



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA – UESB
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE
ALIMENTOS

Área de Concentração: Ciência de Alimentos

ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO E
MÉDIO APLICADA À CLASSIFICAÇÃO DO TEMPO
MATURAÇÃO DE QUEIJOS MINAS ARTESANAIS DO
ARAXÁ E DA SERRA DA CANASTRA

Autor: Juciana dos Santos Ferreira

Orientadora: DSc. Sibelli Passini Barbosa Ferrão

Co-orientador: Prof. DSc. Leandro Soares Santos

ITAPETINGA
BAHIA - BRASIL

2026

JUCIANA DOS SANTOS FERREIRA

**ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO E
MÉDIO APLICADA À CLASSIFICAÇÃO DO TEMPO
MATURAÇÃO DE QUEIJOS MINAS ARTESANAIS DO
ARAXÁ E DA SERRA DA CANASTRA**

Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências de Alimentos da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências de Alimentos.

Orientadora: DSc. Sibelli Passini Barbosa Ferrão

Co-orientador: Prof. DSc. Leandro Soares Santos

**ITAPETINGA
BAHIA - BRASIL**

2026

637.3 F441e	Ferreira, Juciana dos Santos. Espectroscopia no infravermelho próximo e médio aplicada à classificação do tempo maturação de queijos minas artesanais do Araxá e da Serra da Canastra. / Juciana dos Santos Ferreira - Itapetinga: UESB, 2026. 76f. Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências de Alimentos da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências de Alimentos. Área de Concentração em Ciência de Alimentos. Sob a orientação da Prof.^a D. Sc. Sibelli Passini Barbosa Ferrão e coorientação do Prof. D. Sc. Leandro Soares Santos. 1. Maturação de queijo. 2. Queijo minas artesanal – Análise multivariada. 3. Queijo minas artesanal – Processo de cura. I. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia. Programa de Pós-Graduação <i>Stricto Sensu</i> em Engenharia e Ciência de Alimentos. II. Ferrão, Sibelli Passini Barbosa. III. Santos, Leandro Soares. IV. Título. CDD (21): 637.3
----------------	--

Catálogo na fonte:

Adalice Gustavo da Silva – CRB/5-535
Bibliotecária – UESB – Campus de Itapetinga-BA

Índice Sistemático para Desdobramento por Assunto:

1. Queijo artesanal – Fabricação



Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB
Recredenciada pelo Decreto Estadual
Nº 16.825, de 04.07.2016



Governo do
Estado da Bahia

DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

Título: “ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO E MÉDIO APLICADA À CLASSIFICAÇÃO DO TEMPO DE MATURAÇÃO DE QUEIJOS MINAS ARTESANAIS DO ARAXÁ E DA SERRA DA CANASTRA.”

Autor (a): JUCIANA DOS SANTOS FERREIRA

Orientador (a): Prof.^a Dr.^a Sibelli Passini Barbosa Ferrão

Coorientador (a): Leandro Soares Santos

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de **MESTRE EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE ALIMENTOS, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: CIÊNCIA DE ALIMENTOS**, pela Banca Examinadora.

Prof.ª Dr.ª Renata Cristina Ferreira Bonomo
(UESB)

Prof. Dr. Ben-Hur Ramos Ferreira Gonçalves
(UFSB)

Prof.ª Dr.ª Sibelli Passini Barbosa Ferrão
Orientadora - UESB
Presidente da Banca

Itapetinga-BA, 27 de fevereiro de 2026.

“Para tudo há um tempo: tempo de plantar e tempo de colher o que se semeou (Eclesiastes 3). Esse ciclo se manifesta por meio dos processos pelos quais passamos. É assim com a borboleta, que precisa romper o casulo; com a uva, que é esmagada para se tornar o melhor vinho; e com a pedra preciosa, que só revela seu brilho após ser lapidada”

A Deus.

À minha filha, Hanna.

À minha família e aos meus amigos.

Dedico.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, o único digno de toda glória.

À minha primogênita, Hanna, agradeço pela paciência e pelo incentivo; mesmo com a pouca idade, você já me transmitia a “energia” necessária para continuar buscando meus objetivos e obter êxito.

À minha família, em especial à minha irmã Mara, meu muito obrigada por todo o apoio e ajuda para que eu continuasse lutando pelos meus sonhos.

Aos meus amigos, tanto da vida acadêmica quanto fora dela, que em diversos momentos me trouxeram a calma necessária para seguir em frente. Um agradecimento especial à Solane (a Sol, para os íntimos), minha eterna professora de graduação e colega de pós-graduação, que tanto me incentivou e a quem atribuo forças por ter acreditado no meu potencial para o mestrado. Ao meu amigo e colega de jornada desde a graduação, Alisson, que levarei para toda a vida.

Aos meus professores da pós-graduação, agradeço pelos ensinamentos, conselhos e orientações. Em especial à Renata Bonnomo, por todo o direcionamento, e ao Leandro Soares, por compartilhar tanto conhecimento sobre estatística.

Por fim, agradeço à minha orientadora Sibelli Passini pelos ensinamentos, pelas conversas e por ter aguçado o meu senso crítico ao longo desta trajetória.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xii
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
CAPÍTULO I REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
1.INTRODUÇÃO.....	19
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	22
2.1 Queijo Artesanal.....	22
2.2 Desafio da comercialização.....	22
2.3 Produção dos queijos artesanais	22
2.4 Regiões Produtoras	23
2.4.1 Queijos Serra da Canastra	23
2.4.2 Queijos do Araxá.....	25
2.5 Legislação vigentes para comercialização dos queijos artesanais.....	26
2.6 Fabricação dos queijos artesanais.....	27
2.7 Maturação.....	29
2.8 Bactérias do Ácido Lático (BAL) e Bactéria Não Iniciadora (NSLAB)	30
2.9 Processos que ocorrem durante a maturação dos queijos.....	31
2.9.1 Proteólise, lipólise e glicólise.....	31
2.10 Espectroscopia de Infravermelho.....	35
2.11 Quimiometria.....	37
CAPÍTULO II OBJETIVOS.....	41
3. OBJETIVOS.....	42
3.1 Objetivo geral.....	42
3.2 Objetivos específicos.....	42
CAPÍTULO III MATERIAIS e MÉTODOS.....	43
4.MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
4.1 Aquisição das amostras.....	44
4.2 Espectroscopia por Infravermelho Médio (MIR)	44
4.3 Espectroscopia por Infravermelho Próximo (NIR)	44
4.4 Análise Estatística.....	45
4.4.1 Análises Exploratórias de Dados.....	45
4.4.2 Classificação e construção dos modelos.....	45

4.4.3 SIMCA.....	46
4.4.4 PLS-DA.....	47
CAPÍTULO IV RESULTADOS e DISCUSSÃO.....	48
5.1 ESPECTROS MIR E NIR DOS QUEIJOS ARTESANAIS.....	49
5.2 Análise de Componentes Principais (ACP) do MIR.....	53
5.3 Análise de Componentes Principais (ACP) do NIR.....	54
5.3 PLS-DA.....	55
5.4 SIMCA.....	61
CAPÍTULO V CONCLUSÕES.....	64
6.CONCLUSÃO.....	65
CAPÍTULO VI REFERÊNCIAS.....	66
7.REFERÊNCIAS.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Capacidade de precisão, especificidade e sensibilidade do modelo PLS-DA para amostras de queijos Minas Artesanais do Araxá e Serra da Canastra ao longo do período de maturação, utilizando MIR e NIR.	56
Tabela 2- Matriz de confusão para amostras de queijos artesanais do Araxá e Serra da Canastra de calibração e validação com base em modelos PLS-DA, considerando dados NIR e MIR..	60
Tabela 3- Capacidade de precisão, especificidade e sensibilidade do modelo SIMCA para amostras de queijos Araxá e Serra da Canastra utilizando MIR e NIR.....	61
Tabela S1- Resultados da capacidade de precisão, especificidade e sensibilidade dos dados MIR e NIR do queijo Serra da Canastra com todos os pré-processamento aplicado no SIMCA....	77
Tabela S 2- Resultados da capacidade de precisão, especificidade e sensibilidade dos dados MIR e NIR do queijo Serra da Canastra com todos os pré-processamento aplicado no PLS-DA.	78
Tabela S 3- Resultados da capacidade de precisão, especificidade e sensibilidade dos dados MIR e NIR do queijo Araxá com todos os pré-processamento aplicado no SIMCA.....	79
Tabela S 4- Resultados da capacidade de precisão, especificidade e sensibilidade dos dados MIR e NIR do queijo Araxá com todos os pré-processamento aplicado no PLS-DA.	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Mapa das Microrregiões produtoras de queijos artesanais de Minas Gerais.	23
Figura 2- Queijo da Serra da Canastra.....	24
Figura 3- Queijo do Araxá.....	25
Figura 4- Processo da proteólise que ocorre durante a maturação	32
Figura 5- Processo da lipólise que ocorre durante a maturação	34
Figura 6- Tipos de vibrações moleculares.....	37
Figura 7- Espectros de infravermelho médio (MIR) de queijos artesanais de Araxá (A) e Serra da Canastra (B) em diferentes tempos de maturação.	49
Figura 8- Espectros de infravermelho próximo (NIR) de queijos artesanais de Araxá (A) e Serra da Canastra (B) em diferentes tempos de maturação.	51
Figura 9- Análise de componentes principais (ACP) de queijos Minas Artesanais do Araxá e Serra da Canastra maturados em seis tempos diferentes (1, 7, 14, 28, 42 e 56 dias) por Espectroscopia de Infravermelho médio. (A) Araxá e (B) Serra da Canastra.....	53
Figura 10- Análise de componentes principais (ACP) de queijos Minas Artesanais do Araxá e Serra da Canastra maturados em seis tempos diferentes (1, 7, 14, 28, 42 e 56 dias) por Espectroscopia de Infravermelho próximo. (A) Araxá e (B) Canastra.	54

RESUMO

FERREIRA, J. D. S. Espectroscopia no infravermelho próximo e médio aplicada à classificação do tempo maturação de queijos Minas Artesanais do Araxá e da Serra da Canastra. Itapetinga, BA: UESB, 2026. 76 p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos, Área de Concentração em Ciência de Alimentos).*

O tempo de maturação é um requisito sanitário e legal crítico para a comercialização de Queijos Minas Artesanais (QMA), pois garante a segurança microbiológica e o desenvolvimento das características sensoriais típicas. Nesse sentido, objetivou-se desenvolver modelos quimiométricos, por meio da espectroscopia MIR e NIR, para a classificação de queijos Minas Artesanais do Araxá e da Serra da Canastra de acordo com o tempo de maturação. Os QMA foram obtidos das regiões do Araxá (n=66) e Canastra (n=84), Minas Gerais, Brasil, diretamente dos produtores, em 6 diferentes tempos (1, 7, 14, 28, 42 e 56 dias). Os dados obtidos foram submetidos à Análise de Componentes Principais (ACP), Análise de Modelagem Suave Independente de Classe (SIMCA) e Análise Discriminante pelo Método de Quadrados Mínimos Parciais (PLS-DA). Os resultados de MIR refletiram alterações em aminos/amidas, ácidos graxos e carboidratos, correlacionando-as aos eventos de proteólise, lipólise e glicólise. No NIR, a alta sensibilidade às ligações de hidrogênio permitiu uma nítida separação entre queijos conformes (14, 28, 42 e 56 dias) e não conformes (1, 7 e 14 dias). A ACP explicou mais de 97% da variância no NIR, evidenciando o processo da perda de umidade e maturação acelerada em queijos do Araxá, enquanto na região da Serra da Canastra apresentaram maior complexidade e sobreposição espectral inicial. Os modelos de classificação foram altamente eficazes, com destaque para o PLS-DA (NIR), que atingiu 100% de sensibilidade, especificidade e precisão para as amostras do Araxá. O SIMCA (MIR) também apresentou 100% de confiabilidade na generalização do modelo. A aplicação das técnicas espectroscópicas MIR e NIR combinadas com a quimiometria foram eficientes para diferenciar os tempos de maturação dos QMA das regiões estudadas, além disso os resultados podem ser utilizados como parâmetros para os queijos artesanais dos estados reconhecidos pelo IMA das regiões analisadas.

Palavras-chave: Maturação de queijos; Espectroscopia; PLS-DA; SIMCA; Araxá ; Canastra;

*Orientador: DSc. UESB Sibelli Passini Barbosa Ferrão; Co-orientador (a) DSc. UESB Leandro Soares Santos.

