataram teor de proteína de aproximadamente 3,0% para leite bovino in natura, valor ligeiramente inferior ao encontrado neste estudo. Para o leite caprino, Prata et al. (1998) e Chornobai et al. (1999) registraram teores entre 3,27% e 3,34%, valores superiores aos observados na presente pesquisa. Essas diferenças podem estar relacionadas a diversos fatores, como raça dos animais, estágio de lactação, alimentação, condições ambientais, manejo zootécnico e metodologias analíticas empregadas. Para o leite de búfala, Silva (2014) encontrou teor proteico de 3,3%, resultado próximo ao observado neste trabalho para o leite in natura.

Em termos de gordura, o leite de ovelha apresentou maior ($P < 0,05$) teor de lipídios, quando comparado ao leite de outras espécies. Além disso, o leite de ovelha apresenta maior concentração de ácidos graxos insaturados do que o leite de vaca (MOHAPATRA et al., 2019). Entretanto, o leite de búfala apresentou maior ($P < 0,05$) teor lipídico quando comparado ao leite de vaca e cabra. Além do maior teor lipídico, o leite de búfala também apresenta maior diâmetro médio de glóbulos de gordura e maior quantidade de ácidos graxos saturados e ácido linolênico quando comparado ao leite de vaca (MÉNARD et al., 2010).

Vale ressaltar que o leite de ovelha e de búfala apresentou aproximadamente o dobro de lipídeos quando comparado ao leite de cabra e de vaca. Além disso, o leite de cabra apresentou menor ($P < 0,05$) teor lipídico quando comparado ao leite de vaca. Além disso, a proporção de ácidos graxos saturados no leite de cabra (65–75 g/100 g de ácidos graxos totais) é comparável à do leite de vaca. No entanto, o leite de cabra é rico em ácidos graxos de cadeia curta e média com 6 a 10 átomos de carbono, contendo até o dobro do leite de vaca (FELICE et al., 2021; SANZ SAMPELAYO et al., 2007). Em particular, o diâmetro dos glóbulos de gordura no leite de cabra é menor em comparação com o leite bovino (Dos SANTOS et al., 2023).

Para o conteúdo de água, o leite de cabra apresentou o maior ($P < 0,05$) teor de água quando comparado ao leite de outras espécies. No entanto, o leite de vaca apresentou maior ($P < 0,05$) teor de água quando comparado ao leite de búfala e ovelha,

embora o leite de ovelha tenha apresentado o menor ($P < 0,05$) teor de água quando comparado aos demais leites.

O leite é uma fonte significativa de minerais, incluindo magnésio, potássio, cálcio, iodo, fósforo, cloreto, sódio e pequenas quantidades de ferro (MOHAPATRA et al., 2019). O teor de cinzas fornece informações prévias sobre a quantidade total de minerais normalmente presentes nos alimentos. O leite de ovelha apresentou maior ($P < 0,05$) teor de cinzas quando comparado ao leite de outras espécies. O conteúdo de minerais como cálcio (Ca), fósforo (P), ferro (Fe) e magnésio (Mg) no leite de ovelha é maior do que no leite de vaca (PARK et al., 2007). O leite de búfala apresentou maior ($P < 0,05$) teor de cinzas, quando comparado ao leite de vaca e cabra. Entretanto, os leites de vaca e de cabra apresentaram teores de cinzas semelhantes ($P > 0,05$). O teor de cálcio e a relação Ca/P detectados no leite de búfala foram consideravelmente maiores em comparação ao leite de vaca (SHAKERIAN et al., 2016). Além das concentrações variáveis de minerais no leite de cada espécie, o tratamento térmico do leite também pode afetar a forma como esses minerais - especialmente cálcio e fósforo - são distribuídos entre as fases aquosa e coloidal (KILIC-AKYILMAZ et al., 2022).

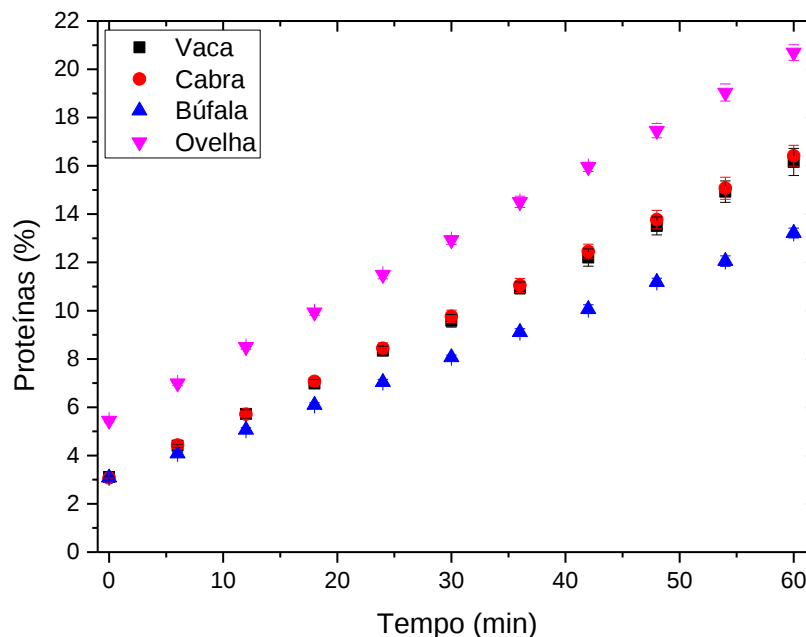
Para o teor de carboidratos, o leite de ovelha apresentou o menor conteúdo ($P < 0,05$) em comparação ao leite de vaca. Os teores de carboidratos foram semelhantes ($P > 0,05$) entre os leites de búfala, cabra e ovelha, com os leites de búfala e cabra também apresentando níveis semelhantes ($P > 0,05$). No que diz respeito aos sólidos totais, o leite de ovelha exibiu o maior teor ($P < 0,05$) em comparação aos outros leites. O leite de búfala também apresentou um teor de sólidos maior ($P < 0,05$) do que o leite de vaca e cabra, sendo o leite de cabra o que apresentou o menor teor ($P < 0,05$) de sólidos em comparação ao leite de vaca.

3.2 Caracterização físico-química do leite concentrado

O leite concentrado é o produto resultante da desidratação parcial em vácuo do leite fluído acompanhada de refrigeração (BRASIL, 1952). As mudanças que ocorrem pela retirada de água na concentração do leite são observadas nas suas propriedades físicas e químicas, e o entendimento dessas alterações ajudam em aplicações

tecnológicas e de engenharia. A Figura 1 apresenta o teor de proteínas dos leites de diferentes espécies em função do tempo de concentração.

Figura 1 – Conteúdo de proteínas em função do tempo de concentração

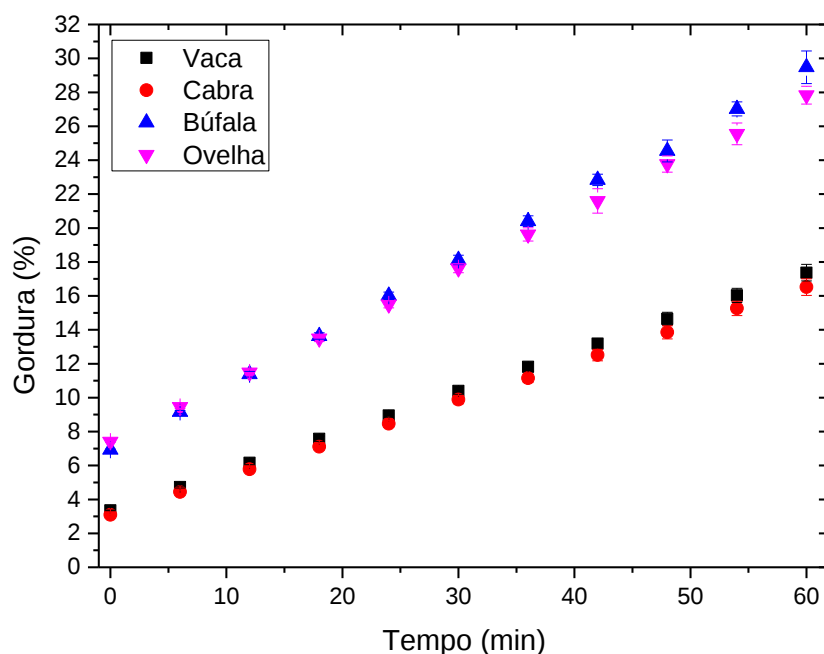


Observou-se um aumento no conteúdo de proteínas com o tempo de concentração para todos os tipos de leite, variando de $3,07 \pm 0,01\%$ para $20,69 \pm 0,32\%$. O leite de ovelha apresentou o maior aumento, com teores variando de $5,45 \pm 0,06\%$ a $20,69 \pm 0,32\%$, e quantidades de proteínas superiores em comparação com os demais leites. Os leites de vaca e cabra mostraram aumentos semelhantes, com teores variando de $3,10 \pm 0,03\%$ a $16,16 \pm 0,56\%$ e de $3,07 \pm 0,01\%$ a $16,41 \pm 0,43\%$, respectivamente. Por outro lado, o leite de búfala apresentou um aumento de $3,08 \pm 0,01\%$ a $13,21 \pm 0,20\%$, com menores quantidades de proteínas em comparação aos leites de vaca, cabra e ovelha. O leite de ovelha, com seu elevado teor de proteínas, destaca-se especialmente na produção de alimentos que requerem altos níveis desse nutriente, como queijos curados e iogurtes enriquecidos com proteínas (DEVITIIS et al., 2023). Esse perfil proteico não só melhora a qualidade e a consistência desses produtos, mas também os torna altamente competitivos no mercado, alinhando-os com as tendências de consumo que valorizam produtos ricos em proteínas.

Além da sua importância nutricional, o teor de proteínas exerce influência direta sobre as propriedades físico-químicas e tecnológicas do leite. As proteínas contribuem significativamente para a composição dos sólidos totais, uma vez que aproximadamente metade desses sólidos é constituída por proteínas solúveis, lactose e sais minerais (PACHECO et al., 2005). Dessa forma, o aumento da concentração proteica durante o processo de evaporação reflete não apenas no incremento dos sólidos totais, mas também em propriedades como viscosidade, estabilidade coloidal, capacidade de retenção de água e rendimento industrial. Consequentemente, o conhecimento das variações do teor de proteínas durante a concentração é fundamental para a otimização de processos industriais e para o desenvolvimento de produtos lácteos com características nutricionais e tecnológicas diferenciadas.

O gráfico da Figura 2 apresenta o conteúdo de gordura em função do tempo de concentração.

Figura 2 – Conteúdo de gordura em função do tempo de concentração



Observa-se que o conteúdo de gordura aumentou com o tempo de concentração para todos os tipos de leite, variando de $3,09 \pm 0,01\%$ a $29,48 \pm 0,96\%$. O leite de búfala e o leite de ovelha apresentaram maiores quantidades de gordura em comparação com

o leite de vaca e o de cabra, com teores variando de $6,93 \pm 0,03\%$ a $29,48 \pm 0,96\%$ e de $7,40 \pm 0,04\%$ a $27,83 \pm 0,52\%$, respectivamente. A partir de 42 minutos, observaram-se pequenas diferenças no comportamento, com o leite de búfala mostrando um maior conteúdo de gordura em relação aos outros leites. Em contraste, os leites de vaca e cabra apresentaram resultados semelhantes e menores quantidades de gordura, variando de $3,35 \pm 0,01\%$ a $17,37 \pm 0,48\%$ e de $3,09 \pm 0,01\%$ a $16,51 \pm 0,48\%$, respectivamente.

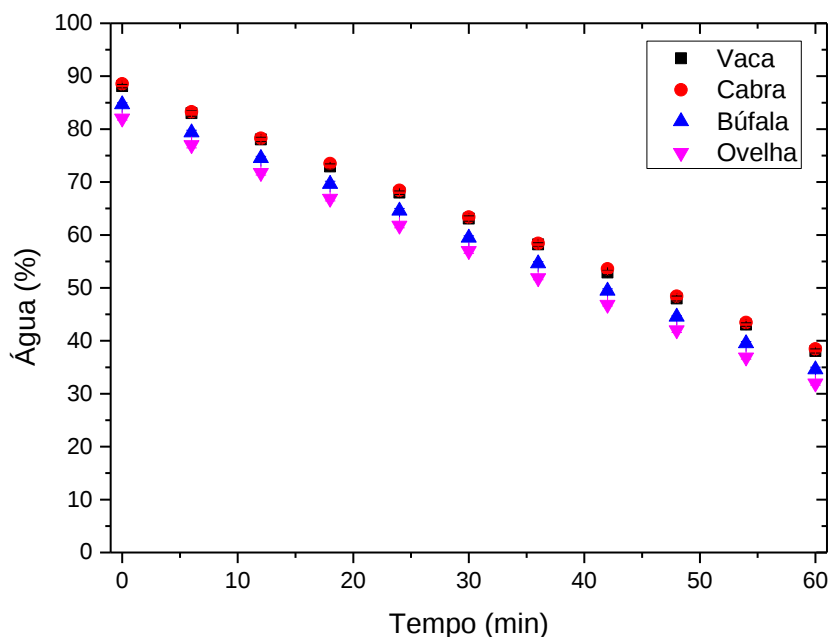
As diferenças significativas no teor de gordura entre os diversos tipos de leite durante o processo de concentração têm implicações importantes para a tecnologia de alimentos. A variação no teor de gordura influencia diretamente as propriedades físico-químicas e sensoriais dos produtos lácteos, como textura, consistência e sabor (SOUZA et al., 2021).

Leites com maior teor de gordura, como o de búfala e ovelha, são ideais para a produção de produtos cremosos, como queijos especiais e manteigas, que demandam um perfil de gordura mais elevado para atender às expectativas de sabor e textura dos consumidores. Por outro lado, leites com menor teor de gordura, como os de vaca e cabra, podem ser utilizados em produtos nos quais um perfil lipídico reduzido é desejável, como leites semidesnatados e desnatados, iogurtes com baixo teor de gordura, bebidas lácteas fermentadas, leites evaporados, queijos frescos (como ricota, cottage e minas frescal) e sobremesas lácteas light, atendendo à demanda por alimentos com menor conteúdo de gordura sem comprometer a qualidade nutricional e tecnológica.

Essas diferenças proporcionam oportunidades para o desenvolvimento de produtos inovadores que atendam às necessidades específicas do mercado e às preferências dos consumidores. A diversidade na composição dos diferentes tipos de leite permite a obtenção de produtos com características sensoriais, nutricionais e tecnológicas distintas, ampliando as possibilidades de aplicação industrial. Além disso, as variações nos teores de proteínas, lipídios e minerais influenciam o processamento e a qualidade dos derivados lácteos, favorecendo a produção de alimentos com maior valor agregado e contribuindo para a diversificação e a competitividade da indústria de laticínios.

O gráfico da Figura 3 apresenta o conteúdo de água em função do tempo de concentração.

Figura 3 – Conteúdo de água em função do tempo de concentração



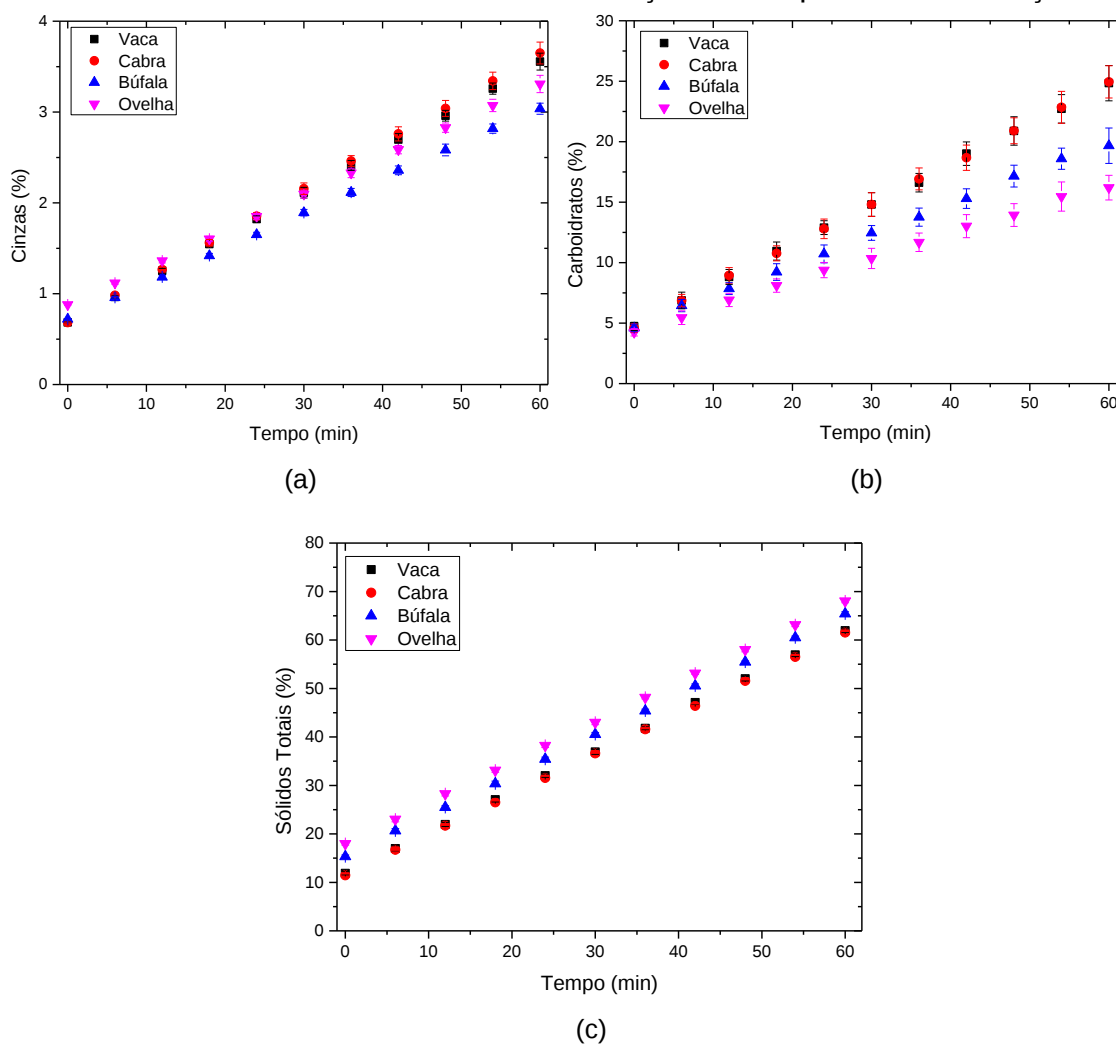
Observa-se que o conteúdo de água diminuiu com o tempo de concentração para todos os tipos de leite, reduzindo de $88,54 \pm 0,33\%$ para aproximadamente $31,96 \pm 0,34\%$. Os leites de vaca e cabra apresentaram comportamentos semelhantes, com a redução da quantidade de água variando de $88,12 \pm 0,33\%$ a $38,07 \pm 0,38\%$ e de $88,54 \pm 0,33\%$ a $38,46 \pm 0,38\%$, respectivamente. O leite de búfala apresentou um menor conteúdo de água em comparação com o leite de vaca e de cabra. No entanto, o leite de ovelha mostrou uma redução mais acentuada, de $82,02 \pm 0,30\%$ para $31,96 \pm 0,34\%$, resultando em menores quantidades de água em comparação com os demais leites.