ABSTRACT

FERREIRA, J. D. S. Near and middle infrared spectroscopy applied to the time-of-maturation classification of cheeses Minas Artesanais do Araxá and Serra da Canastra. Itapetinga, BA: UESB, 2026. 76 p. Dissertation. (Master's in Food Engineering and Science, Area of Concentration in Food Science).*

The maturation time is a critical sanitary and legal requirement for the marketing of Queijos Minas Artesanais (QMA), as it ensures microbiological safety and the development of typical sensory characteristics. In this sense, the objective was to develop chemometric models, through MIR and NIR spectroscopy, for the classification of Minas Artesanais cheeses from Araxá and Serra da Canastra according to maturation time. The QMA were obtained from the regions of Araxá (n=66) and Canastra (n=84), Minas Gerais, Brazil, directly from the producers, in 6 different times (1, 7, 14, 28, 42 and 56 days). The data obtained were submitted to the Principal Component Analysis (ACP), Class Independent Smooth Modeling Analysis (SIMCA) and Discriminant Analysis by the Partial Minimum Squares Method (PLS-DA). The MIR results reflected changes in amines/amides, fatty acids and carbohydrates, correlating them to proteolysis, lipolysis and glycolysis events. In the NIR, high sensitivity to hydrogen bonds allowed a clear separation between compliant (14, 28, 42 and 56 days) and non-compliant cheeses (1, 7 and 14 days). The ACP explained more than 97% of the variance in the NIR, evidencing the process of moisture loss and accelerated maturation in cheeses from Araxá, while in the region of Serra da Canastra presented greater complexity and initial spectral overlap. The classification models were highly effective, with emphasis on PLS-DA (NIR), which achieved 100% sensitivity, specificity and accuracy for the samples of Araxá. The SIMCA (MIR) also presented 100% reliability in the generalization of the model. A aplicação das técnicas espectroscópicas MIR e NIR combinadas com a quimiometria foram eficientes para diferenciar os tempos de maturação dos QMA das regiões estudadas, além disso os resultados podem ser utilizados como parâmetros para os queijos artesanais dos estados reconhecidos pelo IMA das regiões analisadas.

Keywords: Cheese maturation; spectroscopy; PLS-DA; SIMCA; Araxá ; Canastra.

*Supervisor: DSc. UESB Sibelli Passini Barbosa Ferrão; Co- Supervisor: DSc. UESB Leandro Soares Santos.

CAPÍTULO I: REFERENCIAL TEÓRICO

1 INTRODUÇÃO

O queijo Minas Artesanal é produzido a partir do leite cru, adicionado de coagulante, “pingo” (fermento natural) e sal. Além disso, o queijo passa pelo processo da maturação que deve seguir as portarias específicas de cada região, que devem ocorrer sob as condições ambientais da fazenda produtora. Embora as etapas de fabricação sejam semelhantes entre as variedades, as características sensoriais de cada queijo são influenciadas por fatores edafoclimáticos, tais como o clima, a vegetação, o perfil do solo e a genética do gado leiteiro (PERIN et al., 2017).

Tal importância dada aos queijos artesanais está relacionado o impacto que esse produto trouxe para o Brasil como melhoria nos aspectos econômico, social e histórico para os produtores, região e país. A partir da inserção desse produto houve desenvolvimento de empregos, impulso ao turismo local e os queijos passaram a ter uma identidade cultural única. Isso fez com que despertasse nos consumidores o interesse em consumi-los cada vez mais. Os queijos feitos a partir do leite cru apresentam como características sabores intensos quando comparados aos queijos tradicionais devido a não passaram pelo processo de pasteurização, pois conseguem manter enzimas endógenas (proteolíticas e lipolíticas) e Bactérias ácido lácticas (BAL) e Bactérias Ácido Lácticas não Iniciadoras (NSLAB) presentes no leite, que são importantes para garantir aspectos sensoriais como aroma, textura e sabor próprio do produto. Por conta disso, as regulamentações municipais, estaduais e do âmbito federal são constantemente alterados para assegurar que os produtos artesanais estejam livres de contaminantes que venham prejudicar a saúde do consumidor (KAMIMURA et al., 2019).

A legislação Brasileira, através da lei nº 13.860, de 18 de julho de 2019, dispõe sobre a elaboração e comercialização de queijos artesanais, e estabelece como regra que o tempo de maturação seja definido com base no processo tecnológico de produção de cada variedade de queijo. Além disso, determina requisitos sanitários para o estabelecimento manter a produção, de modo a garantir a segurança e saúde do consumidor, por se tratar de um produto feito a partir do leite cru (BRASIL, 2019).

A região que mais produz queijos artesanais no Brasil é o Sudeste, principalmente o estado de Minas Gerais, com uma produção anual de cerca de 40 mil toneladas. Em Minas Gerais, a produção é dividida em dez microrregiões como: Araxá, Campo das Vertentes, Cerrado, Serra da Canastra, Serra do Salitre, Serro, Triângulo Mineiro, Serras da Ibitipoca, Diamantina e Entre Serras da Piedade ao Caraça (IMA, 2024).

Os queijos artesanais produzidos nessas regiões, atendem a portaria específica do estado,

a portaria IMA nº 2322, 19 de Agosto de 2024 (IMA, 2024) que estabelece o período mínimo de maturação do queijo artesanal produzido na microrregião da Serra da Canastra, Araxá e Serra do Salitre de 14 (quatorze) dias.

Os queijos são produtos que recebem suas denominações conforme os ingredientes utilizados, e também de acordo com a região em que são fabricados, cada qual com sua particularidade e suas características únicas e tradicionais. Diante desse cenário, observa-se um crescente interesse em proteger produtos vinculados a regiões geográficas específicas. Essa forma de proteção, é conhecida como Indicação Geográfica (IG) (PEREIRA et al., 2020).

No Brasil, a IG é dividida em duas modalidades: Indicação de Procedência (IP) e Denominação de Origem (DO). Queijos que possuem DO, só podem ser produzidos na região de origem seguindo os métodos tradicionais de fabricação. Já os queijos que possuem Indicação de Procedência (IP) são aqueles que só podem receber a denominação quando produzidos naquela região de origem, cujo produto tem qualidades ou características específicas determinadas pelo seu meio geográfico, incluídos os fatores naturais e humanos (EMBRAPA, 2024). Os primeiros queijos artesanais a serem reconhecidos oficialmente foram os das microrregiões do Serro, em 2011, e da Serra da Canastra, em 2012, ambos certificados como Indicação de Procedência, ou seja, a partir desses certificados são protegidos produtos, produtores, região e consumidores (BRASIL, 2023).

Dentre as etapas produtivas dos queijos artesanais, a maturação destaca-se como a mais relevante. Isso deve ao fato que nessa etapa, ocorre a redução da atividade de água (aw) e umidade, fatores determinantes no controle dos microorganismos patogênicos. Segundo FOX et al. (2017), a conservação e a qualidade de queijos maturados estão diretamente atribuídas à baixa concentração de aw.

Para que o processo seja eficaz, a maturação deve ser conduzida sob o rigoroso controle do binômio (tempo x temperatura). A temperatura, atua em duas frentes. Por um lado, deve ser baixa o suficiente para inibir o crescimento de bactérias patogênicas e deteriorantes; por outro, deve permitir as reações bioquímicas de maturação e o desenvolvimento da microflora secundária desejável. Quanto ao tempo, este é diretamente relacionado à redução do teor de umidade. A umidade é o parâmetro que define o nível de maturação (baixa, média ou alta) e a segurança do produto final (THIERRY et al., 2017).

Contudo, FITZTUM et al. (2023) apontam que o tempo necessário para que a umidade atinja os níveis exigidos pela legislação nem sempre é respeitado pelos produtores, o que compromete a conformidade e a segurança do queijo artesanal. Além disso, durante a

maturação, ocorrem fenômenos bioquímicos, enzimáticos e microbiológicos essenciais, como a glicólise, a proteólise e a lipólise, que conferem as características organolépticas distintas ao produto final (ZHANG et al., 2023).

As análises de monitoramento do tempo de maturação são comumente métodos demorados que envolvem o uso e preparo de inúmeros reagentes. Neste contexto, tem sido crescente o investimento em pesquisas que tenham como finalidade o desenvolvimento de métodos substitutos aos de referência como pH, umidade, a_w , cloreto de sódio, extensão e profundidade da proteólise, lipólise e carboidratos. Nesse sentido a espectroscopia no infravermelho têm se destacado, por ser uma técnica eficiente, rápida e segura. A Espectroscopia de Infravermelho Médio (MIR) tem sido amplamente associada ao monitoramento da maturação, ao controle de qualidade e à verificação da autenticidade de queijos. SAKKAS et al. (2021) analisaram queijos semiduros para verificarem os teores de fosfolípidios nos extratos aquosos hidrossolúveis (EAH) utilizando essa técnica. Da mesma forma, a Espectroscopia de Infravermelho Próximo (NIR) apresenta aplicação consolidada na previsão do estágio de maturação (RODRIGUES, 2020), caracterização de queijos duros (CURRÒ et al., 2017) e na detecção de adulterações ou fraudes (ALINOVI et al., 2019; SILVA et al., 2020).

Embora a espectroscopia no infravermelho forneça informações moleculares ricas e abrangentes, sua interpretação em matrizes complexas como o queijo exige o uso de ferramentas de análise multivariada, essenciais para extrair padrões relevantes e transformar os espectros em informações úteis. A utilização das técnicas espectroscópicas em conjunto com as quimiométricas produzem bons modelos que vêm para reduzir custos nas determinações usuais para diversos tipos de alimentos, facilitando a rotina analítica de laboratórios e indústrias (LEI et al., 2019; VISCONTI et al., 2020).

Existem diversas técnicas quimiométricas que incluem ferramentas de redução de dimensionalidade e de reconhecimento de padrões, como a Análise de Componentes Principais (ACP) e a Análise Discriminante (AD). Além disso, existem métodos baseados na construção de modelos supervisionados, nos quais se dispõe de conhecimento prévio sobre classes ou propriedades de interesse, como Modelagem Suave Independente de Classes (SIMCA), Análise Discriminante por Mínimos Quadrados Parciais (PLS-DA), PLS (Análise de regressão por mínimos quadrados parciais). Essas técnicas são aplicadas para prever as alterações que ocorrem durante a maturação dos queijos e também para estabelecer parâmetros químicos, identificando possíveis marcadores nas matrizes complexas (KAMAL e KAROUI, 2015).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Queijo Artesanal

Entende-se por queijos artesanais aqueles elaborados por métodos tradicionais, com vinculação e valorização territorial, regional ou cultural, conforme protocolo de elaboração específico estabelecido para cada tipo e variedade, e uso das boas práticas agropecuárias e de fabricação. Para que o queijo seja enquadrado em “artesanal” deve conter obrigatoriamente leite integral não submetido a tratamento térmico, desde que atenda aos padrões higiênico-sanitários, físico-químicos, microbiológicos e sensoriais, além disso, deve fazer uso das culturas lácticas naturais (pingo), coalho, sal e primordialmente ser maturado, conforme o período definido em portarias do IMA. A comercialização é permitida em todo o território nacional, desde que cumpridas as exigências legais vigentes (BRASIL, 2019).

No Brasil, a produção de queijo teve forte influência das tradições europeias, especialmente dos imigrantes portugueses, espanhóis e italianos, e também da Ásia Ocidental, que contribuíram para os processos de fermentação e de fabricação. Todavia, com base nas condições climáticas, na alimentação animal, na raça do gado leiteiro, na qualidade do leite cru, na microbiota endógena e na cultura do país, foram desenvolvidas novas variedades de queijos com características próprias (PENNA et al., 2021).