A capacidade de retenção ou remoção de água está relacionada à composição do leite (teores de proteínas, gordura, lactose e sais minerais) e influencia propriedades como viscosidade, estabilidade e comportamento térmico. O conhecimento dessas características permite selecionar a matéria-prima mais adequada para cada processo, otimizar as condições operacionais e desenvolver produtos com melhor rendimento, qualidade sensorial e estabilidade. Uma maior retenção de água é desejável em produtos que necessitam de elevada umidade e textura cremosa, enquanto uma maior facilidade de remoção de água é vantajosa em processos de concentração e secagem, reduzindo custos energéticos e aumentando a eficiência industrial. Essas características são

fundamentais para a otimização dos processos e para a obtenção de produtos lácteos com qualidade superior.

A Figura 4 apresenta os conteúdos de (a) cinzas, (b) carboidratos e (c) sólidos totais dos leites de vaca, cabra, búfala e ovelha em função do tempo de concentração.

Figura 4 – Conteúdos de (a) cinzas, (b) carboidratos e (c) sólidos totais dos leites de vaca, cabra, búfala e ovelha em função do tempo de concentração



Quanto ao conteúdo de cinzas, que reflete a quantidade de minerais presentes no leite, observou-se um aumento com o tempo de concentração para todos os tipos de leite. O leite de cabra apresentou o maior conteúdo de cinzas a partir do 5º estágio, variando de $0,68 \pm 0,01\%$ a $3,64 \pm 0,12\%$, similar ao leite de vaca, que variou de $0,68 \pm$

0,01% a $3,55 \pm 0,09\%$. O leite de búfala apresentou valores entre $0,72 \pm 0,01\%$ e $3,03 \pm 0,06\%$, abaixo dos valores observados para os leites de cabra e vaca. O leite de ovelha mostrou os menores conteúdos de cinzas, variando de $0,87 \pm 0,01\%$ a $3,30 \pm 0,09\%$. Verruma e Salgado (1994) relataram um valor de 0,82% de cinzas para leite de búfala in natura.

A lactose é um dos nutrientes mais estáveis na composição química do leite (GONZALEZ et al., 2001). Observou-se que o conteúdo de carboidratos aumentou com o tempo de concentração para todos os leites. Os leites de vaca e cabra apresentaram os maiores conteúdos de carboidratos, com valores variando de $4,72 \pm 0,33\%$ a $24,83 \pm 1,45\%$ e de $4,59 \pm 0,34\%$ a $24,94 \pm 1,33\%$, respectivamente. O leite de búfala apresentou uma variação de $4,60 \pm 0,31\%$ a $19,66 \pm 1,46\%$, ficando abaixo dos leites de vaca e cabra. O leite de ovelha apresentou os menores conteúdos de carboidratos entre os leites estudados, variando de $4,24 \pm 0,30\%$ a $16,20 \pm 1,01\%$. Gonzalez et al. (2004) encontraram uma média de 4,4% de carboidratos em leite bovino, valor inferior ao obtido neste estudo. Queiroga (1995) encontrou uma média de 4,20% de carboidratos no leite caprino. Segundo Park et al. (2007), o leite de cabra tem um teor médio de carboidratos de 4,1%, inferior ao do leite de ovelha (4,9%), vaca (4,7%) e humano (6,9%).

Em relação aos sólidos totais, quanto maior o teor, melhor é o rendimento do leite para a indústria de laticínios. Observou-se que os valores de sólidos totais aumentaram com o tempo de concentração, variando de $11,45 \pm 0,33\%$ a $68,03 \pm 0,34\%$. O leite de ovelha apresentou os maiores teores de sólidos totais em comparação com os demais leites, variando de $17,97 \pm 0,30\%$ a $68,03 \pm 0,34\%$, seguido pelo leite de búfala, que variou de $15,34 \pm 0,31\%$ a $65,40 \pm 0,41\%$. Os leites de vaca e cabra mostraram comportamentos semelhantes, com variações de $11,87 \pm 0,33\%$ a $61,92 \pm 0,38\%$ e de $11,45 \pm 0,33\%$ a $61,53 \pm 0,38\%$, respectivamente. O leite de cabra apresentou os menores teores de sólidos totais neste estudo. Costa (2014) relatou que o leite concentrado de vaca apresentou sólidos totais variando de 16% a 34%. Silva (2014) encontrou 17,23% de sólidos totais para o leite de búfala in natura.

Do ponto de vista tecnológico, o alto teor de lipídios e proteínas presentes nos leites *in natura* e concentrados, principalmente os de ovelha e de búfala reforçam o fato de que essas matérias-primas são interessantes para a produção de uma grande

variedade de produtos como queijos, leite condensado, leite em pó, iogurtes, sorvetes, cremes, manteiga, entre outros. Além disso, a utilização destas diferentes matérias-primas pode não só contribuir para a diversificação, mas também aumentar o rendimento destes produtos devido ao maior teor de sólidos totais, melhorando potencialmente os retornos econômicos para as indústrias lácteas. No entanto, o processamento industrial principalmente de leites concentrados de cabra, búfala e ovelha ainda carece de informações importantes sobre como o processo de concentração pode afetar o comportamento reológico dessas diferentes matérias-primas, limitando o projeto adequado e eficiente de processos industriais apropriados.

4 CONCLUSÕES

Concluiu-se que o leite in natura de búfala e ovelha possuem níveis mais altos de gordura, cinzas e sólidos totais quando comparado ao leite de vaca e cabra. Além disso, o leite de ovelha tem o maior teor de proteína, quando comparado às outras espécies. Entretanto, apenas os leites de vaca e ovelha são diferentes em termos de carboidratos, sendo maior no leite de vaca.

Após o processo de concentração, todos os tipos de leite mostraram aumento na composição química, com os leites concentrados atingindo cerca de 20% de proteínas, 30% de gordura, 4% de cinzas, 25% de carboidratos e 68% de sólidos totais, e redução de até 32% de água. Os leites concentrados de búfala e de ovelha são mais ricos em proteínas e gorduras, com o leite de ovelha sendo o mais proteico. Os leites concentrados de cabra e vaca têm níveis de proteínas semelhantes, enquanto os de búfala e ovelha possuem níveis de gordura mais elevados. Os leites concentrados de vaca e cabra, por outro lado, são caracterizados por maiores quantidades de cinzas e carboidratos, e menores quantidades de água e sólidos totais em comparação com os leites concentrados de búfala e ovelha.

As diferenças na composição química dos leites de búfala, vaca, cabra e ovelha reforçam o fato de que essas matérias-primas são interessantes para a produção de uma grande variedade de produtos lácteos. Sendo assim, os impactos do processo de concentração sobre a composição química dos diferentes leites estudados, são

fundamentais para a engenharia de processos, criando um banco de dados importante e preciso para os leites concentrados, visando diversas aplicações.

REFERÊNCIAS

ABDULWAHID JABER, A. F. (2022). Evaluation of different chemical and physical components of milk in cows, buffalos, sheep, and goats. **Archives of Razi Institute**, 77(1), 477–481. <https://doi.org/10.22092/ARI.2021.356861.1932>

BRASIL. (1952). **Regulamento da inspeção industrial e sanitária de produtos de origem animal (Riispoa)**. Rio de Janeiro, RJ.

CHORNOBAI, C. A., DAMASCENO, J. C., VISENTAINER, J. V., SOUZA, N. E. (1999). Physical-chemical composition of in nature goat milk from cross Saanen throughout lactation period. **Archivos Latinoamericanos de Nutrición**, 49(3), 283-286.

COSTA, A. R. (2014). **Propriedades termofísicas, reológicas e interfaces de leite e soro bovinos concentrados em evaporador a vácuo** (Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa).

DELGADO-JÚNIOR, I. J., SIQUEIRA, K. B., STOCK, L. A. (2020). **Produção, composição e processamento de leite de cabra no Brasil**. Embrapa.

DEVITIIS, B., et al. (2023). Aceitação do consumidor por iogurte à base de leite de ovelha — Evidências de uma grande amostra de consumidores italianos. **Journal of Dairy Science**, 106(12), 8469-8478.

Dos SANTOS, W. M., GUIMARÃES GOMES, A. C., DE CALDAS NOBRE, M. S., DE SOUZA PEREIRA, Á. M., DOS SANTOS PEREIRA, E. V., DOS SANTOS, K. M. O., FLORENTINO, E. R., ALONSO BURITi, F. C. (2023). Goat milk as a natural source of bioactive compounds and strategies to enhance the amount of these beneficial components. **International Dairy Journal**, 137, 105515. <https://doi.org/10.1016/J.IDAIRYJ.2022.105515>

FAO - **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 2025. Disponível em: <<http://www.fao.org/corp/statistics/es/>>. Acesso em: 15 mar. 2026.

FELIGINI, M., BONIZZI, I., BUFFONI, J. N., COSENZA, G., RAMUNNO, L. (2009). Identification and quantification of α S1, α S2, β , and κ -caseins in water buffalo milk by reverse phase-high performance liquid chromatography and mass spectrometry. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 57(7), 2988–2992.

GONZALEZ, H. L., et al. (2004). Avaliação da qualidade do leite na bacia leiteira de Pelotas, RS: Efeito dos meses do ano. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 33(6), 1531-1543.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agro 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/leite/br>. Acesso em: 18 abr. 2024.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos Físico-Químicos para Análise de Alimentos**. 4a. Edição. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020p.

KILIC-AKYILMAZ, M., et al. (2022). Effect of heat treatment on micronutrients, fatty acids and some bioactive components of milk. **International Dairy Journal**, 126, 105-231.

MELO MOREIRA, L. DA S., DOS SANTOS, L. F., CASTRO, L. S. E., NASCIMENTO, W. W. G., BALZAN, M. M., WAGNER, R., SIMIQUELI, A. A., DE JESUS FILHO, M. (2024). UHT A2 milks marketed in Brazil: Physicochemical and electrical characterization, rheological behavior and fatty acid profile. **Journal of Food Composition and Analysis**, 136, 106711. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106711>

MÉNARD, O., AHMAD, S., ROUSSEAU, F., BRIARD-BION, V., GAUCHERON, F., LOPEZ, C. (2010). Buffalo vs. cow milk fat globules: Size distribution, zeta-potential, compositions in total fatty acids and in polar lipids from the milk fat globule membrane. **Food Chemistry**, 120(2), 544–551.

MOHAPATRA, A., SHINDE, A. K., SINGH, R. (2019). Sheep milk: A pertinent functional food. **Small Ruminant Research**, 181, 6-11.

PACHECO, M. T. B. et al. Propriedades funcionais de hidrolisados obtidos a partir de concentrados proteicos de soro de leite. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 25, n. 2, p. 333-338, 2005.

PARK, Y. W., et al. (2007). Physico-chemical characteristics of goat and sheep milk. **Small Ruminant Research**, 68, 88-113.

PÉREZ NÚÑEZ, I., DÍAZ, R., QUIÑONES, J., MARTÍNEZ, A., VELÁZQUEZ, L., HUAQUIPÁN, R., TAPIA, D., MUÑOZ, A., VALDÉS, M., SEPÚLVEDA, N., PAZ, E. (2024). Molecular characteristics and processing technologies of dairy products from non-traditional species. **Molecules**, 29(22), 5427.
<https://doi.org/10.3390/molecules29225427>

PRATA, L. F. et al. Composição, perfil nitrogenado e características do leite caprino (Saanen). Região Sudeste, Brasil. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 18, n. 4, p. 428-432, 1998.

QUEIROGA, R. C. R. E. (1995). **Características físicas, químicas e condições higiênico-sanitárias do leite de cabras mestiças no Brejo Paraibano** (Dissertação de mestrado). Universidade Federal da Paraíba.

ROSA, E., PRUDENCIO, E. S. (2023). A comprehensive approach about comparison between drying technologies and powdered dairy products. **Food Research International**, 173, 113326. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113326>

SANZ SAMPELAYO, M. R., et al. (2007). Influência do tipo de dieta nos constituintes da gordura do leite de cabra e ovelha. **Small Ruminant Research**, 68(1-2), 42-63.

SHAKERIAN, M., KIANI, H., HSANI, M.-R. (2016). Effect of buffalo milk on the yield and composition of buffalo feta cheese at various processing parameters. **Food Bioscience**, 15, 110-117.

SILVA, L. T. da. S. (2014). **Propriedades termofísicas e comportamento reológico do leite e do soro de búfala (Dissertação de mestrado)**. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia.

SOUZA, L. G., SANTOS, G. T., DAMASCENO, J. C., MATSUSHITA, M., SAKAGUTI, E. S., RIBAS, N. P., VILLALBA, R. G. (2003). Avaliação da composição e do perfil de ácidos graxos do leite de vaca cru e pasteurizado em minilaticínios. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, 25(2), 331-337.

SOUZA, W. F. C., DO AMARAL, C. R. S., BERNARDINO, P. D. L. S. (2021). The addition of skim milk powder and dairy cream influences the physicochemical properties and the sensory acceptance of concentrated Greek-style yogurt. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, 24(7), 100349.

VERRUMA, M. R., SALGADO, J. M. (1994). Análise química do leite de búfala em comparação ao leite de vaca. **Scientia Agricola**, 51(1), 131-136.

6 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DO LEITE DE VACA, CABRA, BÚFALA E OVELHA: IMPLICAÇÕES PARA O PROCESSAMENTO TÉRMICO E O PROJETO DE PROCESSOS

Artigo de Pesquisa

Será elaborada uma versão em inglês para submissão ao periódico “*Journal of Food Process Engineering*”.

Alexsander Saves dos Santos¹, Clebertyanne da Silva Carvalho¹, Beatriz Hebler Pansiera Gonsales¹, Halissom Clever Sanches¹, Marcio Augusto Ribeiro-Sanches^{1*}, Javier Telis-Romero¹

¹Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas (Ibilce), Campus São José do Rio Preto, São Paulo, 15054-000, Brasil.

*Autor a quem a correspondência pode ser endereçada. E-mail: mar.sanches@unesp.br (Márcio Augusto Ribeiro Sanches).

RESUMO

As propriedades termofísicas são fundamentais para o projeto e a otimização dos processos térmicos na indústria de laticínios, pois influenciam os balanços de massa e energia e a eficiência da transferência de calor durante o processamento. Este estudo tem como objetivo avaliar as propriedades termofísicas do leite de vaca, cabra, búfala e ovelha *in natura* em uma ampla faixa de temperatura (1°C–90°C), considerando sua composição química. Foram determinadas a densidade (ρ), calor específico (c_p), condutividade (λ) e difusividade térmica (α). A influência da temperatura foi avaliada ajustando equações empíricas (1, 2 e 3°) comumente aplicadas para modelar propriedades termofísicas de alimentos. De modo geral, o calor específico, a condutividade térmica e a difusividade térmica aumentaram com a elevação da

temperatura, enquanto a densidade apresentou comportamento inverso. Os leites de vaca e cabra exibiram valores mais elevados dessas propriedades em comparação aos leites de búfala e ovelha, o que pode ser atribuído principalmente às diferenças na composição, especialmente no teor de gordura e na fração aquosa. As variações observadas foram adequadamente descritas por modelos matemáticos, sendo as funções polinomiais de segunda ordem as mais representativas para a maioria das propriedades. Os resultados ampliam o conhecimento sobre o comportamento termofísico dos leites e apoiam o desenvolvimento de modelos e processos térmicos mais eficientes.

Palavras-chave: leite *in natura*; densidade; calor específico; condutividade térmica; difusividade térmica; modelagem matemática.

1 INTRODUÇÃO

O leite é um dos alimentos mais consumidos mundialmente e constitui a base de uma ampla variedade de produtos lácteos, como queijos, leites fermentados, manteiga, cremes, iogurtes e produtos concentrados ou desidratados. Embora o leite de vaca represente a maior parcela da produção global, os leites de búfala, cabra e ovelha desempenham papel relevante em diversas regiões, especialmente onde condições climáticas, culturais e nutricionais favorecem seu consumo. Dados recentes indicam que o leite de vaca corresponde a aproximadamente 80% da produção mundial, seguido pelo leite de búfala, cabra e ovelha, cuja participação tem crescido nos últimos anos (FAO, 2025). Esse aumento está associado ao maior interesse por produtos lácteos diferenciados e aos reconhecidos benefícios nutricionais desses leites não bovinos (BITTANTE et al., 2022; FELICE et al., 2021; PAPPA et al., 2022; SANCHES et al., 2025; TERZIOĞLU et al., 2023) bem como ao seu potencial para diversificação e agregação de valor na indústria de laticínios.

A composição química do leite varia significativamente não apenas entre raças dentro de uma mesma espécie, mas também entre diferentes espécies animais (Sanches et al., 2025), afetando de forma direta suas propriedades físico-químicas e funcionais.

Estudos relatam que o leite de ovelha apresenta maiores teores de gordura, proteína, sólidos totais e caseína quando comparado aos leites de vaca, cabra e búfala (BALTHAZAR et al., 2017; PIETRZAK-FIEĆKO et al., 2020), enquanto o leite de cabra se distingue pela composição de ácidos graxos e pela estrutura da fração proteica (NGUYEN et al., 2018). O leite de búfala, por sua vez, caracteriza-se por elevado teor de gordura e por diferenças marcantes na composição lipídica em relação ao leite bovino (MEJARES et al., 2022). Essas variações composicionais afetam não apenas a qualidade nutricional, mas também as propriedades de transporte dos leites, como densidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica.

As propriedades termofísicas desempenham papel fundamental no projeto, na modelagem e na otimização de operações térmicas na indústria de laticínios, incluindo pasteurização, esterilização, aquecimento, resfriamento, evaporação e secagem. Propriedades como densidade e calor específico influenciam diretamente os balanços de massa e energia, enquanto a condutividade e a difusividade térmica influenciam os mecanismos de transferência de calor (EVANGELISTA et al., 2020; RIBEIRO-SANCHES et al., 2025). Apesar de sua relevância, dados termofísicos e dependentes da temperatura ainda são limitados para leites não bovinos, especialmente quando considerados em uma ampla faixa de temperatura típica de processos industriais.