2.2 Desafio da comercialização

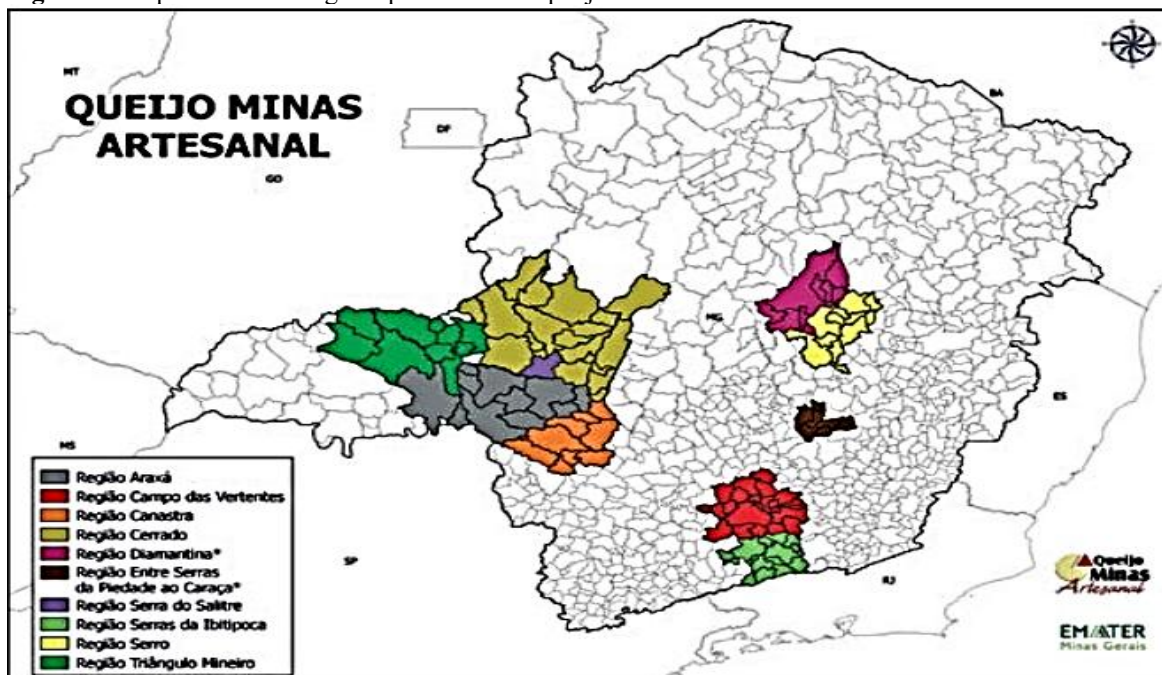
No entanto, assim como em todos os setores de alimentos, os queijos artesanais enfrentam desafios quanto à sua comercialização, que muitas vezes é realizada dentro dos centros de distribuição de maneira informal e inapropriada. Existe grande preocupação quanto à segurança, autenticidade e qualidade desses produtos porque podem colocar em risco a saúde do consumidor, especialmente se não for respeitado o tempo mínimo de maturação. O queijo artesanal, como é sabido, é produzido com leite cru que não foi submetido a nenhum tratamento térmico. Sendo o leite um alimento rico em microorganismos, tanto benéficos quanto patogênicos, quando ocorre o equilíbrio entre eles, há a promoção de características peculiares ao produto final, caso contrário, pode ocorrer riscos de contaminação (ARAÚJO et al., 2020; DA SILVA e OLIVEIRA, 2023; MELO et al., 2024).

2.3 Produção dos queijos artesanais

O estado de Minas Gerais é considerado o maior produtor de queijos de leite cru no Brasil. Os Queijos Minas Artesanais (QMA), como são conhecidos, são tradicionalmente maturados em temperatura ambiente, com produção diária de aproximadamente 250 toneladas

(KAMIMURA et al., 2019). Além disso, representam 50% da produção nacional dos queijos artesanais (CAMPOS et al., 2023). A produção do estado de Minas Gerais é dividida em microrregiões (Figura 1). Atualmente, são reconhecidas dez regiões: Araxá, Campo das Vertentes, Cerrado, Serra da Canastra, Serra do Salitre, Serro, Triângulo Mineiro, Serras da Ibitipoca, Diamantina e Entre Serras da Piedade ao Caraça (IMA, 2022c).

Figura 1- Mapa das Microrregiões produtoras de queijos artesanais de Minas Gerais.



Fonte: Emater, 2023

2.4 Regiões Produtoras

Estas microrregiões são essenciais para a preservação da tradição e da qualidade dos QMA. De modo geral, os produtores de queijos artesanais seguem um padrão de produção que exige o cumprimento do tempo mínimo de maturação e o uso do "pingo". No entanto, cada microrregião combina de maneira particular e única o sabor do produto final. São as características distintas de cada região, como o solo, a genética do gado, a origem do coalho e a qualidade do pingo que garantem a essa combinação um sabor e uma textura inigualáveis. As primeiras regiões produtoras de queijos artesanais foram: Araxá, Cerrado, Serra da Canastra e Serro (SEABRA, 2021).

2.4.1 Queijos Serra da Canastra

O Queijo Minas Artesanal Serra da Canastra (Figura 2) é produzido exclusivamente nessa região, que se localiza no sudoeste de Minas Gerais. Na microrregião da Serra da

Canastra, a produção de queijo artesanal é feita de modo tradicional nos seguintes municípios: Bambuí, Córrego Danta, Delfinópolis, Medeiros, Piumhi, São João Batista do Glória, São Roque de Minas, Tapiraí e Vargem Bonita (EMATER, 2023).

Figura 2- Queijo da Serra da Canastra



Fonte: Emater, 2023

De acordo com o estudo de OLIVEIRA (2019), os queijos com 22 a 25 dias de maturação, nas regiões de Medeiros e Bambuí apresentaram sabor amanteigado e doce, textura cremosa e casca amarelada. Queijos de Tapiraí, São Roque e Vargem Bonita apresentaram como resultados sabor amargo, suave e amanteigado, textura macia e coloração branco-amarelada. Para o autor, esses descritores sensoriais podem ser usados como marcadores dos queijos produzidos nessas regiões e podem diferenciá-los.

Essas características estão presentes neste queijo devido ao clima da região da Canastra, que combina dias quentes e noites frias, bem como as pastagens naturais de capim maduro e gramíneas nativas dão origem a pastagens mais cultivadas e com alta produtividade, principalmente Braquiária. Esta região é caracterizada por um clima tropical de altitude, com uma temperatura média anual de 22,2°C, com um mínimo de 16,7°C e máximo de 27,6°C (APROCAN, 2024)

O queijo Canastra está entre os queijos mais antigos, tradicionais e premiados feitos com leite cru em pequena escala na Serra da Canastra. O queijo ganhou notoriedade, reconhecimento ao obter a “Indicação de Procedência” pelo Instituto Nacional de Proteção Industrial (INPI) no ano de 2011 (BRASIL, 2021).

O período de maturação do queijo Canastra é de no mínimo 14 dias em temperatura ambiente e esse tempo é eficaz na redução de patógenos como *Lactobacillus monocitogenes*, segundo FIRMO et al. (2023) é necessário conhecer os impactos da maturação e da temperatura

no destino dos patógenos de origem alimentar e nas características físico-químicas dos queijos Canastra para direcionar as modificações na fabricação, capacitando os produtores para evitar a informalidade e a clandestinidade desses produtos.

A microbiota dos queijos Canastra é diversa e influenciada por diferentes fatores, entre eles a altitude da região de produção. Este tipo de queijo foi caracterizado pela prevalência de *Lactococo*, seguido pela *Lactobacillus casei*, *L. brevis*, *L. hilgardii*, *L. paracasei*, *L. plantarum*, *L. paraplantarum*, *L. rhamnosus*, *Weissella paramesenteroides*, *Enterococcus spp.*, *E. faecalis*, *Lactococcus spp.*, *Escherichia coli*, *Coliformes totais*, *Coliformes termotolerantes*, *Staphylococcus spp.* e *S. Aureus* sendo que o gênero predominante aos 7 dias de maturação o *Lactococcus lactis*, e o *Streptococcus salivarius* predominante aos 60 dias (KAMIMURA et al., 2019)

2.4.2 Queijos do Araxá

O queijo Minas do Araxá (Figura 3) é produzido desde o século XVIII na região do Planalto do Araxá, que abrange 11 municípios (Araxá, Campos Altos, Conquista, Ibiá, Pedrinópolis, Perdizes, Pratinha, Sacramento, Santa Juliana, Tapira e Uberaba) (PENNA et al., 2021).

Figura 3- Queijo do Araxá



Fonte: Emater, 2023

Em estudo de OLIVEIRA (2019), o queijo Araxá das microrregiões de Araxá, Ibiá e Sacramento foi descrito com as seguintes características sensoriais: casca fina, aroma ácido e suave, presença de olhaduras, textura quebradiça, firme e homogênea, cor branco-creme, e sabor salgado, suave e ácido.

Essas características estão presentes neste queijo devido ao clima da região do Araxá

que apresenta inverno seco e verão chuvoso. Esta região é caracterizada por um clima do cerrado de altitude, com uma temperatura média do mês mais quente superior a 22°C e do mês mais frio inferior a 18°C, com umidade relativa média de 75,6%. Quanto ao tipo de solo, predominam os latossolos vermelho escuro e vermelho amarelo, com textura média, esses fatores edofoclimáticos contribuem de modo a empregar características no produto final (SANT'ANNA et al., 2019).

A microbiota do queijo Araxá é caracterizado pela prevalência de *Lactobacillus casei*, *L. paracasei*, *L. plantarum*, *L. rhamnosus*, *Enterococcus faecalis*, *E. rivorum*, *Lactococcus lactis*, *Pediococcus sp.*, *Escherichia coli*, *Coliformes* e *Staphylococcus aureus*. Sendo que os gêneros *Lactobacillus* representam 72% do total e apresenta alta contagem de bactérias do ácido láctico, sendo identificado independentemente da estação e em todas as etapas do amadurecimento. Esse gênero, é importante durante a maturação pois desempenha um papel na formação de compostos voláteis que contribuem para o perfil sensorial dos produtos lácteos, o que justifica a predominância do sabor ácido, característico dessa microrregião (KAMIMURA et al., 2019).

2.5 Legislação vigentes para comercialização dos queijos artesanais

A importância dos queijos artesanais para a população mineira levou à publicação em 2018 de normas sobre a produção e a comercialização desses produtos em Minas Gerais. Desde então, os requisitos legais para a produção do QMA continuam sendo atualizados (IMA, 2018).

Em 2022 entrou em vigor o Decreto nº 11.099, que regulamenta a certificação de produtos alimentares de origem animal produzidos de maneira artesanal por meio da utilização do Selo Arte e do Selo Queijo Artesanal. Esses certificados asseguram que o produto alimentício de origem animal foi produzido de forma artesanal, apresenta características tradicionais de valorização ou vinculação territorial, regional ou cultural. Por intermédio dos selos, garante-se que o produto atestado possui propriedades organolépticas únicas e diferenciadas, com modo de fabricação artesanal próprio de determinada região. No caso do Selo Queijo Artesanal, os produtores também precisam seguir os protocolos de elaboração específicos para cada tipo e variedade de queijo. Os Estabelecimentos Rurais Produtores de Leite para Elaboração de Queijos Artesanais e as Queijarias Produtoras de Queijos Artesanais precisam comprovar que seguem os requisitos para que sejam inseridos ou permaneçam nesse mercado em constante crescimento (BRASIL, 2022).

Com essas certificações não apenas os produtores ganham ao verem a valorização dos

seus produtos perante o comércio, mas também os consumidores, que têm, através dessa regulamentação, a garantia de qualidade e segurança de que o produto artesanal atende aos requisitos necessários para o mercado. Para assegurar tal integridade sem descaracterizar o produto, a produção artesanal é submetida a inspeções sanitárias estaduais, municipais ou do Distrito Federal, em estrita observância à Lei nº 13.680, de 14 de junho de 2018 (BRASIL, 2018).

Além dessas certificações necessárias para a livre comercialização, há ainda a Indicação Geográfica (IG), que ampara os produtores de modo a valorizar, reconhecer, por fim garante procedência do produto para os consumidores. A IG pode ser na modalidade Denominação de Origem (DO) ou Indicação de Procedência (IP). Dentre as dez microrregiões reconhecidas como produtoras de queijos artesanais, em Minas Gerais destaca-se a região do Serro, que obteve a IP em 2011, requerida pela APAQS (Associação dos Produtores Artesanais do Queijo Serro). Antes disso, o seu modo de fazer (*know-how*) já tinha sido registrado como Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) do estado de Minas Gerais. No ano seguinte, foi a vez da Serra da Canastra obter a IP, requerida pela APROCAN (Associação dos Produtores do Queijo Canastra). A região mais recente a obter o certificado de IP foi o Cerrado, em 2023 (APROCAN, 2024).

Atualmente, outras regiões do estado, como Araxá, Campo das Vertentes, Serra do Salitre, Triângulo Mineiro, Serras da Ibitipoca, Diamantina e Entre Serras da Piedade, buscam esse reconhecimento das certificações da IG (BRASIL, 2023). Embora esses queijos artesanais citados acima não tenham os certificados, são apreciados na culinária por sua originalidade, tradição e qualidade, com diversas premiações em várias partes do mundo (EMATER, 2022).

2.6 Fabricação dos queijos artesanais

Segundo PINEDA et al. (2021), o processo de fabricação dos queijos artesanais nas microrregiões do Araxá, Campo das Vertentes, Serra da Canastra, Cerrado, Serra do Salitre, Serro e Triângulo Mineiro seguem um padrão característico. A obtenção do leite pode ser feita por meio da ordenha mecânica ou manual, sendo importante que o leite esteja isento de quaisquer microbiotas patogênicas e deteriorantes, para garantir a qualidade e segurança do produto final. Após a ordenha, o leite passa pela filtração, para a retirada das partículas macroscópicas e garantir que o material utilizado seja de fácil higienização.