Embora a literatura recente disponha de informações detalhadas sobre o comportamento reológico do leite de vaca, cabra, búfala e ovelha em uma ampla faixa de temperatura (1–90 °C) (SANCHES et al., 2025), observa-se uma lacuna significativa no que se refere às propriedades termofísicas avaliadas sob as mesmas condições térmicas. A maioria dos estudos disponíveis aborda propriedades termofísicas do leite de vaca (AL-HILPHY e HAIDER, 2013; MINIM et al., 2002; REDDY e DATTA, 1994), o que limita sua aplicação no dimensionamento e na simulação de processos industriais que operam sob regimes térmicos variados. Como consequência, valores médios ou dados do leite de vaca são frequentemente utilizados como aproximação para outros tipos de leite, o que pode introduzir incertezas relevantes no projeto de equipamentos e na estimativa de demandas energéticas.

Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivos: (a) determinar as propriedades termofísicas — densidade, calor específico, condutividade térmica e

difusividade térmica dos leites de vaca, cabra, búfala e ovelha em uma ampla faixa de temperatura (1 a 90 °C); b) ajustar equações empíricas aos dados experimentais para obter equações preditivas para as propriedades estudadas, bem como apresentar a dependência de cada propriedade com a temperatura.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Amostras de leite

Amostras de leite ($n = 5$ por espécie: vaca, búfala, cabra e ovelha) foram coletadas em dias diferentes na Fazenda Santa Mônica, localizada em Jaborandi, Estado de São Paulo, Brasil (20°41'16" S, 48°24'46" W; altitude 493 m). As amostras foram coletadas do tanque a granel após a ordenha matinal, que seguiu uma rotina diária de ordenha. Cada espécie era representada por uma única raça leiteira comumente usada no Brasil: Girolando (vacas), Mediterrâneo (búfalos), Saanen (cabras) e Lacaune (ovelhas). A fazenda opera sob um sistema de produção semi-intensivo, com animais criados em pastagem e complementados com ração concentrada.

Em cada dia de coleta, 1 L de leite cru foi obtido de cada espécie, totalizando 20 amostras. Após a ordenha, as amostras eram imediatamente refrigeradas a 4°C–7°C e armazenadas em garrafas de vidro pré-limpas e esterilizadas. As amostras foram então transportadas sob refrigeração e analisadas no Laboratório de Medições Físicas da Universidade Estadual Paulista - UNESP, São José do Rio Preto/SP, onde foram armazenadas a 5°C $\pm$ 1°C até a análise. Todas as análises foram realizadas em triplicata dentro de 48 horas para preservar as características originais do leite cru.

2.2 Caracterização química do leite

A composição centesimal dos leites foi avaliada por meio de procedimentos analíticos padronizados. Os sólidos totais foram determinados gravimetricamente pela secagem das amostras a 105 $\pm$ 2 °C até peso constante (IAL, 2008; método 012/IV). O teor de proteína foi analisado pelo método de Kjeldahl (AOAC, 2005; método 991.20),

enquanto o teor de lipídios foi determinado pelo método de Gerber (AOAC, 2005; método 2000.18). O teor de cinzas foi quantificado por incineração em mufla (AOAC, 2005; método 935.42). O teor de carboidratos foi calculado por diferença.

2.3 Determinação das propriedades termofísicas

As propriedades termofísicas dos leites de vaca, cabra, búfala e ovelha, incluindo densidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica, foram determinadas em triplicata nas temperaturas de 1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90 °C.

2.3.1 Densidade

A densidade do leite foi determinada utilizando um densímetro digital (Anton Paar, modelo DMA 4500 M, Áustria). O equipamento possui dois termômetros de platina Pt 100 integrados, que garantem um controle de temperatura de alta precisão (0,01 K). Previamente às análises, o equipamento foi calibrado com água deionizada. Alíquotas de aproximadamente 2 mL foram analisadas. As leituras de densidade, com incerteza experimental de 0,1 kg/m³, foram realizadas somente após a completa estabilização térmica em cada temperatura programada. Todas as medições foram registradas em computador por meio de um sistema de aquisição de dados.

2.3.2 Calor específico

O calor específico (c_p) dos leites foi determinada via calorimetria exploratória de varredura (modelo DSC 8000, Perkin Elmer, EUA), fundamentada no método padrão ASTM E1269 para sólidos e líquidos termicamente estáveis (MARTINS et al., 2021). O instrumento foi calibrado previamente com índio (ponto de fusão de 429,75 K e $\Delta H_f = 28,45$ kJ/kg) sob uma taxa de aquecimento de 10 K/min, utilizando nitrogênio (99,5% de pureza) como gás de purga com fluxo de 20 mL/min. Discos de safira com 3 mm de diâmetro (ref. 0219-1268, Perkin Elmer) foram utilizados como padrão para a calibração do fluxo de calor (ARCHER, 1993). Alíquotas de aproximadamente 5 μ L foram

acondicionadas em cadinhos de alumínio (ref. 0219-0062, Perkin Elmer), os quais foram hermeticamente selados e pesados antes e após os ensaios para assegurar que a variação de massa fosse inferior a 3%. A linha de base, o material de referência e as amostras foram submetidos ao mesmo protocolo térmico que, seguindo a norma ASTM E1269, consistiu em uma etapa isotérmica a 274,15 K por 4 minutos, seguida de aquecimento a 10 Kmin⁻¹ até 363,15 K, permanecendo em isoterma final por mais 4 minutos. Os dados térmicos foram processados no software Pyris 11.0, e os valores de c_p , com incerteza de 0,001 kJ·kg⁻¹·K⁻¹, foram obtidos conforme a Equação (1):

$$C_p = \frac{D_s}{W_s \cdot \theta} \quad (1)$$

onde c_p é o calor específico (kJ·kg⁻¹·K⁻¹); D_s é o deslocamento vertical entre as curvas térmicas da amostra e da safira em uma determinada temperatura (mW); W_s é a massa da amostra (mg); e θ é o fluxo de calor (K·s⁻¹).

2.3.3 Condutividade térmica

A condutividade térmica (λ) do leite foi determinada utilizando a técnica de estado estacionário em uma célula de cilindros coaxiais. O aparato experimental, baseado no projeto de Martins et al. (2021), consistiu em uma célula cilíndrica de aço inoxidável contendo uma resistência térmica interna responsável por fornecer um fluxo de calor uniforme. As amostras foram acondicionadas no espaço anular entre os cilindros interno e externo (com 9,8 cm de diâmetro interno, 12,2 cm de diâmetro externo e 106 cm de comprimento). Para garantir a unidimensionalidade do fluxo de calor e minimizar perdas axiais, as extremidades foram isoladas com rolhas de Teflon. O aparato foi imerso em um banho termostático (modelo MA-184, Marconi, São Paulo, Brasil) para controle da temperatura na superfície. A potência dissipada pela resistência foi ajustada por uma fonte de alimentação DC (modelo MPS-3006D, Minipa, São Paulo, Brasil) com estabilidade de 0,05%. O monitoramento térmico foi realizado por termopares do Tipo J

fixados nas superfícies dos cilindros, conectados a um registrador de dados NI 9213 e ao software LabVIEW (National Instruments, Austin, TX). Após o estabelecimento do regime permanente de condução, a condutividade térmica, com incerteza experimental 0,001 Wm⁻¹K⁻¹, foi calculada pela equação de Fourier em coordenadas cilíndricas (Equação 2):

$$\lambda = q \frac{\log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi l(T_1 - T_2)} \quad (2)$$

onde λ é a condutividade térmica (W·m⁻¹·K⁻¹); q é o fluxo de calor dissipado na resistência (W); r_1 e r_2 são os raios externos e interno do espaço anular (m), respectivamente; l é o comprimento útil da célula (m); T_1 é a temperatura da superfície do cilindro interno (K); e T_2 é a temperatura da superfície do cilindro externo (K).

2.3.4 Difusividade térmica

A difusividade térmica (α) do leite foi obtida por meio da correlação entre a condutividade térmica, a densidade e o calor específico, conforme estabelecido pela Equação 3.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho} \cdot C_p \quad (3)$$

onde α é a difusividade térmica (m²s⁻¹), λ é a condutividade térmica (Wm⁻¹K⁻¹), ρ é a densidade (kgm⁻³) e c_p é o calor específico (Jkg⁻¹K⁻¹).

2.3.5 Modelagem dos dados

Os dados experimentais de densidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica foram ajustados a modelos polinomiais de primeiro, segundo e terceiro grau (Equação 4), por apresentarem boa versatilidade e precisão em estudos anteriores (MARTINS et al., 2021, 2023; RIBEIRO-SANCHES et al., 2025). O melhor

modelo escolhido para representar os dados experimentais foi definido com base na significância ($p_{\text{valor}} < 0,05$) dos parâmetros que acompanham a temperatura. O software STATISTICA 7.0 foi usado para realizar a análise da variância com 95% de confiança, bem como para realizar regressões matemáticas.

$$\phi = \beta_1 + \beta_2 \cdot T + \beta_3 \cdot T^2 + \beta_4 \cdot T^3 \quad (4)$$

onde β_1 , β_2 , β_3 , β_4 , γ_1 , γ_2 , a , b são parâmetros do modelo, T é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$), ϕ refere-se à propriedade estudada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização química

A composição química dos leites cru de vaca, cabra, búfala e ovelha está apresentada na Tabela 1. Foram observadas diferenças significativas entre as espécies, principalmente nos teores de sólidos totais, gordura, proteínas e cinzas. Essas variações influenciam diretamente as propriedades termofísicas dos leites, como densidade, condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico, sendo seus efeitos mais evidentes durante processos de aquecimento, nas quais alterações na composição refletem-se de forma mais pronunciada nas respostas térmicas do sistema.

Tabela 1 – Composição química do leite de diferentes espécies (g·100 g⁻¹ de amostra)

Componente	Vaca	Cabra	Búfala	Ovelha
Lipídios	3.39 ± 0.01 ^c	3.08 ± 0.02 ^d	6.91 ± 0.05 ^b	7.44 ± 0.05 ^a
Proteínas	3.11 ± 0.02 ^b	3.07 ± 0.02 ^c	3.11 ± 0.02 ^b	5.47 ± 0.03 ^a
Cinzas	0.69 ± 0.01 ^c	0.69 ± 0.01 ^c	0.73 ± 0.01 ^b	0.89 ± 0.01 ^a
Carboidratos	4.57 ± 0.03 ^a	4.47 ± 0.04 ^b	4.48 ± 0.04 ^b	4.15 ± 0.02 ^c
Sólidos Totais	11.76 ± 0.03 ^c	11.32 ± 0.03 ^d	15.23 ± 0.07 ^b	17.95 ± 0.04 ^a

Letras diferentes na mesma linha indicam uma diferença significativa de acordo com a Análise de Variância (ANOVA) ($P < 0,05$) e o teste de comparação múltipla de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Os teores de lipídios diferiram significativamente entre as espécies avaliadas, com maiores ($P < 0,05$) valores observados para o leite de ovelha e de búfala, aproximadamente o dobro daqueles encontrados nos leites de vaca e de cabra. O leite de cabra apresentou o menor teor lipídico entre as espécies avaliadas.

Além das diferenças quantitativas observadas neste estudo, a literatura reporta que o leite de búfala apresenta glóbulos de gordura de maior diâmetro e maior proporção de ácidos graxos saturados quando comparado ao leite bovino (MÉNARD et al., 2010). Da mesma forma, a literatura reporta que o leite de ovelha possui maior proporção de ácidos graxos insaturados em relação ao leite de vaca (MOHAPATRA et al., 2019). Adicionalmente, estudos indicam que o leite de cabra apresenta glóbulos de gordura de menor diâmetro e maior concentração de ácidos graxos de cadeia curta e média (DOS SANTOS et al., 2023; FELICE et al., 2021). Essas diferenças na quantidade, composição e estrutura da fração lipídica podem contribuir para variações no comportamento térmico dos leites e, conseqüentemente, em suas propriedades termofísicas.

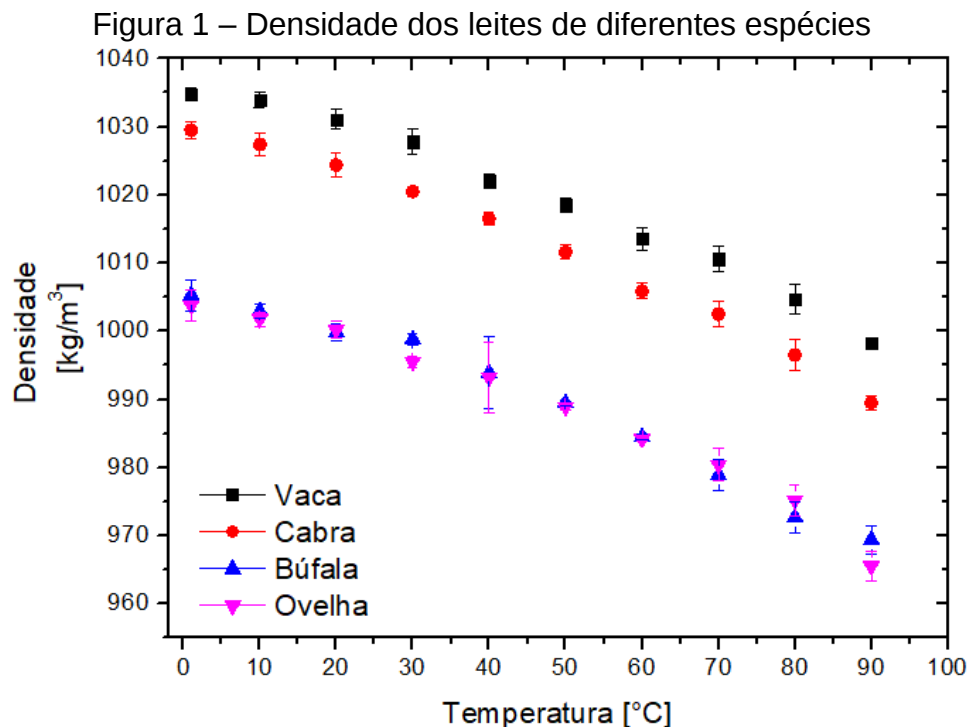
3.2 Propriedades termofísicas

3.2.1 Densidade

A densidade é uma propriedade termofísica fundamental que expressa a relação entre a massa e o volume de um material (CARVALHO et al., 2015), sendo amplamente utilizada no dimensionamento e na modelagem de operações de processamento de alimentos. A densidade depende tanto da temperatura quanto da composição do leite, sendo influenciada pelas proporções relativas de água, gordura, proteínas, lactose e minerais (GABAS et al., 2012). Dessa forma, o conhecimento da densidade é essencial para cálculos de balanços de massa e energia, determinação do regime de escoamento e projeto de equipamentos térmicos na indústria de laticínios.

Os valores de densidade variaram de acordo com a espécie animal e com a temperatura. O leite de vaca apresentou densidade variando de 1034,8 a 998,2 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, enquanto o leite de cabra variou de 1029,5 a 989,5 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Para o leite de búfala, os valores de densidade situaram-se entre 1005,3 e 969,4 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, e o leite de ovelha

apresentou os menores valores, variando de 1003,8 a 965,5 kg·m⁻³, na faixa de temperatura de 1 a 90 °C (Figura 1).



Para todos os tipos de leite avaliados, observou-se uma redução contínua da densidade com o aumento da temperatura. Esse comportamento está associado à expansão térmica da matriz líquida, na qual o aumento da energia térmica promove maior espaçamento intermolecular e aumento do volume específico (EVANGELISTA et al., 2020), resultando na diminuição da densidade.

As diferenças de densidade observadas entre os leites das diferentes espécies estão diretamente relacionadas ao balanço entre a fração lipídica e os sólidos não gordurosos, bem como à microestrutura do sistema. A menor densidade dos leites de búfala e ovelha em relação aos leites de vaca e cabra pode ser atribuída ao elevado teor de gordura dessas matrizes, uma vez que a fase lipídica apresenta densidade inferior à da água e aos demais constituintes sólidos, reduzindo a densidade global do leite.

Por outro lado, apesar de o leite de vaca apresentar teor de gordura ligeiramente superior ao do leite de cabra, sua maior densidade pode ser explicada pelo maior

conteúdo relativo de sólidos não gordurosos, especialmente lactose e minerais, além de diferenças na organização microestrutural das fases proteica e lipídica. Assim, a densidade do leite resulta de um equilíbrio complexo entre composição química e estrutura do sistema coloidal, o que explica as variações observadas entre as espécies estudadas.

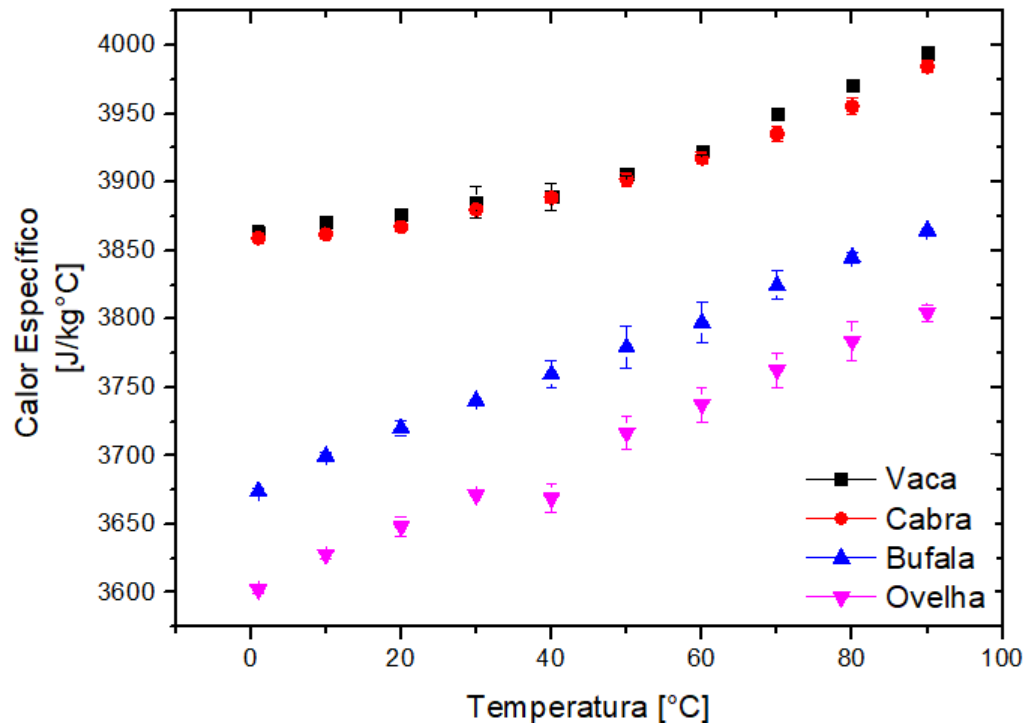
3.2.2 Calor específico

O calor específico (C_p) é uma propriedade termofísica fundamental que expressa a quantidade de energia necessária para elevar a temperatura de uma unidade de massa de um material em uma unidade de temperatura (MARTINS et al., 2020). Essa propriedade está diretamente relacionada à capacidade de armazenamento de energia térmica, importante no dimensionamento e na modelagem de operações de aquecimento e resfriamento, como pasteurização, esterilização, resfriamento rápido e evaporação.