Na sequência ocorre a adição do coalho e o “pingo”. O pingo é obtido a partir do soro de leite fermentado de um dia para o outro, processo no qual ocorre após a coagulação da massa,

moldagem e salga a seco, e que foi submetido a temperatura ambiente. Esse subproduto, é gerado após a primeira viragem do queijo. Ao obter o pingo (fermento natural), este é utilizado nas produções subsequente dos queijos artesanais, os produtores estabelecem período máximo de três dias para seu uso, por saberem que a composição desse fermento influencia positivamente nas características sensoriais (sabor, aroma, textura) dos queijos artesanais (MONTEIRO e MATTA, 2018).

Essa cultura endógena de acordo com NATERA et al. (2025) contém na microbiota microorganismos específicos de cada região, que incluem *Enterococcus*, *Lactococcus*, *Streptococcus*, *Lactobacillus* e *Leuconostoc*. SILVA et al. (2025) retratam que a cultura endógena obtida na Serra da Canastra contém bactérias lácticas, como as dos gêneros *Lactobacillus* e *Enterococcus* e *Weissella*, e leveduras, como *Candida*, *Debaryomyces*, *Pichia*, *Khuyveromyces*, *Torulaspora*, *Yarrowia*, *Wickerhamiella* e *Trichosporon*.

Após a adição do coalho e do 'pingo' ao leite, inicia-se a fase de coagulação. O leite deve ser mantido em repouso até atingir o ponto de corte da massa, etapa que dura, em média, de 40 a 90 minutos para o Queijo Minas Artesanal (QMA) da Serra da Canastra. O corte da coalhada é realizado com o auxílio de liras, pás, facas ou régua, seguido pelas etapas de mexedura e dessoragem, ambas voltadas à separação do soro e da massa (MONTEIRO e MATTA, 2018).

As etapas finais dos queijos Minas Artesanais (enformagem, prensagem, salga a seco, maturação, lavagem no terceiro dia e ralação/grosagem) apresentam diferenças significativas entre as microrregiões, mesmo mantendo um padrão artesanal. A enformagem por exemplo na região do Serro define que a massa seja colocada diretamente sem o auxílio de tecidos em formas de polietileno arredondadas, enquanto que o Serra da Canastra é feita sobre um tecido sintético apropriado que é colocado na forma antes de se colocar a massa. A prensagem da massa no Serro é diferente das demais regiões, por que a coalhada é prensada com as mãos, enquanto na Serra da Canastra, Serra do Salitre e Cerrado utiliza-se pano de queijo (PINEDA et al., 2021) no entanto apesar dessas diferenças ambas são prensadas manualmente.

Logo em seguida, os queijos recebem uma salga superficial a seco com sal grosso, passado um período de seis a oito horas para QMA da Serra da Canastra, e de seis a doze horas para os demais queijos. Em geral, ocorrem três viragens no queijo, sendo esta etapa estabelecida por cada produtor das microrregiões, mas é na terceira viragem, que o queijo é desenformado para iniciar o processo de maturação nas prateleiras, sendo assim respeitado o tempo mínimo exigido por lei para cada região. A lavagem e Ralação/grosagem podem ocorrer durante as

viragens do queijo, por que essas etapas antecedem a da maturação. Portanto são feitas ajustes finais para remover imperfeições das bordas, de modo a deixar o queijo artesanal mais uniforme, podem ser utilizado como material para fazer o acabamento lixas, ralos inox, pedras (MONTEIRO e MATTA, 2018).

2.7 Maturação

A maturação é a etapa que vai promover a concentração dos lípidios, proteínas e carboidratos, a partir das diversas transformações bioquímicas, como a glicólise, proteólise e lipólise que traz ao queijo característica própria. As transformações bioquímicas iniciam utilizando as principais fontes de energia pelas Bactérias Lácticas (BALs), os carboidratos na forma de lactose, galactose e principalmente a glicose, nitrogênio, vitaminas, sais minerais e as enzimas proteolíticas e lipolíticas presentes no leite (FOX et al., 2017).

A maturação dos queijos artesanais segue Portaria IMA nº 2322, 19 de Agosto de 2024 onde fica definido o período de maturação do queijo Minas Artesanal como mínimo de 14 (quatorze) dias para a microrregião de Araxá, Serra da Canastra e Serra do Salitre (IMA, 2024).

A maturação dos queijos é influenciada principalmente pelos teores de umidade e de sal, fatores que alteram diretamente a atividade de água (A_w). Durante esse processo, a proteólise libera frações de aminoácidos cujas cadeias laterais, contendo grupos polares ou ionizáveis, integram-se facilmente à água. Esse fenômeno resulta na redução da (A_w) ao longo do período de maturação (CAMARGO et al., 2021).

A atividade de água funciona como um indicador do estado energético da água nos sistemas alimentares. Dessa forma, o controle da (A_w) é estratégico para o desenvolvimento de alimentos seguros e adequados ao armazenamento de longo prazo. Além de impactar a segurança microbiológica, a disponibilidade de água livre influencia a textura, o sabor e a velocidade das reações químicas e enzimáticas de hidratação (FENNEMA et al., 2010)

Em queijos maturados, a redução da A_w ocorre tanto pela perda de umidade por evaporação quanto pela adição de sal. Devido ao seu baixo peso molecular e alta solubilidade, o sal atua como o principal determinante desse índice, exercendo controle sobre o crescimento microbiano, a atividade enzimática e as mudanças bioquímicas que desenvolvem o aroma e o sabor. Por fim, o sal em conjunto com o pH e o teor de cálcio influencia a extensão da hidratação da para-caseína, o que afeta diretamente a capacidade de retenção de água da matriz proteica e sua tendência à sinérese (JÚNIOR et al., 2014).

2.8 Bactérias do Ácido Lático (BAL) e Bactéria Não Iniciadora (NSLAB)

As BAL, incluindo *Enterococcus* spp e *Lactococcus* spp., são as culturas iniciadoras mais comumente utilizadas em queijos semiduros. As BAL são um grupo diverso de bactérias gram-positivas que produzem ácido láctico como principal produto da fermentação da lactose e enzimas proteolíticas. Essa produção ocorre por intermédio da degradação de diferentes carboidratos, principalmente glicose. Essas bactérias são muito exigentes em relação às condições de crescimento, portanto tem a necessidade que além das fontes de energia dos carboidratos, disponha de fontes de nitrogênio, vitaminas e sais minerais para que tenha condições de crescimento adequado. As BALs apresentam duas vias metabólicas primárias de fermentação: homofermentativa tem como principal subproduto o ácido láctico, os gêneros desse grupo são principalmente *Lactobacillus* e *Streptococcus* (CHAMPE et al., 2005).

Essa via homofermentativa conhecida como Embden-Meyerhof-Parnas ou glicolítica, se dá na formação da frutose-1,6 -bifosfato a partir da reação de fosforilação oxidativa. A frutose 6-fosfato é fosforilada pela enzima alostérica fosfofrutocinase, em uma reação reversível da glicose-6-fosfato, que então é clivada pela aldolase para formar di-hidroacetona fosfato (DHAP) e gliceraldeído-3-fosfato (GAP). Tanto o GAP quanto o DHAP são convertidos em piruvato que, em condições normais é reduzido a ácido láctico (CHAMPE et al., 2005).

A outra via da fermentação das BALs é a heterofermentativa que além de ter como subproduto o ácido láctico, tem uma variedade de outros metabólitos como ácidos orgânicos, etanol e CO₂. Os gêneros desses grupos são principalmente *Weissella*, *Leuconostoc* e *Lactobacillus* (PATEL et al., 2024). Contudo, como essa via é conhecida como via das pentoses fosfatos/6 fosfogliconato ocorre uma desidrogenação inicial, resulta na formação de 6-fosfogluconato, seguida de uma descarboxilação. A descarboxilação surge do processo da hidrólise da 6-fosfogliconalactona a partir da 6- fosfogliconalactona-hidrolase, que ao final promove a formação de pentose-fosfato, CO₂ e NADPH (FILHO et al., 2021).

As enzimas proteolíticas produzidas pelas BALs desempenham um papel crucial no transporte de compostos nitrogenados para o interior das células. A demanda nutricional dessas bactérias é elevada, uma vez que elas requerem uma grande disponibilidade de aminoácidos livres para o seu crescimento e metabolismo (KIELISZEK et al., 2021).

Por sua vez, alguns substratos não são metabolizados por completo no leite, então a partir disso ocorre o crescimento da NSLAB (Bactéria Não Iniciadora), essa bactéria provém geralmente do leite sem nenhum tratamento térmico, por conta também da contaminação das queijarias e pelas condições inadequadas do processo de fabricação. A via da fermentação da

NSLAB, diferente das BALs ocorre apenas com fermentação heterofermentativo podendo ser: heterofermentativo facultativo e mesofílico que contempla os gêneros dos *Lactobacillus* (FILHO et al., 2021).

2.9 Processos que ocorrem durante a maturação dos queijos

O processo de maturação do queijo compreende uma série de modificações bioquímicas, enzimáticas e microbiológicas que incluem a glicólise, a proteólise e a lipólise como eventos principais. Essas modificações ocorrem por meio das reações presentes no leite cru e no fermento natural (pingo), os quais favorecem o crescimento das BALs e NSLABs. Como resultado deste processo, as proteínas, os carboidratos e os lipídios passam inicialmente pela decomposição. Isso gera subprodutos como: ácidos orgânicos, etanol, CO₂, aminoácidos livres, peptídeos, enzimas proteolíticas e compostos voláteis. Estes são os principais responsáveis pelas características sensoriais e físico-químicas de cada tipo de queijo. Após essa decomposição, eventos secundários passam a atuar no queijo, como o metabolismo da lactose, lactato e citrato, o catabolismo dos aminoácidos e o catabolismo dos ácidos graxos (ZENG et al., 2021).

As modificações bioquímicas que ocorrem na maturação são decorrentes da interação de microrganismos com o queijo. Além disso, outro fator para o desenvolvimento dessa etapa são as transformações físico-químicas, reflexo da atividade microbiana e da ação ambiental (temperatura/umidade) sobre os produtos. Assim, a maturação tende a reduzir a umidade e a atividade de água (a_w) e a aumentar a acidez dos queijos. Dessa forma, a maturação pode reduzir populações de microrganismos patogênicos e controlar o risco referente ao consumo deste tipo de alimento. Os fatores que controlam o crescimento de microrganismos no queijo incluem: atividade de água (a_w), concentração de sal, potencial de oxidação-redução, pH, a presença de NO₃ (nitrato), temperatura de maturação e a produção de bacteriocinas (FONSECA et al., 2022).

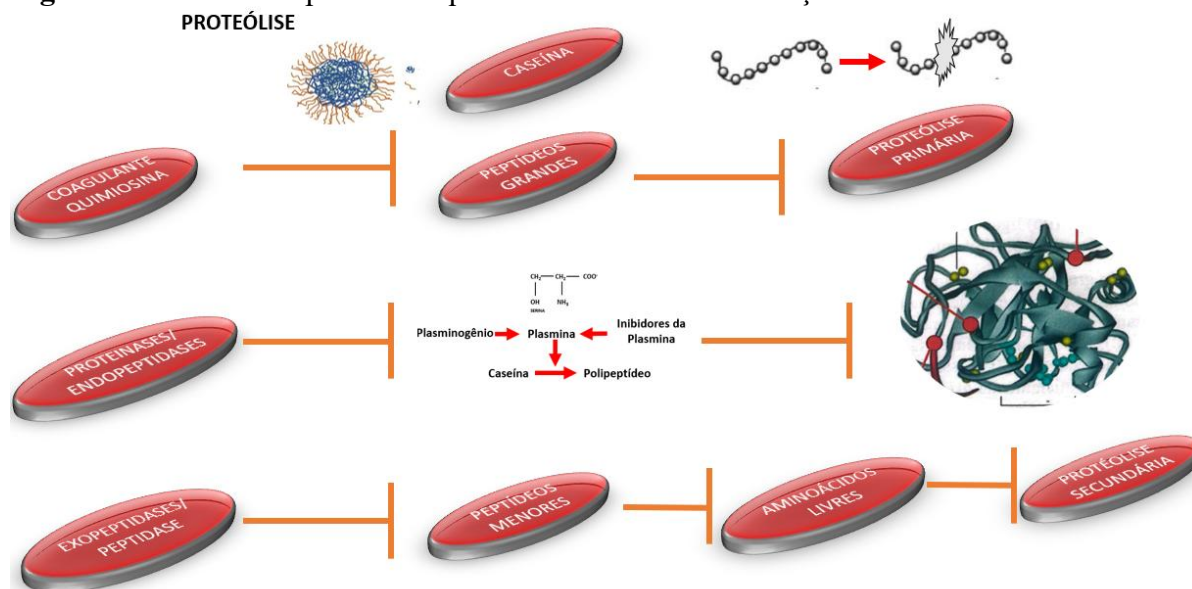
2.9.1 Proteólise, lipólise e glicólise

Durante o processamento de produtos fermentados, a fermentação láctea é a principal responsável pela hidrólise de proteínas por bactérias lácticas, além da ação das proteases e dos substratos. Além disso é considerada como um dos melhores métodos de conservação de produtos lácteos. O processo pode ocorrer a partir da oxidação aeróbica, onde diferentes tipos de nutrientes (lipídios, aminoácidos e carboidratos) podem ser degradados utilizando ATP como fonte principal. Isso ocorre por intermédio da fosforilação oxidativa, que promove a transferência de elétrons do NADH (Nicotinamida Adenina Dinucleotídeo reduzido) ou do FADH₂ (flavina adenina dinucleotídeo reduzido). A fosforilação oxidativa gera 32 das 36

moléculas de ATP (Adenosina trifosfato) que são formadas quando a glicose é completamente oxidada a CO_2 e H_2O . Já a fermentação em condições anaeróbicas tem a degradação de glicose a piruvato como única possibilidade de síntese de ATP. A fermentação láctica ocorre em produtos lácteos como queijos e iogurte, pelo intermédio do piruvato, que foi formado pela degradação da lactose, reduzido a lactato e etanol por meio da lactato-desidrogenase. A glicose utilizada como fonte de energia é proveniente da glicólise, catalisada pela enzima hexoquinase (KOOLMAN et al., 2005).