Em produtos lácteos, a água exerce grande influência sobre essa propriedade devido ao seu elevado calor específico em comparação aos demais constituintes do leite. Dessa forma, alterações na composição ocasionadas por processos de concentração ou remoção de água podem modificar significativamente a capacidade do produto de absorver e transferir calor. O conhecimento preciso dessa propriedade é essencial para a otimização dos processos industriais, contribuindo para a redução do consumo energético, o aumento da eficiência térmica dos equipamentos e a preservação da qualidade nutricional e sensorial dos produtos lácteos.

Os valores de calor específico dos leites avaliados apresentaram faixas distintas em função da espécie animal e da temperatura. O leite de vaca apresentou valores de C_p variando de 3862,9 a 3994,4 J·kg⁻¹·K⁻¹, enquanto o leite de cabra variou de 3859,1 a 3984,5 J·kg⁻¹·K⁻¹. Para o leite de búfala, os valores situaram-se entre 3674,0 e 3864,6 J·kg⁻¹·K⁻¹, ao passo que o leite de ovelha apresentou os menores valores, variando de 3602,1 a 3804,5 J·kg⁻¹·K⁻¹, na faixa de temperatura de 1 a 90 °C (Figura 2).

Figura 2 – Calor específico dos leites



Para todos os tipos de leite, observou-se um aumento contínuo do calor específico com o incremento da temperatura. Esse comportamento está associado ao aumento da energia interna do sistema e à maior mobilidade molecular promovida pelo aquecimento, o que resulta em maior capacidade de absorção de energia térmica (De CASTILHOS et al., 2017). A elevação do C_p ao longo de toda a faixa de temperatura é característica de sistemas líquidos ricos em água e está em concordância com o comportamento reportado para outros alimentos líquidos, como sucos de uva (EVANGELISTA et al., 2020), soluções salinas (CARVALHO et al., 2015) e soluções de carboidratos (Do CARMO et al., 2022; MARTINS et al., 2021).

Comparando-se os diferentes tipos de leite a uma mesma temperatura, observa-se que os leites de vaca e de cabra apresentam os maiores calores específicos (muito próximos entre si), indicando comportamento térmico semelhante ao longo de toda a faixa de temperatura estudada. Essa proximidade reflete suas composições bastante semelhantes, especialmente no que se refere ao elevado teor de água e às menores frações lipídicas, quando comparados aos leites de búfala e de ovelha, como relatado

anteriormente. Leites com maiores calores específicos, requerem maior quantidade de energia para atingir uma determinada temperatura de processamento, em função de sua maior capacidade de armazenamento de energia térmica. Como consequência, operações como pasteurização, esterilização e aquecimento contínuo demandam maior aporte energético quando aplicadas a esses leites.

Em contraste, os leites de búfala e de ovelha apresentam valores de calor específico menores daqueles observados para vaca e cabra, evidenciando o efeito da maior concentração de sólidos totais e de gordura. Além disso, verifica-se que o leite de búfala apresenta valores de C_p superiores aos do leite de ovelha, indicando que, embora ambos possuam elevados teores de sólidos, diferenças na proporção relativa entre água, gordura e sólidos não lipídicos resultam em pequenas mudanças no comportamento térmico. Essas diferenças podem ter implicações diretas no processamento térmico do leite. Os leites de búfala e ovelha podem aquecer mais rapidamente sob as mesmas condições operacionais, atingindo a temperatura desejada em menor tempo. Esse comportamento pode ser vantajoso em processos de aquecimento rápido ou tratamentos térmicos de curta duração, contribuindo para maior eficiência energética. No entanto, o aquecimento mais rápido pode resultar em maiores gradientes térmicos, exigindo controle operacional adequado para evitar superaquecimento localizado ou degradação térmica de componentes sensíveis.

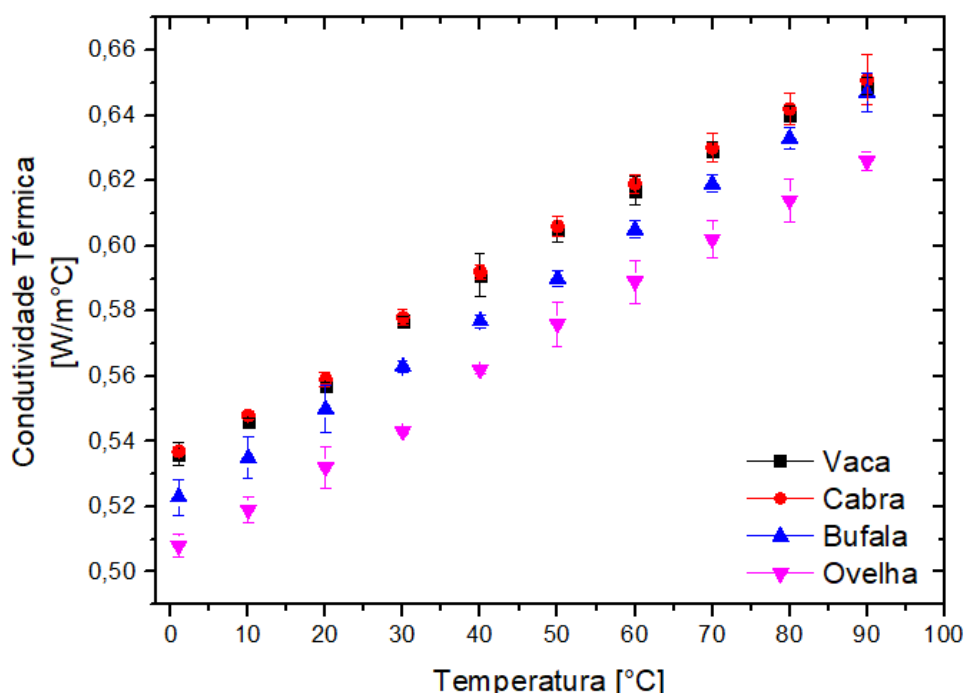
3.2.3 Condutividade térmica

A condutividade térmica é uma propriedade termofísica que expressa a capacidade de um material conduzir calor, sendo definida como o coeficiente proporcional na lei de Fourier da condução térmica. Essa propriedade está diretamente relacionada à facilidade com que a energia térmica se propaga no interior de um material e depende de fatores como composição química, estrutura física e temperatura. Em sistemas alimentícios líquidos, a condutividade térmica é fortemente influenciada pelo teor de água e pela distribuição das fases lipídica e proteica.

No presente estudo, a condutividade térmica dos leites de vaca, cabra, búfala e ovelha apresentou variações significativas em função da temperatura. O leite de vaca

apresentou valores de condutividade térmica entre $0,536$ e $0,649 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, enquanto o leite de cabra variou de $0,537$ a $0,651 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Para o leite de búfala, os valores situaram-se entre $0,523$ e $0,647 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, e para o leite de ovelha, entre $0,508$ e $0,626 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, na faixa de temperatura de 1 a 90°C (Figura 3). Esses resultados evidenciam que, embora todos os leites apresentem comportamento térmico semelhante, diferenças quantitativas relevantes podem ser observadas entre as espécies.

Figura 3 – Condutividade térmica dos leites



De modo geral, observou-se que a condutividade térmica aumentou com o incremento da temperatura para todas as espécies avaliadas. Esse comportamento é característico de sistemas líquidos ricos em água e pode ser explicado pelo aumento da mobilidade molecular e pela intensificação dos mecanismos de transferência de energia térmica no meio. À medida que a temperatura se eleva, ocorre maior agitação térmica das moléculas, o que favorece a condução de calor. Além disso, mudanças na estrutura coloidal do leite, como a redução da viscosidade e alterações na interação entre as fases aquosa, proteica e lipídica, contribuem para o aumento da condutividade térmica com a temperatura.

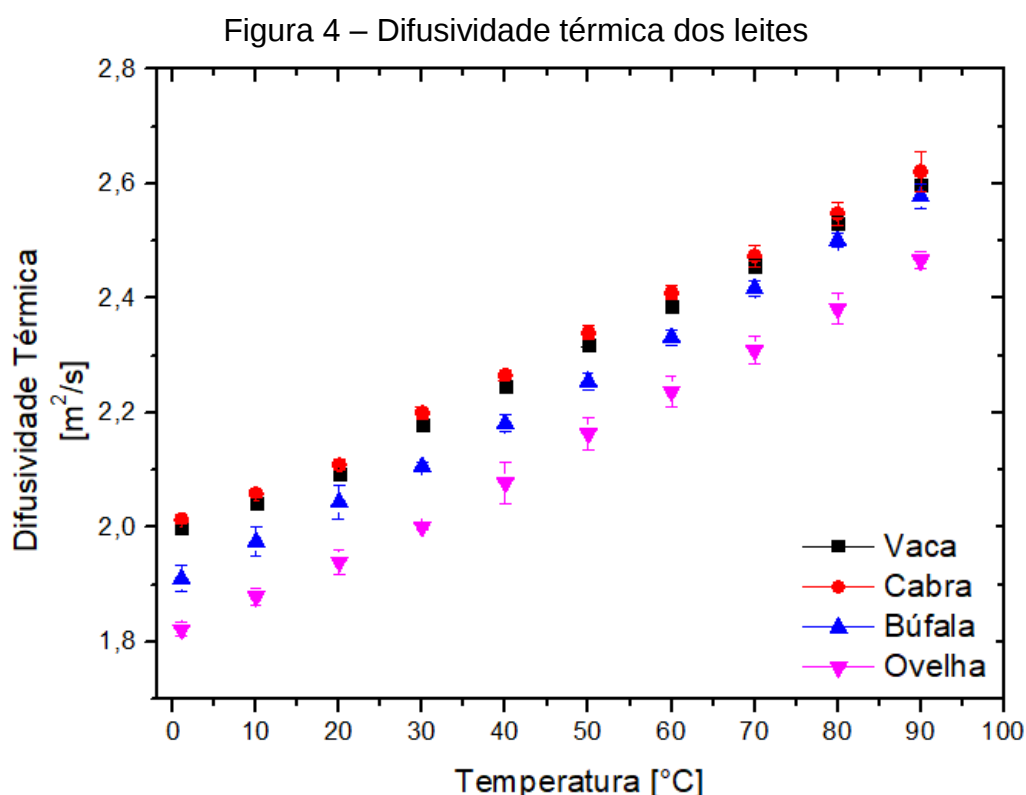
Ao comparar os diferentes tipos de leite, verifica-se que os leites de vaca e cabra apresentaram valores de condutividade térmica muito próximos em toda a faixa de temperatura estudada. Esse comportamento pode ser atribuído às semelhanças na composição química dessas matrizes, especialmente no teor de água e de sólidos não gordurosos. Em contraste, os leites de búfala e ovelha apresentaram valores de condutividade térmica sistematicamente inferiores aos dos leites de vaca e cabra. Essa diferença pode ser explicada pelo maior teor de gordura presente nos leites de búfala e ovelha, uma vez que a fase lipídica possui menor condutividade térmica em comparação à fase aquosa e aos demais constituintes sólidos. Assim, o aumento da fração lipídica reduz a capacidade global do leite de conduzir calor, mesmo na presença de maiores teores de sólidos totais.

As diferenças observadas na condutividade térmica entre os leites têm implicações diretas na engenharia de processos térmicos. Leites com maior condutividade térmica, como os de vaca e cabra, tendem a apresentar maior eficiência na transferência de calor, o que pode resultar em tempos menores de aquecimento e resfriamento e em gradientes térmicos menos pronunciados durante operações como pasteurização, esterilização e concentração. Por outro lado, leites com menor condutividade térmica, como os de búfala e ovelha, apresentam maior resistência à condução de calor, o que pode exigir tempos de processamento mais longos ou maiores áreas de troca térmica em equipamentos industriais. Além disso, essas diferenças podem impactar o consumo energético, o dimensionamento de trocadores de calor e evaporadores, bem como a uniformidade térmica do produto durante o processamento.

3.2.4 Difusividade térmica

A difusividade térmica é uma propriedade termofísica que expressa a rapidez com que o calor se propaga no interior de um material, sendo definida como a razão entre a condutividade térmica e o produto da densidade pelo calor específico ($\alpha = k/\rho c_p$). Essa propriedade combina, portanto, a capacidade do material de conduzir calor com sua habilidade de armazenar energia térmica, sendo fundamental para a análise de processos de aquecimento e resfriamento em sistemas alimentícios.

No presente estudo, a difusividade térmica dos leites de vaca, cabra, búfala e ovelha variou significativamente com a temperatura. O leite de vaca apresentou valores de difusividade térmica entre $1,999$ e $2,597 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, enquanto o leite de cabra variou de $2,014$ a $2,621 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Para o leite de búfala, os valores situaram-se entre $1,911$ e $2,578 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, e para o leite de ovelha, entre $1,822$ e $2,466 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, na faixa de temperatura de 1 a 90°C (Figura 4).



Observou-se, de modo geral, que a difusividade térmica aumentou com o incremento da temperatura para todas as espécies avaliadas. Esse comportamento está associado ao aumento da condutividade térmica e às alterações simultâneas na densidade e no calor específico do leite com a temperatura. À medida que a temperatura se eleva, a maior mobilidade molecular e a redução da viscosidade favorecem a propagação do calor, resultando em maiores valores de difusividade térmica.

Ao comparar os diferentes tipos de leite, observou-se que os leites de vaca e cabra apresentaram valores de difusividade térmica semelhantes em toda a faixa de

temperatura analisada. Já os leites de búfala e ovelha exibiram valores inferiores, atribuídos principalmente ao maior teor de gordura. Essa composição reduz a propagação do calor e aumenta a capacidade de armazenamento de energia térmica. Em contrapartida, os leites de vaca e cabra, com maior conteúdo de água e menor teor lipídico, favorecem uma maior transferência de calor.

Do ponto de vista da engenharia de processos térmicos, as diferenças na difusividade térmica entre os leites implicam variações nos tempos característicos de aquecimento e resfriamento. Leites com maior difusividade térmica, como os de vaca e cabra, tendem a atingir o equilíbrio térmico mais rapidamente, favorecendo maior eficiência em operações como pasteurização e esterilização. Em contrapartida, leites com menor difusividade térmica, como os de búfala e ovelha, apresentam maior resistência à propagação do calor, o que pode exigir tempos de processamento mais longos ou maior intensidade de troca térmica em equipamentos industriais.

Além disso, a difusividade térmica influencia a distribuição de temperatura durante o processamento, afetando a uniformidade do tratamento térmico, a segurança microbiológica e a qualidade do leite. O conhecimento dessa propriedade permite otimizar as condições de processamento, reduzindo o consumo de energia e preservando as características nutricionais e sensoriais do produto. Assim, os resultados obtidos fornecem subsídios para o dimensionamento e a otimização de equipamentos destinados ao processamento de leites de diferentes espécies.

3.2.5 Modelagem dos dados

As Tabelas 2, 3, 4 e 5 apresentam os parâmetros de ajuste dos modelos polinomiais de primeira, segunda e terceira ordem para as propriedades termofísicas dos leites estudados. De modo geral, observou-se que o modelo polinomial de segunda ordem apresentou o melhor desempenho na descrição da dependência das propriedades termofísicas com a temperatura, evidenciado pelos elevados valores do coeficiente de determinação ajustado ($R^2 > 0,9784$) e pelos baixos valores do erro relativo médio ($\chi^2 < 1,601 \times 10^{-1}$).

Tabela 2 – Modelos polinomiais empíricos para densidade de leite de diferentes espécies, em função da temperatura

Constate	Vaca			Búfala		
	1º Grau	2º Grau	3º Grau	1º Grau	2º Grau	3º Grau
ϕ_1	1037,9	1036,3	1035,3	1007,8	1005,5	1004,8
ϕ_2	$-4,023 \times 10^{-1}$	$-2,834 \times 10^{-1}$	$-1,228 \times 10^{-1}$	$-4,295 \times 10^{-1}$	$-1,980 \times 10^{-1}$	$-8,898 \times 10^{-2}$
ϕ_3	–	$-1,312 \times 10^{-3}$	$-5,908 \times 10^{-3}$	–	$-2,470 \times 10^{-3}$	$-5,589 \times 10^{-3}$
ϕ_4	–	–	$3,368 \times 10^{-5}$	–	–	$2,286 \times 10^{-5}$
R_{Adj}^2	0,9848	0,9920	0,9948	0,9709	0,9940	0,9946
χ^2	$1,542 \times 10^{-2}$	$6,956 \times 10^{-3}$	$3,806 \times 10^{-3}$	$3,720 \times 10^{-2}$	$6,068 \times 10^{-3}$	$4,514 \times 10^{-3}$
Constate	Cabra			Ovelha		
	1º Grau	2º Grau	3º Grau	1º Grau	2º Grau	3º Grau
ϕ_1	1032,2	1030,5	1029,6	1005,8	1003,0	1003,1
ϕ_2	$-4,309 \times 10^{-1}$	$-3,075 \times 10^{-1}$	$-1,649 \times 10^{-1}$	$-4,155 \times 10^{-1}$	$-2,124 \times 10^{-1}$	$-2,232 \times 10^{-1}$
ϕ_3	–	$-1,362 \times 10^{-3}$	$-5,440 \times 10^{-3}$	–	$-2,241 \times 10^{-3}$	$-1,931 \times 10^{-3}$
ϕ_4	–	–	$2,988 \times 10^{-5}$	–	–	$-2,268 \times 10^{-6}$
R_{Adj}^2	0,9887	0,9961	0,9971	0,9762	0,9988	0,9986
χ^2	$1,316 \times 10^{-2}$	$3,968 \times 10^{-3}$	$2,661 \times 10^{-3}$	$2,695 \times 10^{-2}$	$1,125 \times 10^{-3}$	$1,108 \times 10^{-3}$

Tabela 3 – Modelos polinomiais empíricos para calor específico de leite de diferentes espécies, em função da temperatura

Constate	Vaca			Búfala		
	1º Grau	2º Grau	3º Grau	1º Grau	2º Grau	3º Grau
ϕ_1	3848,86	3864,66	3865,84	3674,67	3674,67	3674,21
ϕ_2	1,397	0,2407	0,04410	2,228	2,228	2,305
ϕ_3	–	$1,276 \times 10^{-2}$	$1,839 \times 10^{-2}$	–	$-1,908 \times 10^{-3}$	$-4,114 \times 10^{-3}$
ϕ_4	–	–	$-4,121 \times 10^{-5}$	–	–	$1,617 \times 10^{-5}$
R_{Adj}^2	0,9259	0,9868	0,9847	0,9967	0,9966	0,9960
χ^2	$2,492 \times 10^{-1}$	$3,782 \times 10^{-2}$	$3,668 \times 10^{-2}$	$2,057 \times 10^{-2}$	$2,065 \times 10^{-2}$	$2,041 \times 10^{-2}$
Constate	Cabra			Ovelha		
	1º Grau	2º Grau	3º Grau	1º Grau	2º Grau	3º Grau
ϕ_1	3845,55	3856,84	3859,07	3601,06	3601,98	3605,50
ϕ_2	1,287	0,4605	0,08871	2,227	2,160	1,574
ϕ_3	–	$9,121 \times 10^{-3}$	$1,976 \times 10^{-2}$	–	$7,402 \times 10^{-4}$	$1,751 \times 10^{-2}$
ϕ_4	–	–	$-7,795 \times 10^{-5}$	–	–	$-1,229 \times 10^{-4}$
R_{Adj}^2	0,9579	0,9961	0,9937	0,9814	0,9784	0,9759
χ^2	$1,176 \times 10^{-1}$	$9,222 \times 10^{-3}$	$1,269 \times 10^{-2}$	$1,609 \times 10^{-1}$	$1,601 \times 10^{-1}$	$1,491 \times 10^{-1}$

Tabela 4 – Modelos polinomiais empíricos para condutividade térmica de leite de diferentes espécies, em função da temperatura

Constate	Vaca			Búfala		
	1º Grau	2º Grau	3º Grau	1º Grau	2º Grau	3º Grau
ϕ_1	0,5351	0,5313	0,5337	0,5210	0,5217	0,5216
ϕ_2	$1,322 \times 10^{-3}$	$1,600 \times 10^{-3}$	$1,192 \times 10^{-3}$	$1,399 \times 10^{-3}$	$1,370 \times 10^{-3}$	$1,390 \times 10^{-3}$
ϕ_3	–	$-3,067 \times 10^{-6}$	$8,589 \times 10^{-6}$	–	$2,579 \times 10^{-7}$	$-3,162 \times 10^{-7}$
ϕ_4	–	–	$-8,542 \times 10^{-8}$	–	–	$4,207 \times 10^{-9}$
R_{Adj}^2	0,9920	0,9956	0,9973	0,9997	0,9998	0,9998
χ^2	$1,495 \times 10^{-4}$	$7,491 \times 10^{-5}$	$3,711 \times 10^{-5}$	$3,364 \times 10^{-6}$	$2,813 \times 10^{-6}$	$2,706 \times 10^{-6}$
Constate	Cabra			Ovelha		
	1º Grau	2º Grau	3º Grau	1º Grau	2º Grau	3º Grau
ϕ_1	0,5364	0,5329	0,5351	0,5058	0,5048	0,5069
ϕ_2	$1,326 \times 10^{-3}$	$1,582 \times 10^{-3}$	$1,215 \times 10^{-3}$	$1,358 \times 10^{-3}$	$1,432 \times 10^{-3}$	$1,087 \times 10^{-3}$
ϕ_3	–	$-2,826 \times 10^{-6}$	$7,662 \times 10^{-6}$	–	$-8,090 \times 10^{-7}$	$9,051 \times 10^{-6}$
ϕ_4	–	–	$-7,685 \times 10^{-8}$	–	–	$-7,226 \times 10^{-8}$
R_{Adj}^2	0,9936	0,9967	0,9980	0,9973	0,9972	0,9984
χ^2	$1,188 \times 10^{-4}$	$5,548 \times 10^{-5}$	$2,888 \times 10^{-5}$	$5,581 \times 10^{-5}$	$5,136 \times 10^{-5}$	$2,395 \times 10^{-5}$

Tabela 5 – Modelos polinomiais empíricos para difusividade térmica de leite de diferentes espécies, em função da temperatura

Constate	Vaca			Búfala		
	1º Grau	2º Grau	3º Grau	1º Grau	2º Grau	3º Grau
ϕ_1	1,97484	1,98285	1,99074	1,89176	1,90713	1,90713
ϕ_2	$6,88 \times 10^{-3}$	$6,29 \times 10^{-3}$	$4,98 \times 10^{-3}$	$7,48 \times 10^{-3}$	$6,38 \times 10^{-3}$	$6,38 \times 10^{-3}$
ϕ_3	–	$6,47 \times 10^{-6}$	$4,40 \times 10^{-5}$	–	$1,22 \times 10^{-5}$	$1,22 \times 10^{-5}$
ϕ_4	–	–	$-2,75 \times 10^{-7}$	–	–	$3,12 \times 10^{-10}$
R_{Adj}^2	0,9977	0,9982	0,9988	0,9971	0,9997	0,9996
χ^2	$3,33 \times 10^{-4}$	$2,25 \times 10^{-4}$	$1,20 \times 10^{-4}$	$3,85 \times 10^{-4}$	$4,28 \times 10^{-5}$	$4,28 \times 10^{-5}$
Constate	Cabra			Ovelha		
	1º Grau	2º Grau	3º Grau	1º Grau	2º Grau	3º Grau
ϕ_1	1,990	1,997	2,004	1,799	1,812	1,818
ϕ_2	$6,962 \times 10^{-3}$	$6,446 \times 10^{-3}$	$5,317 \times 10^{-3}$	$7,290 \times 10^{-3}$	$6,320 \times 10^{-3}$	$5,364 \times 10^{-3}$
ϕ_3	–	$5,695 \times 10^{-6}$	$3,799 \times 10^{-5}$	–	$1,070 \times 10^{-5}$	$3,806 \times 10^{-5}$
ϕ_4	–	–	$-2,367 \times 10^{-7}$	–	–	$-2,005 \times 10^{-7}$
R_{Adj}^2	0,9976	0,9978	0,9984	0,9974	0,9989	0,9992
χ^2	$3,558 \times 10^{-4}$	$2,726 \times 10^{-4}$	$1,694 \times 10^{-4}$	$4,444 \times 10^{-4}$	$1,484 \times 10^{-4}$	$9,127 \times 10^{-5}$

O comportamento não linear observado para a maioria das propriedades pode ser atribuído à complexa interação entre os constituintes do leite, especialmente à influência da fração aquosa, lipídica e proteica sobre os mecanismos de transferência de calor e variação volumétrica com a temperatura. Nesse contexto, o modelo quadrático mostrou-se capaz de capturar adequadamente essas variações, representando um compromisso entre simplicidade matemática e precisão estatística.

Uma exceção foi verificada para a condutividade térmica dos leites de búfala e ovelha, cujos dados experimentais apresentaram tendência aproximadamente linear ao longo da faixa de temperatura investigada. Nesses casos, o modelo de primeira ordem foi suficiente para descrever o comportamento observado, sem perda significativa de precisão estatística, o que sugere menor sensibilidade dessa propriedade às variações térmicas nessas matrizes lácteas específicas.

A inclusão do termo cúbico não resultou em melhorias substanciais nos indicadores estatísticos, indicando que modelos de ordem superior não são necessários e poderiam levar a ajustes excessivamente complexos sem ganho significativo de precisão. Todos os parâmetros estimados foram estatisticamente significativos em um nível de confiança de 95%, reforçando a robustez dos modelos propostos.

O uso de modelos polinomiais para descrever propriedades termofísicas de alimentos tem sido amplamente reportado na literatura (DO CARMO et al., 2022; EVANGELISTA et al., 2020; MARTINS et al., 2021; RIBEIRO-SANCHES et al., 2025) devido à sua elevada capacidade preditiva e facilidade de aplicação em simulações e projetos de processos térmicos, o que reforça a adequação da abordagem adotada neste estudo.

4 CONCLUSÕES

Este estudo investigou as propriedades termofísicas dos leites de vaca, cabra, búfala e ovelha em uma ampla faixa de temperatura. De modo geral, o calor específico, a condutividade térmica e a difusividade térmica aumentaram com a elevação da temperatura, enquanto a densidade apresentou comportamento inverso. Os leites de vaca e cabra exibiram valores mais elevados dessas propriedades em comparação aos

leites de búfala e ovelha, o que pode ser atribuído principalmente às diferenças na composição, especialmente no teor de gordura e na fração aquosa. As variações observadas foram adequadamente descritas por modelos matemáticos, sendo as funções polinomiais de segunda ordem as mais representativas para a maioria das propriedades. Os resultados obtidos evidenciam o impacto da temperatura no comportamento termofísico dos leites e fornecem subsídios relevantes para a simulação, o projeto e a otimização de processos térmicos na indústria de laticínios, contribuindo para o desenvolvimento de operações mais eficientes e para o aprimoramento do controle de qualidade de produtos lácteos.

REFERÊNCIAS

AOAC INTERNATIONAL. **Official methods of analysis of AOAC International**. 18. ed. Gaithersburg: AOAC International, 2005.

ARCHER, D. G. (1993). Thermodynamic Properties of Synthetic Sapphire (α -Al₂O₃), Standard Reference Material 720 and the Effect of Temperature-Scale Differences on Thermodynamic Properties. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, 22(6), 1441–1453. <https://doi.org/10.1063/1.555931>

BALTHAZAR, C. F., PIMENTEL, T. C., FERRÃO, L. L., ALMADA, C. N., SANTILLO, A., ALBENZIO, M., MOLLAKHALILI, N., MORTAZAVIAN, A. M., NASCIMENTO, J. S., SILVA, M. C., FREITAS, M. Q., SANT'ANA, A. S., GRANATO, D., CRUZ, A. G. (2017). Sheep Milk: Physicochemical Characteristics and Relevance for Functional Food Development. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 16(2), 247–262. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12250>

BITTANTE, G., AMALFITANO, N., BERGAMASCHI, M., PATEL, N., HADDI, M. L., BENABID, H., PAZZOLA, M., VACCA, G. M., TAGLIAPIETRA, F., SCHIAVON, S. (2022). Composition and aptitude for cheese-making of milk from cows, buffaloes, goats, sheep, dromedary camels, and donkeys. **Journal of Dairy Science**, 105(3), 2132–2152. <https://doi.org/10.3168/JDS.2021-20961>

CARVALHO, G. R., CHENLO, F., MOREIRA, R., TELIS-ROMERO, J. (2015). Physicothermal properties of aqueous sodium chloride solutions. **Journal of Food Process Engineering**, 38(3), 234–242.

<https://doi.org/10.1111/JFPE.12160>;WGROU:STRING:PUBLICATION

De CASTILHOS, M. B. M., BETIOL, L. F. L., DE CARVALHO, G. R., TELIS-ROMERO, J. (2017). Experimental study of physical and rheological properties of grape juice using different temperatures and concentrations. Part I: Cabernet Sauvignon. **Food Research International**, 100, 724–730. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2017.07.075>

Do CARMO, J. R., CORRÊA, J. L. G., POLACHINI, T. C., TELIS-ROMERO, J. (2022). Properties of isomaltulose (Palatinose®) – An emerging healthy carbohydrate: Effect of temperature and solute concentration. **Journal of Molecular Liquids**, 347, 118304. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2021.118304>

Dos SANTOS, W. M., GUIMARÃES GOMES, A. C., DE CALDAS NOBRE, M. S., DE SOUZA PEREIRA, Á. M., DOS SANTOS PEREIRA, E. V., DOS SANTOS, K. M. O., FLORENTINO, E. R., ALONSO BURITi, F. C. (2023). Goat milk as a natural source of bioactive compounds and strategies to enhance the amount of these beneficial components. **International Dairy Journal**, 137, 105515. <https://doi.org/10.1016/J.IDAIRYJ.2022.105515>

EVANGELISTA, R. R., SANCHES, M. A. R., DE CASTILHOS, M. B. M., CANTÚ-LOZANO, D., TELIS-ROMERO, J. (2020). Determination of the rheological behavior and thermophysical properties of malbec grape juice concentrates (*Vitis vinifera*). **Food Research International**, 137, 109431. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2020.109431>

FELICE, V. D., OWENS, R. A., KENNEDY, D., HOGAN, S. A., LANE, J. A. (2021). Comparative structural and compositional analyses of cow, buffalo, goat and sheep cream. **Foods**, 10(11). <https://doi.org/10.3390/FOODS10112643/S1>

FAO - **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 2025. Disponível em: <<http://www.fao.org/corp/statistics/es/>>. Acesso em: 15 mar. 2026.

IAL - Instituto Adolfo Lutz. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4 ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020 p.

LÚCIA GABAS, A., ALEXANDRE, R., CABRAL, F., FERNANDES DE OLIVEIRA, C. A., TELIS-ROMERO, J. (2012). Density and rheological parameters of goat milk. **Food Science and Technology**, 32(2), 381–385. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612012005000033>

MARTINS, M. J. N., AUGUSTO, P. E. D., TELIS-ROMERO, J., POLACHINI, T. C. (2021). Transport properties of saturated sucrose and maltitol solutions as affected by temperature. **Journal of Molecular Liquids**, 336, 116254. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2021.116254>

MARTINS, M. J. N., GUIMARÃES, B., POLACHINI, T. C., TELIS-ROMERO, J. (2020). Thermophysical properties of carbohydrate solutions: Correlation between thermal and transport properties. **Journal of Food Process Engineering**, 43(9), e13483. <https://doi.org/10.1111/JFPE.13483>

MARTINS, M. J. N., SANCHES, M. A. R., POLACHINI, T. C., DE OLIVEIRA, E. B., COIMBRA, J. S. D. R., TELIS-ROMERO, J. (2023). Solubility of different salts used in the control of the water activity of foods. **Ciência e Agrotecnologia**, 47, e018722. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202347018722>

MEJARES, C. T., HUPPERTZ, T., CHANDRAPALA, J. (2022). Thermal processing of buffalo milk – A review. **International Dairy Journal**, 129, 105311. <https://doi.org/10.1016/J.IDAIRYJ.2021.105311>

MÉNARD, O., AHMAD, S., ROUSSEAU, F., BRIARD-BION, V., GAUCHERON, F., LOPEZ, C. (2010). Buffalo vs. cow milk fat globules: Size distribution, zeta-potential, compositions in total fatty acids and in polar lipids from the milk fat globule membrane. **Food Chemistry**, 120(2), 544–551. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2009.10.053>

MINIM, L. A., COIMBRA, J. S. R., MINIM, V. P. R., TELIS-ROMERO, J. (2002). Influence of Temperature and Water and Fat Contents on the Thermophysical Properties of Milk. **Journal of Chemical and Engineering Data**, 47(6), 1488–1491. <https://doi.org/10.1021/JE025546A>

MOHAPATRA, A., SHINDE, A. K., SINGH, R. (2019). Sheep milk: A pertinent functional food. **Small Ruminant Research**, 181, 6–11. <https://doi.org/10.1016/J.SMALLRUMRES.2019.10.002>

NGUYEN, H. T. H., AFSAR, S., DAY, L. (2018). Differences in the microstructure and rheological properties of low-fat yoghurts from goat, sheep and cow milk. **Food Research International**, 108, 423–429. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2018.03.040>

PAPPA, E. C., KONDYLI, E., BOSNEA, L., MALAMOU, E., VLACHOU, A. M. (2022). Chemical, microbiological, sensory, and rheological properties of fresh goat milk cheese made by different starter cultures during storage. **Journal of Food Process Engineering**, 45(7), e13788. <https://doi.org/10.1111/JFPE.13788>

PIETRZAK-FIEĆKO, R., KAMELSKA-SADOWSKA, A. M., PIETRZAK-FIEĆKO, R., KAMELSKA-SADOWSKA, A. M. (2020). The Comparison of Nutritional Value of Human Milk with Other Mammals' Milk. **Nutrients** 2020, Vol. 12, 12(5). <https://doi.org/10.3390/NU12051404>

REDDY, C. S., DATTA, A. K. (1994). Thermophysical properties of concentrated reconstituted milk during processing. **Journal of Food Engineering**, 21(1), 31–40. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)90094-9](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)90094-9)

RIBEIRO-SANCHES, M. A., ZAZUETA-MORALES, J. DE J., VERONEZI, C. M., JORGE, N., DE MORAES, M. N., De OLIVEIRA, E. B., COIMBRA, J. S. DOS R., DE SOUZA, S. J. F., TELIS-ROMERO, J. (2025). Chemical and thermophysical properties of cold-pressed and unrefined vegetable oils between 293.15 K and 433.15 K. **Journal of Molecular Liquids**, 432, 127836. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2025.127836>

SANCHES, H. C., DOS SANTOS, A. S., GONSALES, B. H. P., BORGES-MACHADO, A. L., RIBEIRO-SANCHES, M. A., TELIS-ROMERO, J., PENNA, A. L. B. (2025). Rheological Behavior of Milk From Different Species as a Function of Chemical Composition and Temperature: An Engineering Basis for Milk Processing. **Journal of Food Process Engineering**, 48(11), e70237.
<https://doi.org/10.1111/JFPE.70237>;ISSUE:ISSUE:DOI

TERZIOĞLU, M. E., BAKIRCI, İ., OZ, E., BRENNAN, C. S., HUPPERTZ, T., AMAROWICZ, R., KHAN, M. R., ELOBEID, T., AADIL, R. M., OZ, F. (2023). Comparison of camel, buffalo, cow, goat, and sheep yoghurts in terms of various physicochemical, biochemical, textural and rheological properties. **International Dairy Journal**, 146, 105749.

7 TRANSIÇÃO ENTRE O COMPORTAMENTO NEWTONIANO E NÃO NEWTONIANO DO LEITE DE BÚFALA: IMPACTO DA TEMPERATURA E DA CONCENTRAÇÃO

Artigo de Pesquisa

Será elaborada uma versão em inglês para submissão ao periódico "*Journal of Food Engineering*".