Durante os processos bioquímicos envolvidos durante a maturação de queijos, a proteólise (Figura 4) é mais complexo e, possivelmente, a mais importante. Ela consiste na degradação das proteínas em produtos mais simples e mais solúveis. As caseínas são hidrolisadas extensivamente pela ação de uma gama de proteases e peptidases que, em queijos, possuem seis fontes. O coagulante é o principal responsável pela proteólise primária, que gera peptídeos grandes e de tamanho intermediário. Estes são, em seguida, hidrolisados pelas enzimas da microflora iniciadora (BALs) e não iniciadora (NSLAB) do queijo. As caseínas são constituídas pelas frações α_{s1} (199 aminoácidos), α_{s2} (207 aminoácidos), κ (169 aminoácidos), β (209 aminoácidos), γ - caseínas, durante a coagulação, a quimosina, específica para ligação Phe₁₀₅-Met₁₀₆ é fracamente proteolítica. As frações α_{s1} , α_{s2} - β não são hidrolisadas durante o processo, mas podem sofrer a sua ação lentamente na maturação do queijo (ESKIN, 2015).

Figura 4- Processo da proteólise que ocorre durante a maturação



Fonte: Autoria Própria, 2026

As proteinases, ou endopeptidases, separam ligações peptídicas no interior da cadeia polipeptídica. Inicialmente, as proteinases reconhecem e se ligam a sequências curtas dos substratos e hidrolisam ligações relativamente específicas entre determinados resíduos de aminoácidos. Entre as várias enzimas nativas do leite, a plasmina é a mais importante para a proteólise, a plasmina é uma serina protease. O ativador de plasminogênio (PA) e a própria plasmina estão associados às micelas da caseína e são incorporados à caseína coagulada pela enzima. Os inibidores, tanto da plasmina quanto do PA são encontrados no soro de leite e são, portanto, perdidos no soro. A plasmina hidrolisa rapidamente a β -caseína e produz γ -caseínas e algumas peptonas. Na α_2 -caseínas oito ligações peptídicas são rapidamente hidrolisadas pela ação da plasmina, mas as α_1 é menos susceptíveis á plasmina e κ -caseína é imune a sua ação. A plasmina, é responsável pela proteólise limitada da β -caseína em queijos maturados, sendo os peptídeos grandes e de tamanho intermediário o principal produto dessa ação (KIELISZEK et al., 2021, KOOLMAN et al., 2005).

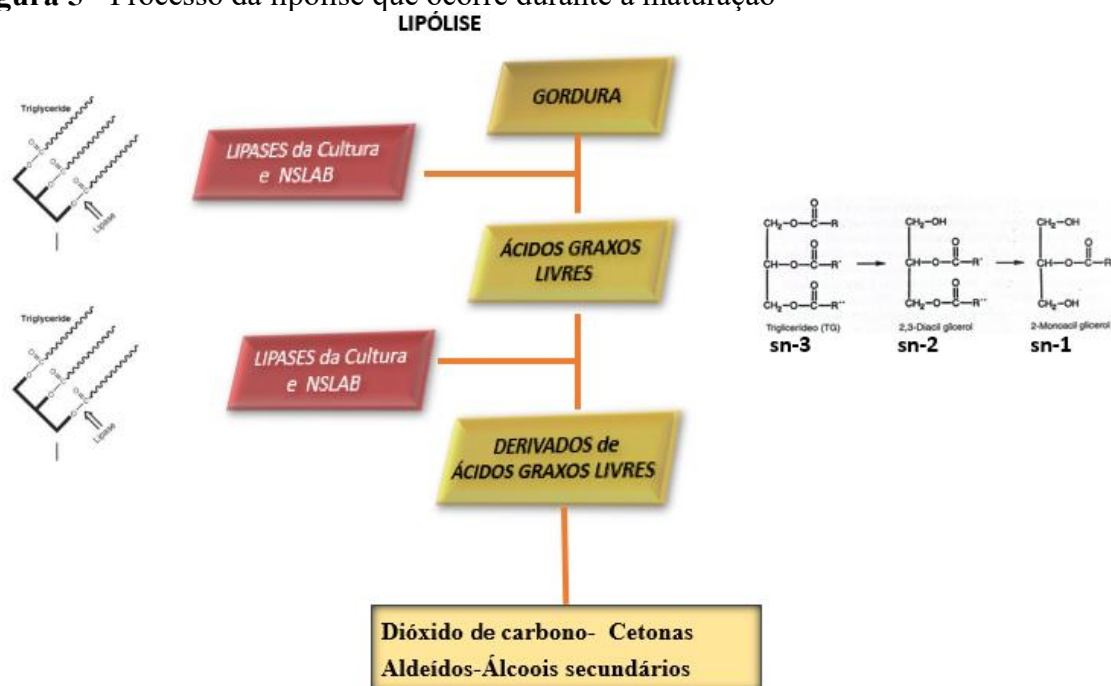
Já as exopeptidases atuam a partir do final dos peptídeos (N-terminal), e são denominadas aminopeptidases e aquelas que reconhecem extremidade C-terminal são denominadas carboxipeptidases. Além disso, a proteólise é iniciada pela ação das BALs e os gêneros *Lactococcus* e *Lactobacillus* são os mais importantes, e seus sistemas proteolíticos consistem em uma serina protease, ou Protease do Envelope Celular (CEP). A protease CEP é a principal responsável pela hidrólise dos peptídeos maiores produzidos a partir da α_1 e β -caseína pela quimosina e plasmina. As peptidases (aminopeptidases, carboxipeptidases e dipeptidases) são responsáveis pela liberação de aminoácidos livres após o rompimento da membrana celular. Assim, o catabolismo dos aminoácidos contribui para o processo geral da proteólise (MIGUÉLEZ et al., 2025).

Duas fases caracterizam o fenômeno da proteólise: a proteólise primária e a proteólise secundária. A proteólise primária compreende as reações responsáveis pela formação de peptídeos de médio ou alto peso molecular a partir da caseína. A proteólise secundária, na qual intervêm as proteinases e peptidases microbianas, produz peptídeos, aminoácidos e outras substâncias nitrogenadas de baixo peso molecular. É a partir destas que se formam as substâncias aromáticas, voláteis e não voláteis (PRIYASHANTHA et al., 2020).

A hidrólise da gordura do leite é o processo conhecido como lipólise (Figura 5), uma reação bioquímica que ocorre principalmente em queijos produzidos a partir do leite cru. A gordura do leite é composta por três moléculas de ácidos graxos e uma molécula de álcool (glicerol), unidas por ligações éster, e tem como produto final os triacilglicerídeos. No processo

da lipólise, os triacilglicerídeos são hidrolisados em ácidos graxos livres (AGL) que envolve principalmente a quebra de ligações éster. A lipólise é causada por enzimas lipolíticas originárias das seguintes fontes: lipases endógenas do leite (LPL), bactérias lácticas iniciadoras (BAL) e bactérias lácticas não iniciadoras (NSLAB). A LPL é a principal lipase endógena do leite, sendo relativamente inespecífica e libera ácidos graxos das posições sn-1, sn-2 de monoacilglicerídios, diacilglicerídios (ZHANG et al., 2023).

Figura 5- Processo da lipólise que ocorre durante a maturação



Fonte: Autoria Própria, 2026

Os ácidos graxos livres (AGL) liberados pela lipólise são, posteriormente, degradados para formar compostos de aroma. Nesse sentido, o processo mais importante para a degradação dos (AGL) é a β -oxidação uma rota metabólica realizada pelas enzimas microbianas liberadas na matriz do queijo. Inicialmente, os ácidos graxos são ativados a acil-CoA no citoplasma, por meio da ligação com a coenzima A. Através de um sistema de transporte (como a carnitina), os ácidos graxos ativados são transportados e degradados a acetil CoA. Os resíduos acetil formados podem ser oxidados no Ciclo do Citrato a CO_2 . Desta oxidação, são obtidas coenzimas reduzidas e, delas, por meio da fosforilação oxidativa, é obtido o ATP. Uma molécula de acil-CoA é degradada por uma sequência repetitiva de três reações: Oxidação por flavina adenina (FAD), hidratação, oxidação por NAD^+ . A cadeia do ácido graxo é encurtada em dois carbonos em resultado dessas reações, e são produzidos FAD_2 , NADH e acetil CoA (BANDÍC et al., 2023).

Durante a maturação do queijo, a gordura do leite é quebrada, formando ácidos graxos

de cadeia média e curta. Os ácidos graxos de cadeia curta são, geralmente, encontrados na posição sn-3 dos triglicerídeos. Dentre as cepas microbianas destaca-se os *Lactococos* responsáveis pela liberação de níveis bastante elevados de ácidos graxos livres (AGL) quando presentes em grande número de células ou durante períodos prolongados de maturação. Os *Lactobacilos* homofermentativos obrigatórios usados como iniciadores (*Lb. helveticus*, *Lb. delbrueckii subsp. bulgaricus* e *Lb. Delbrueckii subsp. lactis*) também produzem esterases. *Lactobacilos* heterofermentativos facultativos (*Lb. casei*, *Lb. paracasei* e *Lb. plantarum*), que dominam a flora das NSLAB de muitas variedades de queijo, são fracamente lipolíticos. *Micrococcus* e *Pediococcus* também são fracamente lipolíticos. Os ácidos graxos livres são precursores para uma variedade de compostos de sabor, como metilcetonas, álcoois secundários, ésteres e lactonas (ZARAVELA et al., 2021).

2.10 Espectroscopia de Infravermelho

A espectroscopia no infravermelho é baseada na medição da absorção de luz infravermelha por uma amostra, a qual corresponde às vibrações das ligações químicas nas moléculas. A espectroscopia do infravermelho próximo (NIR) representa uma ferramenta importante para ser utilizada no controle de qualidade e monitoramento de processos na indústria de laticínios devido à sua economia, bom desempenho e facilidade de uso em comparação com outros métodos. Segundo HEBLING et al. (2022), o NIR tem aplicações estabelecidas na indústria de laticínios, permitindo determinar a composição, qualidade e autenticidade de matérias-primas e produtos.

Essa técnica mede as vibrações fundamentais quando a amostra medida é irradiada por luz infravermelha próxima, a luz com uma frequência específica é absorvida pelas moléculas orgânicas presente na amostra. Sob essa condição, o espectro de absorção NIR será gerado quando a vibração interna da molécula transita do estado fundamental para o nível de alta energia. Entre elas, as informações registradas no espectro NIR são principalmente da duplicação de frequência e absorção combinada da vibração do grupo contendo hidrogênio X–H (X = C, N, S e O) na amostra. Na região NIR, quanto maior a constante de anarmonicidade do grupo, maior a intensidade de absorção (MARTINS et al., 2023).

Além disso, o espectro infravermelho é sensível a interações intermoleculares polares, como ligações de hidrogênio, que podem levar a deslocamentos de banda significativos, porque a formação de ligações de hidrogênio alterará a força de interação entre átomos, reduzirá a frequência de vibração entre átomos adjacentes e deslocará o pico de absorção para a direção

de baixo número de onda. Na região do comprimento de onda NIR, a forma espectral da amostra que está sendo medida é influenciada principalmente pelas vibrações das ligações C–H, N–H, O–H e S–H (XU et al., 2025).