Alexsander Saves dos Santos¹, Cleberyanne da Silva Carvalho¹, Beatriz Hebeler Pansiera Gonsales¹, Halissom Clever Sanches¹, Marcio Augusto Ribeiro-Sanches^{1*}, Javier Telis-Romero¹

¹Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas (Ibilce), Campus São José do Rio Preto, São Paulo, 15054-000, Brasil.

*Autor a quem a correspondência pode ser endereçada. E-mail: mar.sanches@unesp.br (Márcio Augusto Ribeiro Sanches).

RESUMO

O leite de búfala apresenta composição nutricional diferenciada, caracterizada por elevados teores de gordura, proteínas e sólidos totais, o que lhe confere alto potencial tecnológico para a produção de derivados de valor agregado. Este estudo teve como objetivo avaliar o comportamento reológico do leite de búfala concentrado em função da concentração de sólidos totais (10 a 50,0%) e da temperatura (1 a 80 °C). A modelagem matemática foi empregada para descrever e interpretar a influência dessas variáveis sobre o comportamento reológico do sistema. Observou-se comportamento newtoniano para concentrações de sólidos totais entre 10 e 30%, sendo o modelo de Newton capaz de descrever adequadamente ($R_{adj}^2 \geq 0,999$; $RMSE \leq 3,991$) os dados experimentais. Para concentrações iguais ou superiores a 35%, o leite de búfala concentrado apresentou comportamento pseudoplástico sem tensão de escoamento, com excelente ajuste pelo

modelo de Ostwald–de Waele ($R_{adj}^2 \geq 0,995$; $RMSE \leq 5,962$). A viscosidade newtoniana ($0,53 \pm 0,01$ até $51,19 \pm 0,44$ Pa·s), assim como o índice de consistência - k ($6,51 \pm 0,67$ até $424,87 \pm 14,74$ Pa·s ^{n}) e o índice de comportamento - n ($0,75 \pm 0,01$ até $0,86 \pm 0,02$), aumentaram com o incremento da concentração de sólidos e diminuíram com o aumento da temperatura. Os resultados obtidos fornecem dados inéditos sobre o comportamento reológico do leite de búfala concentrado e contribuem para o projeto, a simulação e a otimização de processos industriais envolvendo esse produto.

Palavras-chave: leite concentrado; composição química; processo térmico; modelos reológicos; viscosidade; modelagem matemática.

1 INTRODUÇÃO

O leite de búfala tem despertado crescente interesse na indústria de laticínios em razão de sua composição nutricional diferenciada em relação ao leite bovino, caracterizada por maiores teores de gordura, proteínas e sólidos totais (ANINDITA et al., 2026; GOVINDAPPA et al., 2026). Essas características conferem ao leite de búfala elevado potencial tecnológico, tornando-o especialmente adequado para a elaboração de produtos de maior valor agregado, como queijos, leites concentrados e produtos fermentados (LIAO et al., 2025). Diante da expansão do uso industrial desse leite, torna-se essencial aprofundar o conhecimento sobre suas propriedades reológicas, fundamentais para o adequado desenvolvimento, controle e otimização de processos industriais.

As propriedades reológicas exercem papel importante no processamento de alimentos líquidos, uma vez que influenciam diretamente o escoamento, a transferência de calor e de massa, o consumo energético, as condições de bombeamento e o dimensionamento de equipamentos (EVANGELISTA et al., 2020). Em sistemas lácteos, o comportamento reológico é fortemente dependente da temperatura e da concentração de sólidos, fatores que afetam as interações intermoleculares, a hidratação das proteínas, a dinâmica dos glóbulos de gordura e a microestrutura do sistema (GABAS et al., 2012; SANCHES et al., 2025). Dessa forma, dados reológicos confiáveis são indispensáveis

para a modelagem de operações unitárias que envolvem aquecimento, resfriamento e concentração.

Embora o comportamento reológico do leite bovino e de seus concentrados seja amplamente documentado na literatura (ALCÂNTARA et al., 2012; VÉLEZ-RUIZ & BARBOSA-CÁNOVAS, 1998, 2000), incluindo estudos com leite desnatado concentrado (BIENVENUE et al., 2003; KARLSSON et al., 2005), e com leites fluidos de cabra, búfala e ovelha (SANCHES et al., 2025), os estudos sobre o comportamento reológico do leite de búfala concentrado ainda são escassos, sendo a maioria das investigações voltada à caracterização da composição química e de propriedades físico-químicas do leite in natura ou de seus derivados (ANINDITA et al., 2026; GOVINDAPPA et al., 2026; LI et al., 2026; LIAO et al., 2025). Além disso, investigações reológicas existentes geralmente abordam faixas estreitas de sólidos totais e temperatura, não representativas das condições encontradas em processos industriais de concentração, como a evaporação sob vácuo ou tratamentos térmicos.

As curvas de fluxo em regime estacionário fornecem informações fundamentais não apenas para a modelagem reológica, mas também para a identificação de transições entre comportamentos newtoniano e não newtoniano (RIBEIRO-SANCHES et al., 2024). Variações na temperatura e na concentração de sólidos podem alterar significativamente o comportamento do fluido, promovendo a transição de sistemas newtonianos para fluidos viscoplásticos com tensão de escoamento, bem como para fluidos pseudoplásticos (afinamento por cisalhamento) ou dilatantes (espessamento por cisalhamento), na presença ou ausência de tensão inicial. Em fluidos pseudoplásticos, a viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de cisalhamento, enquanto em fluidos dilatantes observa-se o comportamento oposto. Assim, a compreensão da influência conjunta da concentração e da temperatura sobre os parâmetros reológicos do leite de búfala concentrado é essencial para a previsão do desempenho do processo, a redução do consumo energético e a garantia da qualidade e da estabilidade do produto final.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar o comportamento reológico do leite de búfala concentrado em diferentes teores de sólidos totais (10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50%) e em uma ampla faixa de temperatura (1 a 80 °C). Trata-se

do primeiro estudo a investigar de forma abrangente a influência simultânea da concentração e da temperatura sobre a reologia do leite de búfala, fornecendo dados originais e inéditos que podem subsidiar o desenvolvimento de modelos reológicos mais precisos e apoiar o projeto e a otimização de processos industriais envolvendo esse produto.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Amostras de leite

Amostras de leite de búfala ($n = 5$) foram coletadas na Fazenda Santa Mônica, localizada no município de Jaborandi, Estado de São Paulo, Brasil ($20^{\circ}41'16''$ S, $48^{\circ}24'46''$ W; altitude 493 m). As coletas foram realizadas diretamente do tanque a granel após a ordenha matinal, conduzida conforme a rotina diária da propriedade. Os animais pertenciam à raça Mediterrâneo, amplamente utilizada para produção leiteira no Brasil. A fazenda opera em sistema de produção semi-intensivo, no qual as búfalas são mantidas em pastagens e recebem suplementação com ração concentrada.

Em cada dia de coleta, foram obtidos 1 litro de leite cru, totalizando 5 amostras. Após a ordenha, as amostras eram imediatamente refrigeradas a 4°C – 7°C e armazenadas em garrafas de vidro pré-limpas e esterilizadas. As amostras foram então transportadas sob refrigeração e analisadas no Laboratório de Medições Físicas da Universidade Estadual de São Paulo – UNESP, São José do Rio Preto/SP, onde foram armazenadas a $4^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ até a análise. Todas as análises foram realizadas em triplicado dentro de 48 horas para preservar as características originais do leite cru.

2.2 Processo de concentração

O leite foi inicialmente tratado por pasteurização lenta a 65°C por 30 minutos, em um tanque encamisado, antes de ser concentrado. Após a pasteurização, o leite foi preaquecido a temperaturas entre 65 e 70°C antes de ser submetido ao processo de concentração. O leite foi concentrado em um evaporador piloto (Fisatom, São Paulo,

Brasil), sob vácuo. Durante todo o processo, o ponto de ebulição foi mantido em baixa temperatura ($\pm 68^{\circ}\text{C}$) para evitar alterações significativas nos constituintes do leite. O leite de búfala foi concentrado até atingir um teor sólido total de $50 \pm 0,4\%$ p/w. Amostras experimentais contendo diferentes teores de sólidos foram preparadas a partir do mesmo leite de búfala concentrado, diluindo-o com água destilada até atingir concentrações de 10,5 a 50,0% p/w.

2.3 Caracterização química do leite

A caracterização química do leite de búfala incluiu a determinação dos teores de sólidos totais, proteínas, lipídios, cinzas e carboidratos. Os sólidos totais foram quantificados por meio de secagem gravimétrica em estufa a $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ até obtenção de massa constante, conforme o método 012/IV descrito pelo IAL (2008). O teor de proteínas foi determinado utilizando o método Kjeldahl, seguindo o protocolo 991.20 da AOAC INTERNATIONAL (2005). A fração lipídica foi analisada pelo método Gerber, de acordo com o procedimento 2000.18 da AOAC INTERNATIONAL (2005). As cinzas foram obtidas por incineração em mufla, segundo o método 935.42 da AOAC INTERNATIONAL (2005). O teor de carboidratos foi estimado por diferença, subtraindo-se do total de sólidos a soma das demais frações analisadas.

2.4 Determinação do comportamento reológico

As medições reológicas em regime de cisalhamento estacionário foram realizadas em um reômetro rotacional modelo ARG2 (TA Instruments, New Castle, EUA), equipado com sistema de controle térmico por Peltier. Utilizou-se uma geometria de cilindros concêntricos composta por um copo externo ($78,5 \times 30,15$ mm) e um rotor interno (42×28 mm), mantendo uma folga de $5920\text{ }\mu\text{m}$ entre as superfícies. O equipamento foi operado via software Rheology Advantage.

Antes de cada ensaio, as amostras eram submetidas a 2 minutos de pré-cisalhamento para garantir a estabilização da tensão em cada taxa aplicada. As curvas de fluxo foram obtidas no intervalo de $0,84$ a $168,44\text{ s}^{-1}$, avaliadas em 17 temperaturas

distintas: 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 e 80 °C, utilizando amostras de leite de búfala com diferentes teores de sólidos (10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50% p/w). Cada condição experimental foi analisada em triplicata (n = 3). A tensão de cisalhamento (Pa) correspondente a cada taxa constante era registrada diretamente pelo equipamento. A precisão do reômetro havia sido previamente verificada conforme descrito por Evangelista et al. (2020).

2.5 Modelagem matemática dos dados

A modelagem do comportamento reológico é fundamental para compreender como produtos alimentícios respondem a variações de temperatura e concentração, além de subsidiar o dimensionamento de operações em engenharia de alimentos (EVANGELISTA et al., 2020; RIBEIRO-SANCHES et al., 2024). Nesse contexto, diferentes equações clássicas descritas na literatura, como o modelo Newtoniano (Equação 1), a Lei de Potência de Ostwald–de Waele (Equação 2), o modelo de Bingham (Equação 3) e o modelo de Herschel–Bulkley (Equação 4) foram aplicadas aos dados experimentais de tensão e taxa de cisalhamento obtidos para o leite de búfala. Os ajustes matemáticos foram realizados utilizando o software OriginPro 8.0 (OriginLab Corporation, Northampton, EUA).

$$\sigma = \mu \cdot \gamma \quad (1)$$

$$\sigma = \kappa \cdot \gamma^n \quad (2)$$

$$\sigma = \sigma_0 + \mu_{pl} \cdot \gamma \quad (3)$$

$$\sigma = \sigma_0 + \kappa \cdot \gamma^n \quad (4)$$

Nessas equações, σ (Pa) é a tensão de cisalhamento; γ (s^{-1}) é a taxa de cisalhamento; μ (Pa·s) é a viscosidade newtoniana; σ_0 (Pa) é a tensão de escoamento inicial; μ_{pl} (Pa·s) é a viscosidade plástica; κ (Pa·sⁿ) é o índice de consistência e n (adimensional) é o índice de comportamento do fluido.

2.6 Análise estatística

A precisão do ajuste dos modelos matemáticos foi avaliada pela análise do coeficiente de determinação ajustado (R_{adj}^2) e pelo erro quadrático médio (RMSE), como realizado por Ribeiro-Sanches et al. (2024). A diferença significativa entre os parâmetros médios do melhor modelo foi avaliada por meio da análise de variância (ANOVA), e a diferença entre os resultados médios foi avaliada pelo teste de Tukey, com um nível de confiança de 95%, utilizando o software Statistica 7.0 (Statsoft Inc., EUA).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Composição química

A Tabela 1 apresenta a composição química do leite em diferentes concentrações de sólidos totais.

Tabela 1 – Composição química do leite *in natura* e concentrado

Sólidos totais (%)	Gordura (%)	Proteínas (%)	Água (%)	Cinzas (%)	Lactose (%)
15	6,932 ± 0,034 ^b	3,087 ± 0,015 ^b	84,657 ± 0,319 ^b	0,720 ± 0,006 ^b	4,602 ± 0,310 ^b
20	9,157 ± 0,089 ^c	4,081 ± 0,047 ^c	79,354 ± 0,450 ^c	0,957 ± 0,012 ^c	6,449 ± 0,510 ^c
25	11,379 ± 0,168 ^d	5,066 ± 0,087 ^d	74,520 ± 0,324 ^d	1,182 ± 0,019 ^d	7,850 ± 0,490 ^d
30	13,634 ± 0,193 ^e	6,094 ± 0,088 ^e	69,629 ± 0,524 ^e	1,418 ± 0,025 ^e	9,222 ± 0,690 ^e
35	16,005 ± 0,217 ^f	7,038 ± 0,117 ^f	64,584 ± 0,437 ^f	1,650 ± 0,025 ^f	10,720 ± 0,740 ^f
40	18,120 ± 0,276 ^g	8,065 ± 0,097 ^g	59,464 ± 0,388 ^g	1,892 ± 0,035 ^g	12,457 ± 0,611 ^g
45	20,403 ± 0,314 ^h	9,107 ± 0,148 ^h	54,610 ± 0,350 ^h	2,114 ± 0,044 ^h	13,764 ± 0,748 ^h
50	22,838 ± 0,332 ⁱ	10,062 ± 0,183 ⁱ	49,443 ± 0,378 ⁱ	2,358 ± 0,048 ⁱ	15,297 ± 0,812 ⁱ

Letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam uma diferença significativa de acordo com a Análise de Variância (ANOVA) ($P < 0,05$) e o teste de comparação múltipla de Tukey ($\alpha = 0,05$).

O conteúdo de água apresentou uma redução expressiva, variando de $84,657 \pm 0,319\%$ no leite *in natura* para $49,443 \pm 0,378\%$ na maior concentração avaliada, confirmando a eficiência do processo de concentração e seu impacto direto na intensificação dos constituintes sólidos.

Como esperado, o teor de gordura aumentou gradualmente, passando de $6,932 \pm 0,034\%$ para $22,838 \pm 0,332\%$. Esse comportamento está diretamente relacionado à concentração volumétrica do sistema, uma vez que a gordura do leite de búfala encontra-se majoritariamente na forma de glóbulos dispersos na fase aquosa. A elevação do teor lipídico tem implicações importantes nas propriedades reológicas e sensoriais do produto (SANCHES et al., 2025), uma vez que maiores concentrações de gordura tendem a aumentar a viscosidade aparente e modificar o comportamento de fluxo.

De maneira semelhante, o conteúdo proteico apresentou aumento significativo, variando de $3,087 \pm 0,015\%$ no leite *in natura* 10% de sólidos totais para $10,062 \pm 0,183\%$ no leite concentrado a 50% de sólidos totais. Esse aumento reflete a concentração das proteínas do leite, predominantemente caseínas e proteínas do soro, que desempenham papel fundamental na estruturação do sistema coloidal (GABAS et al., 2012). O aumento da fração proteica favorece interações intermoleculares, como agregação e formação de redes tridimensionais, impactando diretamente as propriedades reológicas, estabilidade térmica e comportamento durante processos subsequentes, como evaporação ou secagem.

O teor de lactose também apresentou elevação expressiva, variando de $4,602 \pm 0,310\%$ a $15,297 \pm 0,812\%$. Como a lactose é um sólido solúvel predominante na fase aquosa, sua concentração acompanha diretamente a remoção de água. Esse aumento é tecnologicamente relevante, pois maiores teores de lactose podem favorecer fenômenos como cristalização durante o resfriamento ou armazenamento, além de influenciar propriedades coligativas, como atividade de água e ponto de ebulição do sistema.

O conteúdo de cinzas aumentou de $0,720 \pm 0,006\%$ para $2,358 \pm 0,048\%$, acompanhando a tendência observada para os demais sólidos. O aumento da concentração mineral pode afetar o equilíbrio iônico do sistema, influenciando a

estabilidade das micelas de caseína, o pH e as interações proteína–proteína e proteína–água, especialmente em concentrações mais elevadas de sólidos totais.

De modo geral, a concentração promoveu o aumento proporcional dos constituintes sólidos, resultando em um produto adequado para aplicações industriais. A ampla faixa de sólidos totais avaliada (10 a 50%) também fornece uma base consistente para correlacionar a composição com as propriedades reológicas, contribuindo para a modelagem e otimização dos processos de concentração e evaporação.

3.2 Comportamento de fluxo

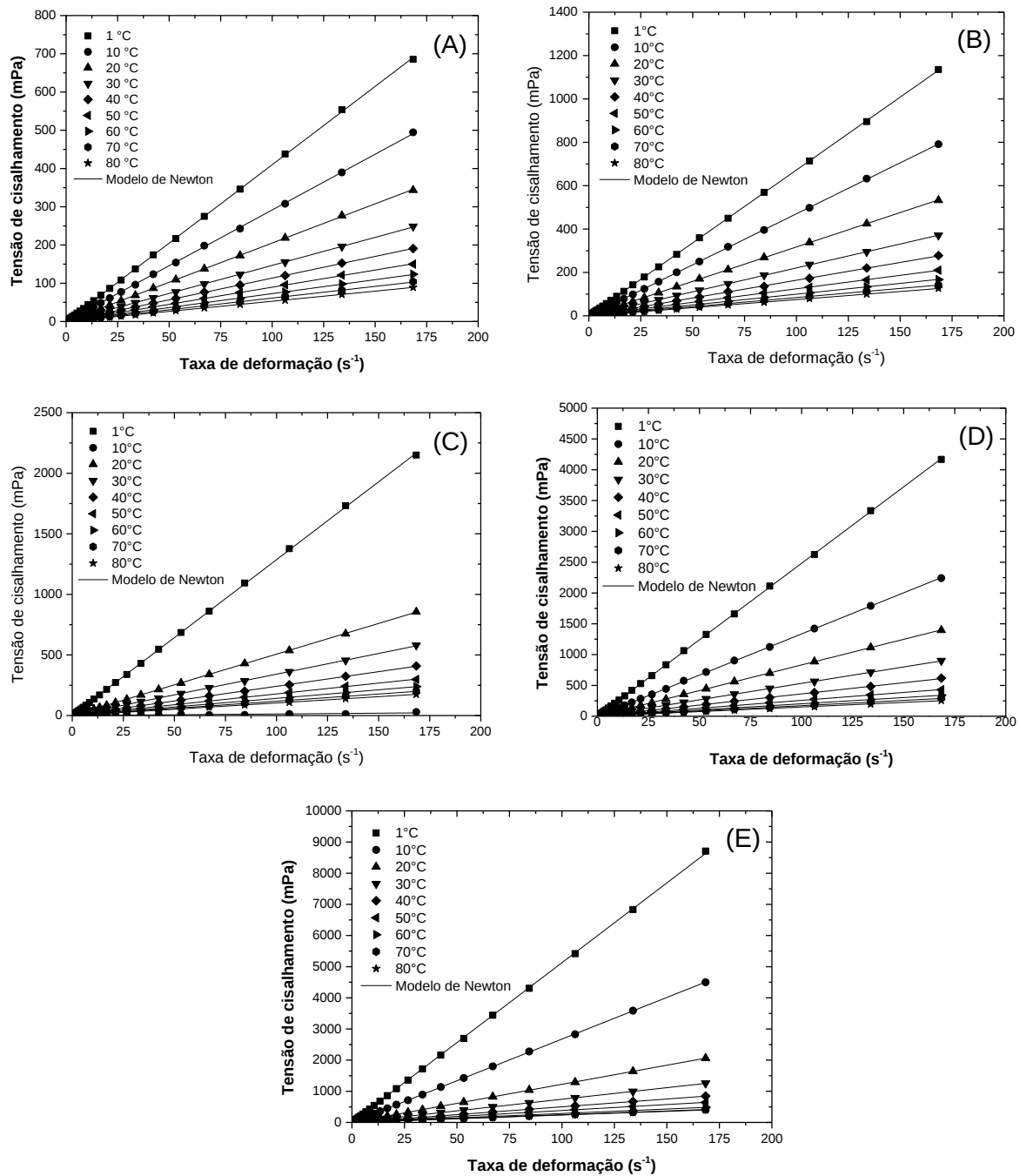
Os dados de tensão de cisalhamento foram obtidos após atingir o equilíbrio para cada taxa fixa de cisalhamento. A tensão de cisalhamento variou de 0,451 mPa a 373,495 mPa na menor taxa de cisalhamento ($0,84\text{ s}^{-1}$) e de 89,127 mPa a 25917,968 mPa na maior taxa de cisalhamento ($168,44\text{ s}^{-1}$). Esses valores tendem a aumentar com a diminuição da temperatura e o aumento da concentração de sólidos.

Os resultados evidenciam que a concentração dos sólidos exerce influência significativa sobre o comportamento reológico dos leites, uma vez que o aumento da quantidade de componentes dispersos na fase líquida favorece a interação entre proteínas, gordura e demais constituintes. Como consequência, ocorre maior resistência ao escoamento, refletida nos valores mais elevados de tensão de cisalhamento observados nas amostras mais concentradas.

A temperatura também desempenha papel fundamental no comportamento de fluxo dos leites. A redução da temperatura promove o aumento das forças intermoleculares e diminui a mobilidade das moléculas presentes no sistema, resultando em maior resistência ao escoamento. Esses resultados demonstram a forte dependência das propriedades reológicas em relação às condições de processamento, destacando a necessidade de controlar adequadamente a temperatura e a concentração durante a produção e o desenvolvimento de produtos lácteos.

A Figura 1 ilustra que a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação dos concentrados de leite de búfala com até 30% de sólidos mostrou um comportamento linear, o que inicialmente indica a característica de fluidos newtonianos.

Figura 1 – Comportamento de fluxo do leite de búfala em diferentes concentrações de sólidos e temperaturas - Domínio Newtoniano

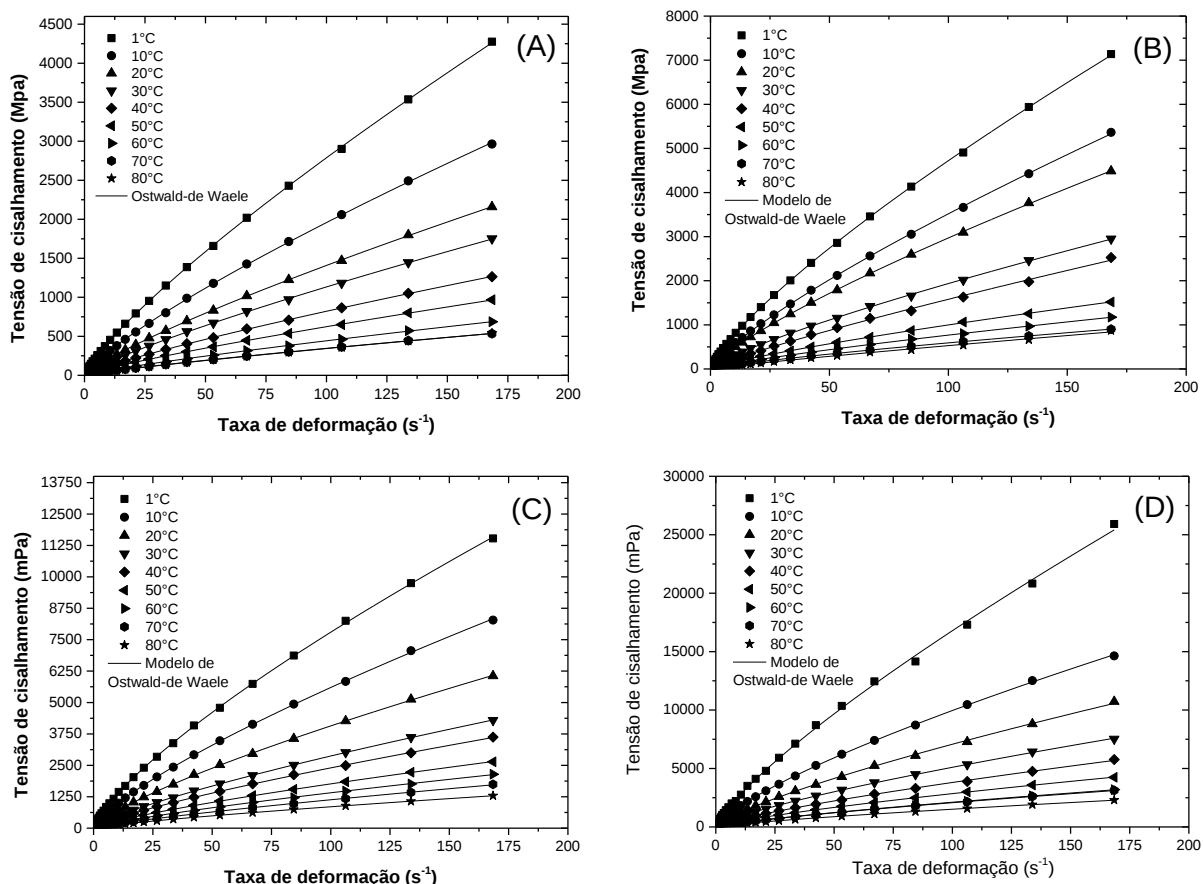


Em que A–E correspondem a amostras contendo 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de sólidos totais, respectivamente.

Entretanto, a partir de 35% de sólidos, a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação (Figura 2) começou a mostrar um comportamento não newtoniano

dos leites de búfala concentrados, apresentando um padrão côncavo para baixo, considerando-os como tipo de fluido com afinamento por cisalhamento (QUEK et al., 2013).

Figura 2 – Comportamento de fluxo do leite de búfala em diferentes concentrações de sólidos e temperaturas - Domínio Não-Newtoniano



Em que A–D correspondem a amostras contendo 35%, 40%, 45% e 50% de sólidos totais, respectivamente.

Quanto a modelagem dos dados, todos os modelos estudados apresentaram bons ajustes aos dados experimentais com coeficientes ajustados de determinação maiores que 0,94, exceto o modelo newtoniano. Os modelos não newtonianos foram mais adequados para descrever o comportamento reológico das amostras analisadas, representando com maior precisão a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação nas diferentes condições experimentais (Tabela 2).

Tabela 2 – Ajustando os modelos reológicos aos dados

Modelo	Equação	R_{Adj}^2	RMSE
Newton	$\sigma = \mu \cdot \gamma$	0,7761–0,9996	0,2654–48,4618
Ostwald-de Waele	$\sigma = \kappa \cdot \gamma^n$	0,9974–0,9999	0,0205–1,2648
Bingham	$\sigma = \sigma_0 + \mu_{pl} \cdot \gamma$	0,9415–0,9996	0,1987–25,6736
Herschel-Bulkley	$\sigma = \sigma_0 + \kappa \cdot \gamma^n$	0,9966–0,9999	0,0678–1,2975

Os modelos de Ostwald–de Waele e Herschel–Bulkley apresentaram melhor precisão no ajuste aos dados experimentais, com valores de $R_{Adj}^2 \geq 0,9966$ e $RMSE \leq 1,2975$. No entanto, o modelo de Ostwald–de Waele demonstrou desempenho superior, uma vez que apresentou valores mais elevados de R_{Adj}^2 e menores valores de RMSE, indicando melhor concordância com os dados experimentais.

Em contraste, o modelo de Bingham apresentou desempenho estatístico inferior, com valores de R_{Adj}^2 variando entre 0,94165 e 0,99974 e valores de RMSE entre 0,18691 e 25,18507. Esses resultados evidenciam menor precisão experimental desse modelo quando comparado aos modelos de Ostwald–de Waele e Herschel–Bulkley, indicando sua menor adequação para descrever o comportamento reológico do leite de búfala concentrado nas condições estudadas.

Embora o modelo de Herschel–Bulkley tenha apresentado resultados estatísticos semelhantes aos obtidos com o modelo de Ostwald–de Waele, observou-se que, em alguns casos, o parâmetro de tensão de escoamento assumiu valores negativos, os quais não possuem significado físico, conforme também relatado por Quek et al. (2013). Esse comportamento limita a aplicabilidade do modelo de Herschel–Bulkley para a interpretação física dos dados, apesar do bom ajuste estatístico.

Adicionalmente, para as concentrações de 10 a 30% de sólidos totais, o índice de comportamento de fluxo (n) do modelo de Ostwald–de Waele apresentou valores próximos da unidade. Nessas condições, o modelo se reduz ao modelo de Newton, caracterizando um comportamento reológico newtoniano do leite de búfala em menores concentrações. Esse resultado indica que, à medida que o teor de sólidos aumenta, o sistema tende a transitar de um comportamento newtoniano para não newtoniano,

reforçando a influência da concentração sobre a estrutura e as interações entre os constituintes do leite.

3.3 Efeito da temperatura e da concentração nos parâmetros reológicos

Os reogramas de leite de búfala foram obtidos com teor de sólidos variando de 10 a 50% em temperaturas de 1-80 °C. As amostras se comportaram como fluidos newtonianos ou não newtonianos, dependendo do teor de sólidos. Na faixa de conteúdo sólido entre 10 e 30%, os reogramas mostraram comportamento newtoniano e a viscosidade, μ , foi calculada a partir do modelo de Newton. Os resultados são mostrados em Tabela 3.

Tabela 3 – Viscosidades do leite de búfala em diferentes concentrações de sólidos e temperaturas - Domínio Newtoniano

Temperatura (°C)	Viscosidade (mPa·s) (% w/w)				
	10	15	20	25	30
1	4,11 ± 0,02 ^{a,E}	6,73 ± 0,05 ^{a,D}	12,82 ± 0,06 ^{a,C}	24,77 ± 0,07 ^{a,B}	51,19 ± 0,44 ^{a,A}
10	2,92 ± 0,01 ^{b,E}	4,71 ± 0,03 ^{b,D}	7,67 ± 0,02 ^{b,C}	13,33 ± 0,04 ^{b,B}	26,70 ± 0,08 ^{b,A}
20	2,05 ± 0,02 ^{c,E}	3,17 ± 0,01 ^{c,D}	5,07 ± 0,01 ^{c,C}	8,31 ± 0,02 ^{c,B}	12,26 ± 0,06 ^{c,A}
30	1,46 ± 0,01 ^{d,E}	2,20 ± 0,01 ^{d,D}	3,42 ± 0,03 ^{d,C}	5,35 ± 0,04 ^{d,B}	7,46 ± 0,05 ^{d,A}
40	1,14 ± 0,01 ^{e,E}	1,64 ± 0,01 ^{e,D}	2,41 ± 0,02 ^{e,C}	3,63 ± 0,02 ^{e,B}	5,01 ± 0,02 ^{e,A}
50	0,90 ± 0,01 ^{f,E}	1,24 ± 0,02 ^{f,D}	1,79 ± 0,02 ^{f,C}	2,57 ± 0,01 ^{f,B}	3,84 ± 0,03 ^{f,A}
60	0,73 ± 0,01 ^{g,E}	0,99 ± 0,01 ^{g,D}	1,42 ± 0,01 ^{g,C}	2,01 ± 0,01 ^{g,B}	2,86 ± 0,03 ^{g,A}
70	0,61 ± 0,01 ^{h,E}	0,84 ± 0,01 ^{h,D}	1,18 ± 0,01 ^{h,C}	1,72 ± 0,01 ^{h,B}	2,45 ± 0,01 ^{h,A}
80	0,53 ± 0,01 ^{i,E}	0,75 ± 0,01 ^{i,D}	1,04 ± 0,01 ^{i,C}	1,49 ± 0,01 ^{i,B}	2,33 ± 0,01 ^{i,A}

Letras maiúsculas diferentes na mesma linha e minúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferenças significativas (P < 0,05) segundo a Análise da Variância e o teste de Tukey.

Em geral, a viscosidade aumentou com o aumento do conteúdo de sólidos e reduziu com o aumento da temperatura. O aumento da temperatura leva as moléculas a um grau maior de agitação, reduzindo a interação intermolecular e facilitando o fluxo do fluido (GUIMARÃES et al., 2020). Por outro lado, o aumento da concentração de sólidos causou maior interação molecular e possivelmente uma formação de agregados, o que aumenta a viscosidade do leite concentrado (MARTINS et al., 2020; RIBEIRO-SANCHES et al., 2024).

Em concentrações superiores a 30% de sólidos totais, os leites concentrados passam a se comportar como sistemas complexos e heterogêneos, nos quais partículas dispersas e estruturas coloidais coexistem em uma fase contínua cada vez mais concentrada. Nesses sistemas, a fase dispersa é composta principalmente por glóbulos de gordura, micelas de caseína, proteínas do soro parcialmente associadas e sais minerais, enquanto a fase contínua é rica em lactose solúvel, minerais e água residual. Durante o processo de concentração, a redução do conteúdo de água intensifica as interações entre esses constituintes, favorecendo a formação de estruturas coloidais e supra-coloidais mais densas e interconectadas.

Além disso, a elevação dos teores de gordura, proteína e lactose resulta em um aumento significativo da fração de componentes de alto peso molecular, especialmente proteínas e agregados proteína–gordura. Quando submetidos ao aumento da taxa de cisalhamento, esses constituintes estruturais tendem a se orientar e reorganizar na direção do escoamento, promovendo a ruptura parcial de aglomerados e a redução das interações intermoleculares. Esse rearranjo estrutural diminui a resistência interna ao fluxo, caracterizando um comportamento pseudoplástico, no qual a viscosidade aparente decresce com o aumento da taxa de cisalhamento.

Em valores de teor total de sólidos mais altos (acima de 30%), o leite de búfala apresentou um comportamento não newtoniano, do tipo pseudoplástico. Isso pode ser atribuído principalmente à presença de gordura, proteínas e outras moléculas complexas produzidas pelo processo de concentração. Nessas condições, as curvas de fluxo foram bem ajustadas pelo modelo Ostwald-De Waele e o índice de comportamento do fluxo, n , e o índice de consistência, K , foram determinados conforme apresentados nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Tabela 4 – Índice de comportamento do leite de búfala em diferentes concentrações de sólidos e temperaturas - Domínio pseudoplástico

Temperatura (°C)	Índice de Comportamento do fluido, n (adimensional)			
	(% w/w)			
	35	40	45	50
1	0,81 ± 0,01 ^{a, C}	0,79 ± 0,02 ^{b, C}	0,76 ± 0,01 ^{c, C}	0,75 ± 0,01 ^{c, C}
5	0,81 ± 0,01 ^{a, C}	0,79 ± 0,02 ^{a, C}	0,76 ± 0,01 ^{ab, C}	0,75 ± 0,02 ^{b, C}
10	0,81 ± 0,01 ^{a, C}	0,79 ± 0,01 ^{ab, C}	0,76 ± 0,02 ^{b, C}	0,76 ± 0,01 ^{b, BC}
15	0,82 ± 0,02 ^{a, BC}	0,79 ± 0,01 ^{ab, C}	0,77 ± 0,01 ^{b, C}	0,76 ± 0,02 ^{b, BC}
20	0,82 ± 0,01 ^{a, BC}	0,80 ± 0,02 ^{ab, BC}	0,78 ± 0,01 ^{b, BC}	0,76 ± 0,01 ^{b, BC}
25	0,82 ± 0,01 ^{a, BC}	0,81 ± 0,02 ^{ab, B}	0,78 ± 0,01 ^{b, BC}	0,76 ± 0,02 ^{b, BC}
30	0,83 ± 0,01 ^{a, AB}	0,81 ± 0,02 ^{ab, B}	0,78 ± 0,02 ^{bc, BC}	0,77 ± 0,01 ^{c, AB}
35	0,84 ± 0,02 ^{a, AB}	0,81 ± 0,01 ^{a, B}	0,78 ± 0,01 ^{b, BC}	0,77 ± 0,01 ^{b, AB}
40	0,84 ± 0,02 ^{a, AB}	0,81 ± 0,01 ^{a, B}	0,78 ± 0,001 ^{b, BC}	0,77 ± 0,02 ^{b, AB}
45	0,84 ± 0,01 ^{a, AB}	0,81 ± 0,01 ^{b, B}	0,78 ± 0,01 ^{c, BC}	0,77 ± 0,01 ^{c, AB}
50	0,84 ± 0,02 ^{a, AB}	0,81 ± 0,02 ^{ab, B}	0,79 ± 0,01 ^{b, BC}	0,77 ± 0,02 ^{b, AB}
55	0,84 ± 0,01 ^{a, AB}	0,81 ± 0,01 ^{b, B}	0,79 ± 0,02 ^{b, BC}	0,78 ± 0,02 ^{b, A}
60	0,84 ± 0,01 ^{a, AB}	0,81 ± 0,01 ^{b, B}	0,79 ± 0,02 ^{b, BC}	0,78 ± 0,02 ^{b, A}
65	0,84 ± 0,00 ^{a, AB}	0,83 ± 0,02 ^{ab, AB}	0,80 ± 0,02 ^{b, AB}	0,79 ± 0,02 ^{b, A}
70	0,84 ± 0,01 ^{a, AB}	0,83 ± 0,03 ^{a, AB}	0,80 ± 0,00 ^{ab, AB}	0,79 ± 0,02 ^{b, A}
75	0,85 ± 0,03 ^{a, A}	0,85 ± 0,02 ^{a, A}	0,81 ± 0,02 ^{ab, A}	0,79 ± 0,02 ^{b, A}
80	0,86 ± 0,02 ^{a, A}	0,85 ± 0,03 ^{a, A}	0,82 ± 0,02 ^{ab, A}	0,79 ± 0,02 ^{b, A}

Letras maiúsculas diferentes na mesma linha e maiúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferenças significativas (P <0,05) segundo a Análise da Variância e o teste de Tukey.