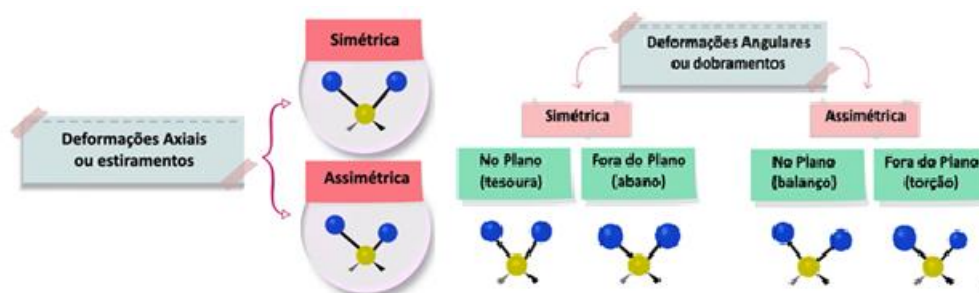
As informações dos espectros se relacionam com sobretons e combinações de vibrações de algumas ligações características, como CH, NH, OH e SH, que normalmente existem em todas as moléculas orgânicas (LIU et al., 2018).

As técnicas espectroscópicas avaliam a qualidade de alimentos depende da geração de uma "impressão digital". Desse modo, um produto lácteo individual com uma composição química específica, quando exposto a uma fonte de luz, produz um espectro característico que resulta da absorção da energia eletromagnética pelos diversos componentes químicos do alimento (PEREIRA et al., 2020).

A espectroscopia no infravermelho médio (MIR) por sua vez apresenta maior sensibilidade estrutural e de sinal em comparação com o NIR. As moléculas que absorvem energia na região MIR têm vibrações em uma ou mais regiões do espectro com frequências natural de vibração definida por suas ligações. Cada tipo de ligação tem sua própria frequência vibracional, e assim os padrões de absorção no infravermelho médio em geral não são exatamente iguais (SAKKAS et al., 2021).

A metodologia MIR foi aplicada com sucesso para identificar compostos de leite e derivados. SUBRAMANIAN et al. (2011) monitoraram 20 aminoácidos, três ácidos orgânicos, e algumas das alterações bioquímicas durante a maturação do queijo cheddar. Outros estudos como os de YAMAN et al. (2023) em queijo Kashar e TOLENTINO et al. (2023) em queijo prato diferenciaram e classificaram os queijos utilizando espectroscopia, onde foram capazes de identificar amostras que provavelmente não eram autênticas.

A principal diferença entre as faixas de MIR e NIR é que a absorção da radiação na região do infravermelho próximo corresponde a sobretons e combinações que resultam do aumento do nível vibracional das moléculas orgânicas. Em contrapartida, a espectroscopia no infravermelho médio se baseia na excitação vibracional de ligações moleculares (Figura 6). A soma dos espectros vibracionais para o conteúdo de macromoléculas (ácidos nucleicos, proteínas, lipídios, polissacarídeos) de uma célula é considerada por causa da "impressão digital". Como tal, esses espectros podem ser usados para diagnóstico em aplicações de tipagem ou identificação (MOHAMMED et al., 2016).

Figura 6- Tipos de vibrações moleculares

Fonte: SKOOG et al., 2016

De modo geral, a espectroscopia infravermelha é uma ferramenta poderosa e versátil para o controle e análise da qualidade de alimentos (KHARBACH et al., 2023). No entanto, essas técnicas fornecem grandes número de informações com apenas um teste, então se necessita aliar a espectroscopia infravermelha à quimiometria. Essas informações podem ser usadas para determinação de adulterantes no leite e seus derivados lácteos, para melhorar a qualidade, a segurança e a autenticidade dos produtos alimentícios (NASCIMENTO et al., 2017).

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) apresenta-se como uma alternativa promissora na avaliação do grau de maturação de queijos, superando limitações inerentes aos métodos convencionais. Por fornecer dados objetivos e quantitativos acerca da composição química e bioquímica da matriz, a técnica NIR amplia a precisão e a confiabilidade das análises, permitindo um monitoramento mais preciso do processo (SERALTIC et al., 2024).

2.11 Quimiometria

Métodos quimiométricos surgiram como ferramentas necessárias para analisar conjuntos de dados químicos, além das técnicas univariantes convencionais. "Quimiometria" pode ser amplamente definida como o uso de protocolos matemáticos e estatísticos utilizados para analisar dados químicos, frequentemente por meio de técnicas analíticas multidimensionais. Essas metodologias incorporam uma vasta gama de métodos, modelos e algoritmos matemáticos, que por muitas das vezes são capazes de elucidar relações qualitativas e quantitativas existentes entre variáveis, que são negligenciadas ao usar métodos mais tradicionais. Além disso, quando combinada com os avanços da tecnologia como MIR e NIR a quimiometria representa um conjunto de ferramentas importantes para o desenvolvimento da

pesquisa (DUPONT et al., 2020).

No entanto, a aplicação direta desses métodos sobre os espectros brutos é dificultada pela presença de sinais indesejados, provenientes tanto do equipamento quanto da própria natureza físico-química das amostras. Por esse motivo, o primeiro passo na análise quimiométrica é o pré-processamento de dados. O principal objetivo desta etapa é transformar os dados coletados para estabelecer uma relação linear entre os valores de absorbância e as concentrações da substância alvo. Conforme apontado por XU et al. (2025), os dados de NIR, por exemplo, contêm frequentemente informações irrelevantes, como o espalhamento de luz pelas partículas da amostra, ruídos do espectrômetro e desvios de linha de base. Portanto, reduzir essas interferências por meio de técnicas de tratamento prévio é essencial para garantir a precisão e a aplicabilidade da modelagem subsequente.

Essa etapa de pré- tratamento é fundamental em qualquer análise quimiométrica, sendo comum o teste de diversos métodos para identificar o mais adequado a cada conjunto de dados. O objetivo é eliminar variações indesejáveis que não foram removidas durante a aquisição dos dados e que podem influenciar negativamente os resultados. No entanto, tais procedimentos devem ser aplicados com cautela e critério, a fim de evitar distorções que possam comprometer ou inutilizar a análise. Entre os principais métodos de pré-tratamento, destacam-se a Correção de Efeito Multiplicativo (MSC), a Variação Normal Padrão (SNV), a centralização na média, as técnicas de correção de linha de base (derivadas) e o alisamento pelo método de Savitzky-Golay (FERREIRA, 2015).

Dentre esses pré-processamentos, a MSC destaca-se por reduzir o fenômeno de espalhamento de luz ao regredir cada espectro individual ao espectro médio de uma coleção, aplicando-se tanto a conjuntos de calibração quanto de predição. Quando as condições ou conjuntos de dados são alterados, o algoritmo é recomputado para todo o conjunto (WORKMAN et al., 2018).

Outro interferente comum em espectros MIR e NIR é a presença de desvios de linha-base. Esses desvios podem ser lineares decorrentes de sinais de fundo que exigem correção devido a variações instrumentais ou compensação inadequada do branco ou não lineares, causados por efeitos multiplicativos. Esse tipo de desvio de linha-base não linear é causado pelas diferenças de caminho óptico causadas pela falta de homogeneidade no tamanho das partículas ou variações na densidades dos grãos da matriz. Para solucionar esses problemas, as derivadas surgem como ferramentas matemáticas úteis para melhorar a resolução de sinais analíticos, embora apresentem, como efeito colateral, o aumento do ruído instrumental. Por essa razão,

recomenda-se que o uso de derivadas seja realizado conjuntamente com métodos de alisamento, como o de Savitzky-Golay. Enquanto a primeira derivada elimina desvios de linha de base aditivos, a segunda derivada é capaz de eliminar também os efeitos multiplicativos (FERREIRA, 2015).

Além das derivadas, os métodos mais empregados para reduzir essas fontes de variação são a MSC e a SNV. Por meio desses pré processamentos, os interceptos e as inclinações dos espectros são corrigidos, eliminando a variação causada pelo espalhamento. O SNV, especificamente, é um tipo de normalização executado ao longo das linhas da matriz, correspondendo ao autoescalamamento da matriz de dados transposta. Nesse procedimento, o valor médio de cada linha é subtraído de seus respectivos valores, os quais são, em seguida, divididos pelo desvio-padrão da própria linha (SENA et al., 2018).

Geralmente, muitas características analíticas precisam ser consideradas em conjunto pois desempenham um papel importante para fornecer o que se denomina impressão digital analítica. Em outras palavras, uma abordagem multivariada de reconhecimento de padrões é necessária para obter modelos eficazes na verificação da autenticidade de alimentos. O resultado desses modelos deve ter uma resposta se o produto analisado é ou não compatível com a origem declarada ou então se atende os parâmetros necessários estabelecidos pela legislação como por exemplo, o tempo mínimo previsto. Essa questão é exatamente a mesma que a do controle de qualidade e, portanto, o mesmo tipo de ferramentas de análise de dados deve ser empregado (KHARBACH et al., 2023)

O reconhecimento de padrões pode ser os não supervisionados (análise de componentes principais - PCA, análise de agrupamento hierárquico - HCA) e os supervisionados (análise discriminante de mínimos quadrados parciais (PLS-DA), modelagem Independente e Flexível por Analogia de Classe (SIMCA) e análise discriminante linear (FERREIRA, 2015).

A PLS-DA também conhecidas como classificadores de duas classes ou multiclassas é um método de discriminação baseado em regressão PLS, mas incorpora uma etapa adicional de classificação baseada na definição de limiares para os valores y previstos. Esse método busca um delimitador entre duas ou mais classes. Esse delimitador define uma regra de decisão, com base na qual uma amostra de teste é sempre atribuída a uma das classes estudadas. Esse delimitador discriminante é determinado usando a contribuição de todas as classes consideradas.

Outro método, o método de analogia de classe de modelagem independente suave (SIMCA) são baseados em componentes principais (PCs), que são, por definição, as direções

de máxima variância em um espaço de dados multivariado. O primeiro passo no desenvolvimento de um modelo SIMCA é uma autoescala de coluna baseada em classe ou centralização da média. O SIMCA também pode ser usado como um método discriminante, quando pelo menos duas classes significativas e bem representadas são definidas em um conjunto de dados (SAKKAS et al., 2021).

Em resumo, a classificação é uma tarefa fundamental de análise de dados em análise de alimentos, e diversas técnicas quimiométricas. Esses métodos permitem a identificação de padrões e a atribuição de amostras a diferentes categorias, facilitando análises subsequentes e a tomada de decisões na área de análise de alimentos (KHARBACH et al., 2023).

CAPÍTULO II : OBJETIVOS

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Desenvolver modelos quimiométricos, por meio da espectroscopia MIR e NIR, para a classificação de queijos Minas Artesanais do Araxá e da Serra da Canastra de acordo com o tempo de maturação.

3.2 Objetivos específicos

Obter espectros por MIR e NIR de queijos Minas Artesanais do Araxá e da Serra da Canastra em diferentes tempos de maturação para identificar variabilidade espectral;

Investigar, por meio da Análise de Componentes Principais (ACP), a formação de grupos ou tendências de separação entre as amostras, com foco na distinção entre queijos conformes (T14, T28, T42 e T56 dias) e não conformes (T1 e T7 dias);

Utilizar PLS-DA e SIMCA para classificar as amostras do Araxá e Serra da Canastra em relação ao período de maturação, visando verificar a conformidade com a legislação a partir do limite de 14 dias;

Avaliar o potencial de aplicação e a eficiência das técnicas espectroscópicas como ferramentas de diferenciação entre as regiões do Araxá e Serra da Canastra, comparando o desempenho do MIR e do NIR na fiscalização da conformidade regulatória.

CAPÍTULO III : MATERIAIS E MÉTODOS

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Aquisição das amostras

As amostras de queijo Minas Artesanal foram adquiridas diretamente de 14 produtores localizados na Serra da Canastra (20°18' 16" S, 46°35' 56" W) e 11 do Araxá (19°25' 5" S e 46°44' 27" W), em Minas Gerais. As amostras de queijo foram obtidas em 6 diferentes tempos de maturação (T1, T7, T14, T28, T42 e T56 dias), totalizando 84 unidades experimentais (14 produtores x 6 tempos) para a Serra da Canastra e 66 unidades experimentais (11 produtores x 6 tempos) para o Araxá.

A amostra de cada queijo foi realizada por meio da coleta de uma porção que englobava tanto o miolo quanto a casca do produto, foram homogeneizado e ralados em processador (Processador modelo CR-4, Skymssen, Santa Catarina, Brasil). Após o preparo da amostra, estas foram armazenadas a -80°C até as análises.

4.2 Espectroscopia no Infravermelho Médio (MIR)

Os espectros gerados, foram obtidos usando Espectroscopia no Infravermelho Médio por Transformada de Fourier com Reflexão Total Atenuada, FTIR-ATR (Cary 630 FTIR, Agilent Technologies Inc., CA, EUA), utilizando a faixa espectral de 4000 a 600 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} , 64 varreduras e leitura através com célula do cristal de diamante. Aproximadamente 0,1 g das amostras foi colocado na superfície do diamante para leitura. Antes de cada varredura, uma leitura em branco foi realizada. Durante as medições, a temperatura do ambiente foi mantida em 24 °C. O software Agilent MicroLab PC foi usado para adquirir os espectros (CARDOSO et al., 2025).

4.3 Espectroscopia por Infravermelho Próximo (NIR)

Os espectros gerados, foram coletados usando o Espectrômetro NIR (SpectraStar 2500XL, Unity Scientific, Brookfield, CT, EUA) equipado com uma lâmpada halógena de tungstênio como fonte de luz e um detector de arsenieto de índio-gálio (InGaAs). Para a análise, aproximadamente 20 g de amostra foi colocada no recipiente e escaneadas na faixa de 1100–2500 nm em intervalos de 1 nm. Os sinais foram gerados em modo reflectância (%R) e transformado em absorbância usando $\log 1/R$. Durante as medições, a temperatura do ambiente foi mantida em 24 °C. O software Unity InfoStar versão 3.11.3 (Brookfield, CT, EUA) foi usado para configuração do espectrômetro, controle e aquisição de dados (CARDOSO et al., 2025).

4.4 Análise Estatística

4.4.1 Análises Exploratórias de Dados

Foi utilizada a Análise de Componentes Principais (ACP) com o objetivo de explorar a formação de grupos, e observar semelhanças ou diferenças entre as amostras analisadas dos queijos Araxá e Serra da Canastra.

Para a ACP dos espectros MIR e NIR foram utilizadas as máximas absorbâncias e realizado o pré-processamento no software Chemoface (versão 1.66), em todo conjunto de dados usando método filtragem de suavização de Savitzky-Golay com uma janela de 5 pontos, para eliminar variações sistemáticas causadas por fatores como instrumentação ou condições ambientais.

Como critério de avaliação foi realizada a seleção dos CPs que tiveram maior percentual acumulativo. A escolha dos números de CPs foi baseado nos fatores interpretáveis que determina a possibilidade por somatório maior que 70% da variância, para considerar a representatividade do conjunto de dados.

Foram feitas remoção de amostras anômalas (*outliers*) que são dados que se desviam significativamente do restante do conjunto, e sua detecção é crucial para o desenvolvimento de modelos multivariados confiáveis, as remoções dos outliers foram feitas nos dados MIR. O ACP foi realizado no programa SAS® OnDemand for Academics versão estudantil, e os gráficos de dispersão dos coeficientes de correlação entre as variáveis e CPs foram realizados no software OriginPro Learning Edition.

4.4.2 Classificação e construção dos modelos

Foram testados cinco diferentes pré-tratamentos de dados: incluindo técnica de correção de linha de base (1° e 2° derivada) que visam acentuar as características de absorbância contidas nos espectros, removendo efeitos aditivos e multiplicativos, a segunda derivada pode eliminar uma inclinação uniforme da linha de base, enquanto a primeira derivada pode reduzir o deslocamento espectral sem reduzir excessivamente a relação sinal-ruído nos espectros corrigidos (SAVITZKY et al., 1964, JAHANI et al., 2024).

Alisamento pelo método de suavização de Savitzky-Golay muito utilizado para suavizar o ruído aleatório nos dados espectrais (SAVITZKY et al., 1964, JAHANI et al., 2024), centralização da média (FERREIRA, 2015), correção multiplicativa de espelhamento (MSC) utilizado para compensar desvios multiplicativos dependentes do comprimento de onda (ISAKSSON et al., 1988, JAHANI et al., 2024).

Padronização normal de sinal (SNV) utilizado para lidar com a intervenção

multiplicativa e aditiva do efeito de espalhamento e da variabilidade do tamanho das partículas no espectro bruto (JAHANI et al., 2024). Para aplicação dos pré-tratamentos de dados foi utilizado software CHEMOSTAT (versão 2.0).

Para início das análises de classificação (SIMCA e PLS-DA), os dados de MIR foram fracionados em conjunto de calibração (70 %) e validação (30%), e o NIR do mesmo modo, sendo realizados individualmente, para isso foi utilizado o algoritmo Kennard Stone (KENNARD e STONE, 1969) do CHEMOSTAT (versão 2.0). Como limiar do estudo foi estabelecido a divisão de dois grupos: Amostras conformes (CF) que tem tempo (T14, T28, T42 e T56 dias de maturação) e Amostras não conformes (NC) que tem tempo (T1 e T7 dias de maturação) para os queijos das regiões Araxá e Serra da Canastra.

4.4.3 SIMCA

Modelagem Suave Independente de Classes (SIMCA) neste estudo, foi empregada para diferenciar amostras de queijo com base na região geográfica e no tempo de maturação (T1, T7, T14, T28, T42 e T56 dias) previamente conhecida, foi utilizado os dados completos.

Para o MIR, foram utilizadas 64 amostras de Araxá, sendo que para calibração foram utilizados 45 e para validação 19. Para a região da Serra da Canastra, foram utilizadas 84 amostras, sendo 59 para calibração e 25 para validação.

Quanto aos dados NIR, foram utilizadas 66 amostras de Araxá, sendo para calibração 46 amostras e para validação 20 amostras. Para a região da Serra da Canastra foram utilizadas 84 amostras, sendo para calibração 59 e 25 para validação.

Ambos os conjuntos dos dados MIR e NIR foram subdividido em Amostras conformes (CF) que tem tempo T14, T28, T42 e T56 dias de maturação e Amostras não conformes (NC) que tem tempo T1 e T7 dias de maturação. A codificação das classes foram: para calibração CF (-1) e NC (1), e conjunto de validação seguiu da mesma forma.

Para o desenvolvimento dos modelos de classificação na análise do SIMCA, foi utilizado software Rstudio versão 4.4.1 e pacotes Package for Multivariate Data Analysis (mdatools- KUCHERYAVSKIY, 2024), Read Excel Files (readxl- WICKHAM et al., 2025), Pseudo-validation matrix (pcv- KUCHERYAVSKIY, 2023), Efficient data handling (dplyr- WICKHAM et al., 2023), Variable selection in Partial Least Squares (plsVarSel- LILAND, 2025), Efficient conversion (data.table - BARRETT et al., 2025).

Essa comparação permitiu o cálculo de métricas importantes para o desempenho do modelo como acurácia, especificidade e sensibilidade, a partir desses resultados foi observado a possibilidade da aplicabilidade do modelo em generalizar para queijos artesanais que não

foram utilizados na análise.

4.4.4 PLS-DA

A análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA) foi aplicada especificamente para classificar queijos por região geográfica e por tempo de maturação (T1, T7, T14, T28, T42 e T56 dias) previamente conhecida, com todos dados completos.

A Organização do conjuntos de dados MIR e NIR para a análise PLS-DA seguiu conforme análise do SIMCA empregado tanto na região do Araxá e Serra da Canastra individualmente.

Ambos os conjuntos dos dados MIR e NIR foram subdividido em Amostras conformes (CF) que tem tempo T14, T28, T42 e T56 dias de maturação e Amostras não conformes (NC) que tem tempo T1 e T7 dias de maturação. A codificação das classes foram: para calibração CF (-1) e NC (1), e conjunto de validação seguiu da mesma forma.

Para o desenvolvimento dos modelos de classificação dos queijos artesanais no PLS-DA foi realizado no software Rstudio versão 4.4.1 e pacotes Package for Multivariate Data Analysis (mdatools- KUCHERYAVSKIY, 2024), Read Excel Files (readxl- WICKHAM et al., 2025), Pseudo-validation matrix (pcv- KUCHERYAVSKIY, 2023), Efficient data handling (dplyr- WICKHAM et al., 2023), Variable selection in Partial Least Squares (plsVarSel- LILAND, 2025).

Para avaliar os modelos de classificação das regiões do Araxá e Serra da Canastra utilizou-se os parâmetros de figuras de mérito como Precisão (Eq. 1), Sensibilidade (Eq. 2) e Especificidade (Eq. 3). Sendo que a Precisão tem como intuito classificar amostra independente da classe. Sensibilidade, fração de amostras que pertencem a uma classe e são aceitas corretamente. Especificidade, fração de amostras que não pertencem a uma classe e são rejeitadas corretamente (FERREIRA, 2015). Além disso, foi exibido matriz de confusão para dados MIR e NIR.

$$PRECIS\tilde{A}O\% = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} * 100 \quad \text{Eq. 1}$$

$$SENSIBILIDADE\% = \frac{TP}{TP+FN} * 100 \quad \text{Eq.2}$$

$$ESPECIFICIDADE\% = \frac{TN}{TP+FP} * 100 \quad \text{Eq. 3}$$

Onde TP significa verdadeiro positivo, TN significa verdadeiro negativo, FN significa falso negativo e FP significa falso positivo.

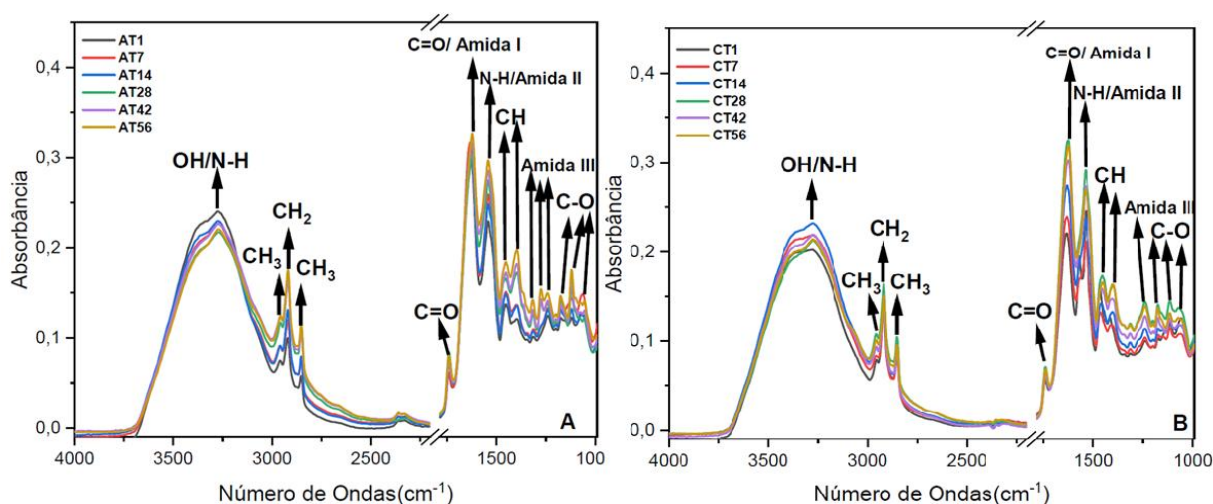
CAPÍTULO IV : RESULTADOS E DISCUSSÃO

5 RESULTADOS e DISCUSSÃO

5.1 Espectros MIR e NIR dos queijos artesanais

Os espectros médios obtidos por Espectroscopia de Infravermelho médio (MIR) dos queijos Minas Artesanais das microrregiões da Serra da Canastra e Araxá nos respectivos tempos de maturação (T1, T7, T14, T28, T42 e T56) são apresentados na Figura 7, sendo identificadas 15 bandas (máximas absorbâncias) no queijo da região do Araxá e 13 bandas no queijo da Serra da Canastra que correspondem às bandas de absorção atribuídas às vibrações e deformações de grupos funcionais.

Figura 7- Espectros de infravermelho médio (MIR) de queijos artesanais de Araxá (A) e Serra da Canastra (B) em diferentes tempos de maturação.



Os espectros obtidos por MIR foram separados nas regiões entre 3300- 2800 cm^{-1} e 1745-1060 cm^{-1} para melhor visualização das bandas. As amostras dos queijos das duas regiões estudadas apresentaram diferenças na intensidade das bandas de acordo com o tempo de maturação avaliado.

Existem duas bandas intensas na faixa de 3300 – 2800 cm^{-1} , localizadas em 3275 cm^{-1} , associada a grupos hidroxílicos e amina (O-H/NH) (JESUS et al., 2020) e a outra banda localizada em 2920 cm^{-1} (CH_2) que relaciona-se ao modo de estiramento assimétrico do metileno de cadeia alifática (alcano) (LOUDIYI et al., 2022; SKOOG et al., 2016).