Tabela 5 – Índice de consistência do leite de búfala em diferentes concentrações de sólidos e temperaturas - Domínio pseudoplástico

Temperatura (°C)	Índice de consistência, K (mPa.s ⁿ)			
	(% w/w)			
	35	40	45	50
1	63,95 ± 0,78 ^{d, A}	123,26 ± 12,87 ^{c, A}	234,40 ± 6,72 ^{b, A}	424,87 ± 14,74 ^{a, A}
5	56,40 ± 0,94 ^{d, B}	103,68 ± 2,76 ^{c, B}	200,19 ± 5,76 ^{b, B}	389,47 ± 5,02 ^{a, B}
10	47,32 ± 0,39 ^{d, C}	86,85 ± 8,74 ^{c, C}	166,79 ± 4,25 ^{b, C}	311,78 ± 6,21 ^{a, C}
15	38,66 ± 1,04 ^{d, D}	75,66 ± 2,65 ^{c, D}	151,39 ± 3,08 ^{b, D}	258,31 ± 9,55 ^{a, D}
20	31,71 ± 1,14 ^{d, E}	76,72 ± 3,44 ^{c, D}	116,81 ± 0,57 ^{b, E}	191,64 ± 7,19 ^{a, E}
25	26,03 ± 1,17 ^{d, F}	51,67 ± 5,11 ^{c, E}	103,23 ± 1,16 ^{b, F}	176,64 ± 6,84 ^{a, F}
30	24,12 ± 2,57 ^{d, G}	46,33 ± 4,44 ^{c, F}	80,31 ± 1,33 ^{b, G}	152,70 ± 1,56 ^{a, G}
35	18,02 ± 1,92 ^{d, H}	35,38 ± 3,60 ^{c, G}	71,14 ± 1,52 ^{b, H}	127,79 ± 4,87 ^{a, H}
40	17,80 ± 0,83 ^{d, I}	30,50 ± 5,03 ^{c, G}	64,94 ± 1,40 ^{b, I}	101,67 ± 12,08 ^{a, I}
45	13,57 ± 0,27 ^{d, J}	28,18 ± 0,28 ^{c, H}	50,75 ± 1,09 ^{b, J}	94,06 ± 0,87 ^{a, J}
50	12,74 ± 1,34 ^{d, K}	24,30 ± 0,60 ^{c, I}	48,00 ± 1,16 ^{b, K}	81,38 ± 1,72 ^{a, K}
55	10,72 ± 0,30 ^{d, L}	20,97 ± 0,52 ^{c, J}	42,82 ± 0,45 ^{b, L}	69,03 ± 2,00 ^{a, L}
60	8,89 ± 1,01 ^{d, M}	18,23 ± 0,34 ^{c, K}	35,34 ± 3,98 ^{b, M}	56,21 ± 5,80 ^{a, M}
65	8,15 ± 0,12 ^{d, M}	18,58 ± 0,46 ^{c, K}	30,65 ± 2,94 ^{b, N}	56,25 ± 5,62 ^{a, M}
70	7,14 ± 0,09 ^{d, N}	14,10 ± 0,37 ^{c, L}	25,49 ± 2,88 ^{b, O}	49,95 ± 4,93 ^{a, N}
75	7,31 ± 0,19 ^{d, N}	11,94 ± 1,16 ^{c, M}	22,76 ± 0,19 ^{b, O}	43,83 ± 0,42 ^{a, O}
80	6,51 ± 0,67 ^{d, O}	8,22 ± 0,56 ^{c, N}	21,61 ± 0,23 ^{b, P}	39,27 ± 4,12 ^{a, P}

Letras maiúsculas diferentes na mesma linha e maiúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferenças significativas (P <0,05) segundo a Análise da Variância e o teste de Tukey.

O índice de comportamento mostrou valores variando de 0,75 a 0,86, ou seja, menor que 1, indicando que, nessa faixa de concentração e temperatura, o leite de búfala concentrado se comporta como um fluido pseudoplástico (afinamento por cisalhamento). O índice de consistência variou de 6,51 até 424,87 mPa·sⁿ e, assim como a viscosidade newtoniana, diminuiu com o aumento da temperatura e aumentou com o aumento do conteúdo de sólidos.

A avaliação do índice de consistência do leite de búfala, não apenas em diferentes temperaturas, mas também ao longo de uma ampla faixa de teores de sólidos totais, é fundamental para o adequado dimensionamento e operação de processos industriais, especialmente aqueles envolvendo evaporação, concentração e tratamento térmico. Em sistemas lácteos concentrados, o aumento do índice de consistência está diretamente associado à maior resistência ao escoamento em tubulações e trocadores de calor, o que pode resultar em redução da vazão, elevação do tempo de residência e intensificação do aquecimento durante a pasteurização (QUEK et al., 2013).

Consequentemente, o aumento do índice de consistência do leite de búfala concentrado pode demandar tempos de pasteurização mais longos e levar a um maior consumo energético, impactando negativamente a eficiência do processo. Por outro lado, o tempo de residência e as condições térmicas devem ser cuidadosamente otimizados, uma vez que o superprocessamento térmico pode comprometer atributos importantes de qualidade do leite, como a estabilidade proteica, características sensoriais e valor nutricional. Assim, o conhecimento do comportamento do índice de consistência em função da temperatura e da concentração de sólidos torna-se essencial para o equilíbrio entre segurança microbiológica, qualidade do produto e eficiência energética do processo.

4 CONCLUSÕES

O comportamento reológico do leite de búfala foi determinado principalmente pelo teor de sólidos totais e pela temperatura. Para concentrações entre 10 e 30% de sólidos, o leite apresentou comportamento newtoniano em toda a faixa de temperatura avaliada (1 a 80 °C), sendo o modelo de Newton o mais adequado para descrever o escoamento

nessas condições. Em concentrações mais elevadas, entre 35 e 50% de sólidos totais, observou-se comportamento pseudoplástico sem tensão de escoamento, com o modelo de Ostwald–de Waele apresentando o melhor ajuste aos dados experimentais.

A viscosidade newtoniana e o índice de consistência aumentaram com o incremento do teor de sólidos e diminuíram com o aumento da temperatura, refletindo a influência direta da concentração e do efeito térmico sobre o escoamento do leite concentrado. Esses resultados permitem a seleção adequada de modelos reológicos em função da concentração, fornecendo subsídios diretos para o dimensionamento e a otimização de processos industriais envolvendo leite de búfala concentrado.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, L. A. P., FONTAN, R. C. I., CRISTINA, R., BONOMO, F., DE SOUZA, E. C., SAMPAIO, V. S., PEREIRA, R. G. (2012). Density and dynamic viscosity of bovine milk affect by temperature and composition. **International Journal of Food Engineering**, 8(1). <https://doi.org/10.1515/15563758>.

ANINDITA, L., CHANG, J., AL-RASJID, G. A. P. H., RAHMAT, E. (2026). Characterization and health effects of functional bioactives from West Sumatra's fermented buffalo milk (dadih). **Food Chemistry Advances**, 10, 101210. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHA.2025.101210>

AOAC INTERNATIONAL. **Official methods of analysis of AOAC International**. 18. ed. Gaithersburg: AOAC International, 2005.

BIENVENUE, A., JIMÉNEZ-FLORES, R., SINGH, H. (2003). Rheological Properties of Concentrated Skim Milk: Importance of Soluble Minerals in the Changes in Viscosity During Storage. **Journal of Dairy Science**, 86(12), 3813–3821. [https://doi.org/10.3168/JDS.S0022-0302\(03\)73988-5](https://doi.org/10.3168/JDS.S0022-0302(03)73988-5)

EVANGELISTA, R. R., SANCHES, M. A. R., DE CASTILHOS, M. B. M., CANTÚ-LOZANO, D., TELIS-ROMERO, J. (2020). Determination of the rheological behavior and

thermophysical properties of malbec grape juice concentrates (*Vitis vinifera*). **Food Research International**, 137, 109431.

<https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2020.109431>

GABAS, A. L., ALEXANDRE, R., CABRAL, F., FERNANDES DE OLIVEIRA, C. A., TELIS-ROMERO, J. (2012). Density and rheological parameters of goat milk. **Food Science and Technology**, 32(2), 381–385.

<https://doi.org/10.1590/S0101-20612012005000033>

GOVINDAPPA, B. K., VILAS, B. P., MEENA, G. S., ARORA, S., SHARMA, H., SINGH, A. K., DESHWAL, G. K. (2026). Effect of sodium hexametaphosphate and trisodium citrate on the heat stability, rheological and functional properties of microfiltered retentate of buffalo milk. **International Dairy Journal**, 176, 106559.

<https://doi.org/10.1016/J.IDAIRYJ.2026.106559>

GUIMARÃES, B., MARTINS, M. J. N., FLAUZINO, R. D., BASSO, R. C., TELIS ROMERO, J. (2020). Thixotropy of sweetened condensed milk applied to flow fluid dynamics analysis of cylindrical pipes. **Journal of Food Process Engineering**, 43(6), e13397. <https://doi.org/10.1111/JFPE>.

IAL - Instituto Adolfo Lutz. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4 ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020 p.

KARLSSON, A. O., IPSEN, R., SCHRADER, K., ARDÖ, Y. (2005). Relationship Between Physical Properties of Casein Micelles and Rheology of Skim Milk Concentrate. **Journal of Dairy Science**, 88(11), 3784–3797.

[https://doi.org/10.3168/JDS.S0022-0302\(05\)73064-2](https://doi.org/10.3168/JDS.S0022-0302(05)73064-2)

LI, L., YANG, G., WANG, N., BIAN, J., Li, Y., HUANG, A., WEI, G., WANG, X. (2026). Quality evaluation of low-fat buffalo milk yogurt using ultrasound combined with microbial transglutaminase treatment. **International Journal of Biological Macromolecules**, 337, 149555. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2025.149555>

LIAO, J., YANG, J., SUO, H., SONG, J. (2025). Buffalo milk: nutritional composition, bioactive properties, and advances in processing technologies-a comprehensive review. **Food Chemistry: X**, 29, 102647. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHX.2025.102647>

MARTINS, M. J. N., GUIMARÃES, B., POLACHINI, T. C., TELIS-ROMERO, J. (2020). Thermophysical properties of carbohydrate solutions: Correlation between thermal and transport properties. **Journal of Food Process Engineering**, 43(9), e13483. <https://doi.org/10.1111/JFPE.13483>

QUEK, M. C., CHIN, N. L., YUSOF, Y. A. (2013). Modelling of rheological behaviour of soursop juice concentrates using shear rate–temperature–concentration superposition. **Journal of Food Engineering**, 118(4), 380–386. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2013.04.025>

RIBEIRO-SANCHES, M. A., STOCHI, V. A. L., BORGES-MACHADO, A. L., AUGUSTO, P. E. D., POLACHINI, T. C., TELIS-ROMERO, J. (2024). Valorization of brewer's spent grains (BSG) through alkaline hydrogen peroxide processing: Effect on composition, structure and rheological properties. **Food and Bioproducts Processing**, 147, 239–250. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2024.07.008>

SANCHES, H. C., DOS SANTOS, A. S., GONSALES, B. H. P., BORGES-MACHADO, A. L., RIBEIRO-SANCHES, M. A., TELIS-ROMERO, J., PENNA, A. L. B. (2025). Rheological Behavior of Milk From Different Species as a Function of Chemical Composition and Temperature: An Engineering Basis for Milk Processing. **Journal of Food Process Engineering**, 48(11), e70237. <https://doi.org/10.1111/jfpe.70237>

VÉLEZ-RUIZ, J. F., BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. (1998). Rheological properties of concentrated milk as a function of concentration, temperature and storage time. **Journal of Food Engineering**, 35(2), 177–190. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00019-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00019-3)

VÉLEZ-RUIZ, J. F., BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. (2000). Flow and structural characteristics of concentrated milk. **Journal of Texture Studies**, 31(3), 315–333. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2000.tb00293.x>

8 CONCLUSÃO GERAL

A presente tese teve como objetivo a caracterização físico-química, termofísica e reológica de leites de diferentes espécies, com foco nas implicações dessas propriedades para o processamento térmico e o projeto de operações industriais. De forma integrada, os resultados obtidos evidenciam que a espécie animal, a temperatura e o teor de sólidos exercem influência determinante sobre o comportamento físico e tecnológico dos leites, reforçando a necessidade de abordagens específicas para cada matéria-prima no contexto da engenharia de processos.

A caracterização da composição química demonstrou diferenças importantes entre os leites de vaca, cabra, búfala e ovelha, tanto na condição in natura quanto após o processo de concentração. Os leites de búfala e ovelha destacaram-se pelos maiores teores de gordura, proteínas e sólidos totais, enquanto os leites de vaca e cabra apresentaram maiores teores de carboidratos e cinzas. O processo de concentração intensificou essas diferenças, evidenciando o potencial tecnológico dos leites de búfala e ovelha para a produção de derivados de maior valor agregado e fornecendo um banco de dados consistente e relevante para aplicações industriais.

A análise das propriedades termofísicas revelou que todas as propriedades avaliadas apresentaram dependência significativa da temperatura, com aumento do calor específico, da condutividade térmica e da difusividade térmica e redução da densidade ao longo da faixa estudada. Os leites de vaca e cabra apresentaram valores mais elevados dessas propriedades em comparação aos leites de búfala e ovelha, comportamento diretamente associado às diferenças na composição química, especialmente ao teor de gordura e à fração aquosa. A modelagem matemática mostrou que os modelos polinomiais de segunda ordem descrevem adequadamente a maioria das propriedades, fornecendo equações preditivas úteis para a simulação, o projeto e a otimização de processos térmicos.

A caracterização reológica do leite de búfala concentrado evidenciou que o comportamento de escoamento é fortemente governado pelo teor de sólidos totais e pela temperatura. Em baixas concentrações, o leite apresentou comportamento newtoniano, enquanto em concentrações mais elevadas ocorreu a transição para comportamento

pseudoplástico, adequadamente descrito pelo modelo de Ostwald–de Waele. A viscosidade e o índice de consistência aumentaram com o incremento da concentração e diminuíram com o aumento da temperatura, fornecendo subsídios diretos para a seleção de modelos reológicos, o dimensionamento de equipamentos e a otimização de operações industriais.

De forma geral, esta tese integra composição, propriedades termofísicas e reologia para ampliar o entendimento do comportamento de leites de diferentes espécies sob condições de processamento. Os dados e modelos obtidos fornecem base técnica para o projeto, a simulação e a otimização de processos térmicos na indústria de laticínios, favorecendo o uso eficiente de leites de espécies alternativas e a melhoria do desempenho dos produtos lácteos.

REFERÊNCIAS

Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa 62 de 29 de dezembro de 2011. Dispõe sobre regulamentos técnicos de produção, identidade, qualidade, coleta e transporte do leite. Diário Oficial da União, Brasília, Seção 1, 30 dez. 2011.

COSTA, A. R. **Propriedades termofísicas, reológicas e interfaces de leite e soro bovinos concentrados em evaporador a vácuo**. 2014. 75 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa, Minas Gerais, 2014.

EMBRAPA. **Anuário Leite 2025**. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2025. 65 p.

EVANGELISTA, R. R.; SANCHES, M. A. R.; DE CASTILHOS, M. B. M.; CANTÚ-LOZANO, D.; TELIS-ROMERO, J. Determination of the rheological behavior and thermophysical properties of malbec grape juice concentrates (*Vitis vinifera*). **Food Research International**, [s. l.], v. 137, n. 109431, p. 109431, 2020.

FAO - **Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2025**. Disponível em: <<http://www.fao.org/corp/statistics/es/>>. Acesso em: 15 mar. 2026.

ORDÓÑEZ, Juan A. **Tecnologia de Alimentos: Alimentos de origem animal**. v.2. Porto Alegre: Artmed, 2005.

ROBINSON, R.; ITSARANUWAT, P. Dairy Microbiology Handbook: **The Microbiology of Milk and Milk Products**, Third Edition. p. 175-211, 2005.

SILVA, Laíse Teles da Silva. **Propriedades Termofísicas e Comportamento Reológico do leite e do soro de búfala**. 2014. 75 p. Mestrado (Engenharia e Ciência De Alimentos Campus Juvino Oliveira) - Universidade Estadual Do Sudoeste Da Bahia – UESB, Itapetinga, 2014.

APÊNDICE A – SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados obtidos nesta tese, estudos futuros podem ser conduzidos com o objetivo de ampliar a compreensão do comportamento físico e térmico de leites de diferentes espécies, bem como aprofundar a aplicação dos dados gerados em contextos industriais.

Como perspectivas para trabalhos futuros, sugere-se a ampliação do escopo desta pesquisa por meio da determinação das propriedades termofísicas — densidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica — dos leites concentrados de vaca, cabra, búfala e ovelha, em diferentes teores de sólidos totais e faixas de temperatura. Esses estudos permitiriam a comparação direta entre leites in natura e concentrados, bem como a avaliação do efeito da concentração sobre o comportamento térmico dessas matrizes.

Adicionalmente, recomenda-se a investigação do comportamento reológico dos leites concentrados de vaca, cabra e ovelha, em condições semelhantes às avaliadas para o leite de búfala. A obtenção desses dados possibilitaria uma análise comparativa entre espécies, contribuindo para a compreensão das diferenças estruturais e de escoamento associadas à composição específica de cada leite e ampliando a aplicabilidade dos resultados para o desenvolvimento e a otimização de processos industriais.