Segundo SILVA et al. (2021), na banda de 3275 cm^{-1} ocorrem vibrações de estiramento simétrico e assimétrico das ligações N-H relacionadas à Amida A. Esses espectros caracterizam-se por bandas baixas e largas, o que se justifica pelo fato de a ligação de hidrogênio ser o mecanismo fundamental na estabilização e determinação da estrutura secundária das proteínas

(α -hélice e β -folha) no queijo, essa banda está relacionada ao processo bioquímico da proteólise.

Foram identificadas bandas menos intensas resultantes dos modos de estiramento assimétrico em 2960 cm^{-1} relacionados aos grupos metil terminais (CH_3) e simétrico em 2848 cm^{-1} relacionados aos (CH_2) do metileno. Ambas pertencem às cadeias alifáticas (alcanos) e são fundamentais para caracterizar quimicamente o perfil de ácidos graxos em queijos. Além disso, LOUDIYI et al. (2022) relacionaram a região de $3000\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$ a cadeia acil do C–H dos triacilgliceróis para determinar a presença de gordura, e descreveram a ocorrência de alterações nas bandas de metil e metileno e na razão CH_2/CH_3 (razão entre grupos metilenos (CH_2) e metila (CH_3) durante a maturação, essas bandas estão relacionadas ao processo da lipólise.

A banda 1745 cm^{-1} foi relacionada ao estiramento (C=O) dos ésteres, atribuídas à presença de lipídios e ácidos graxos especificamente aos triacilglicerídeos (DEWANTIER et al., 2023). Esta ligação éster é o que une as três moléculas de ácidos graxos e glicerol para formar os triacilglicerídeos, a partir da reação de esterificação, essa banda está relacionada ao processo da lipólise.

Além disso, a banda 1624 cm^{-1} foi associado à Amida I (-C-O e -C-N) sendo esse grupo funcional relacionado a estabilidade da caseína, por ser o mais sensível às mudanças estruturais e para análise de estrutura secundária da caseína, agregação de proteína e interação proteína/água, sendo a folha β mais estável a essas mudanças, a Amida I mostra os maiores efeitos da proteólise secundária (FENNEMA, 2010).

Amida II (1541 cm^{-1}), caracterizada principalmente por uma combinação da oscilação de fase no grupo N–H e do estiramento C–N e Amida III (1314 cm^{-1} e 1242 cm^{-1}), essas bandas estão associados ao processo da proteólise (LOUDIYI et al., 2022; SILVA et al., 2021; JESUS et al., 2020).

As bandas 1624 cm^{-1} , 1541 cm^{-1} , 1314 cm^{-1} e 1242 cm^{-1} são características das amidas (Amida I, Amida II e Amida III), reconhecidas como os modos básicos para estudar a estrutura secundária de proteínas com espectroscopia de infravermelho. JESUS et al. (2020) descreveram que essa região das amidas, está relacionada à formação/liberação de peptídeos e aminoácidos durante o processo da maturação resultando nas alterações das estruturas α -hélice, folha β e curva- β . Segundo FEVZIOGLU et al. (2020), a banda Amida I tem grande importância, devido ao seu intenso sinal proteico e a menor influência das cadeias laterais.

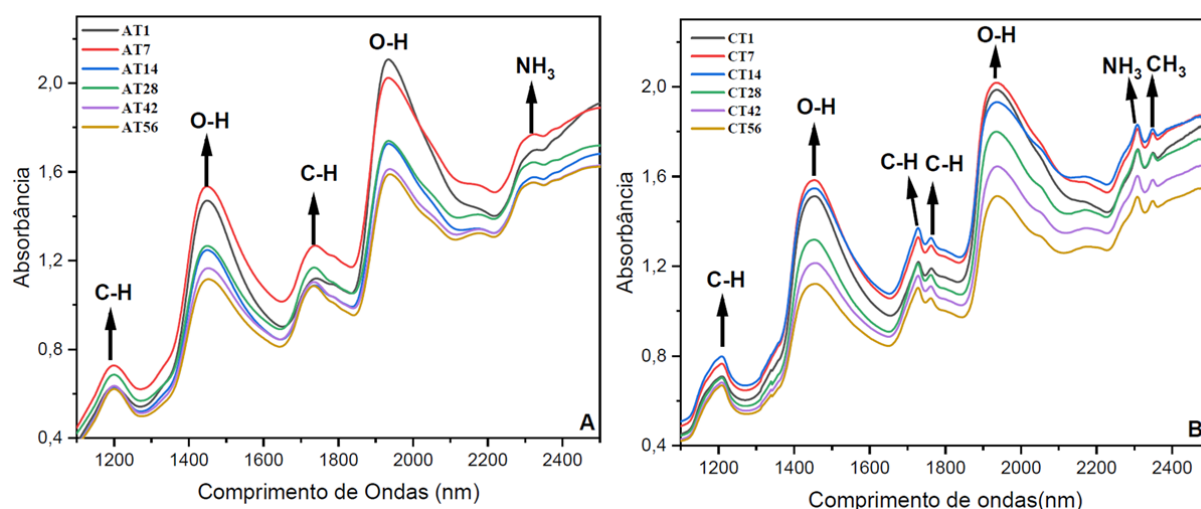
Uma banda em 1453 cm^{-1} relacionada à CH de cadeia alifática (alceno), essa banda está associada a lipólise (SKOOG et al., 2016). DEWANTIER et al. (2023) citam que as bandas entre 1173 cm^{-1} , 1120 cm^{-1} e 1060 cm^{-1} estão relacionadas aos modos vibracionais de C–O,

atribuídos principalmente a ácidos (ácidos graxos, ácido láctico) e carboidratos, os principais processos bioquímicos envolvidos são lipólise e glicólise.

Os espectros obtidos por NIR (Figura 8) são caracterizados por apresentarem bandas largas e em formato de sinos. Os queijos das diferentes regiões apresentaram diferenças de intensidade mas com comportamento semelhante de absorção das bandas, que se mostraram mais pronunciadas nas amostras do Araxá, principalmente para os tempos AT1 e AT7 e nas amostras da Serra da Canastra nos tempos CT1, CT7 e CT14 reforçando que existe diferença nos tempos iniciais de maturação quando comparadas com os demais tempos do queijo, de forma que houve uma nítida divisão dos queijos maturados dos que não são maturados, a explicação a este fato está na interferência do NIR com a água, de modo que ao avançar os dias de maturação ocorre a redução da umidade e por consequência a A_w , esse resultado veio reiterar a importância de atender o tempo mínimo para comercialização do queijo, haja visto que o queijo tende a sofrer processo de redução de umidade e A_w (Figura 8A).

A faixa do comprimento de onda dos espectros (2500-1100 nm) permitiu selecionar 7 bandas (Serra da Canastra) e 5 bandas (Araxá), com máximas absorbâncias associadas aos grupos funcionais decorrentes das vibrações moleculares dos grupos funcionais de proteínas, lipídios.

Figura 8- Espectros de infravermelho próximo (NIR) de queijos artesanais de Araxá (A) e Serra da Canastra (B) em diferentes tempos de maturação.



Os espectros das regiões dos queijos do Araxá apresentaram maiores absorbâncias comparadas com o espectro dos queijos da Serra da Canastra. Para a região do Araxá foram observadas as bandas 1210 nm, 1448 nm, 1734 nm, 1933 nm e 2321 nm, e para a região da Serra da Canastra 1210 nm, 1456 nm, 1729 nm, 1760 nm, 1937 nm, 2311 nm, 2347 nm.

As bandas de 1448 nm, 1456 nm, 1933 nm e 1937 são atribuídas ao primeiro sobretom do estiramento O-H e à combinação dos modos de estiramento e flexão de O-H (SILVA et al., 2021; LOUDIYI et al., 2022). Para XU et al. (2025), a espectroscopia de infravermelho próximo é sensível a interações intermoleculares polares, como as ligações de hidrogênio, e que esse tipo de ligação pode levar a mudanças significativas nas bandas como a força de interação entre átomos e redução da frequência de vibração.

Em queijos, variações entre 1415–1470 nm são atribuídas à água e podem indicar perda de umidade ou mudanças na estrutura da matriz durante a maturação (LOUDIYI et al., 2022).

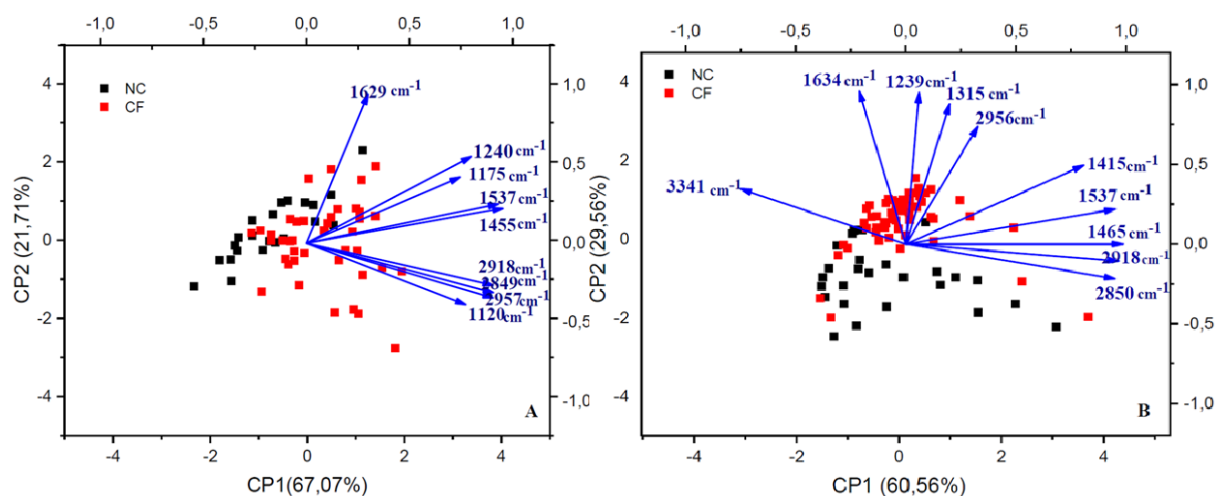
Bandas entre 1900–1940 nm corresponde à combinação de modos de estiramento e flexão da água. Esta banda é uma das mais intensas no espectro NIR de alimentos úmidos, sendo importante para quantificar a atividade de água e interações moleculares na matriz láctea (SILVA et al., 2021).

A banda 1210 nm atribuída a combinação de vibração de ligação e sobretons dos grupos CH e CH₃ relacionadas aos lipídios e bandas entre 1729 nm, 1734 nm e 1760 estão associados ao primeiro sobretom de estiramento de C-H e à deformação CH₂ relacionadas aos lipídios e por consequência ao processo da lipólise (LOUDIYI et al., 2022). Três bandas entre 2347 nm, 2321 nm e 2311 nm foram associados aos grupos funcionais NH e NH₃ das proteínas (Amida/ Amino), essas bandas estão relacionadas ao processo da proteólise (ALINOVI et al., 2019; PRIYASHANTHA et al., 2020).

5.2 Análise de Componentes Principais (ACP) do MIR

Para a análise, considerou-se os tempos (T1, T7 dias) para grupos de queijos não conformes a legislação (NC) e acima desses tempos (T14, T28, T42 e T56 dias) como queijos conformes com a legislação (CF) para a região do Araxá (A) e Serra da Canastra (B). As bandas foram selecionadas das regiões de maior absorbância dos espectros MIR. O gráfico biplot dos Componentes Principais (CPs) das amostras de Queijos Minas Artesanal (QMA) do Araxá e Serra da Canastra dos espectros MIR estão apresentados na Figura 9.

Figura 9- Análise de componentes principais (ACP) de queijos Minas Artesanais do Araxá e Serra da Canastra maturados em seis tempos diferentes (1, 7, 14, 28, 42 e 56 dias) por Espectroscopia de Infravermelho médio. (A) Araxá e (B) Serra da Canastra.



Para a região do Araxá, figura 9A, o CP1 e CP2 foram capazes de representar 88,78% da variação total dos dados. O CP1 apresentou alta correlação positiva com as variáveis 2957 cm^{-1} (CH₃), 2918 cm^{-1} (CH₂), 2849 cm^{-1} (CH₂), 1537 cm^{-1} (Amida II), 1455 cm^{-1} (CH) e 1120 cm^{-1} (C-O). Foi observado que os queijos enquadrados nos grupos CF têm tendência a serem associados aos processos bioquímicos da proteólise e lipólise. Já os queijos enquadrados como NC que são os queijos nos tempos iniciais não tem grandes transformações bioquímicas até o 7 dia de maturação.

O CP2 foi capaz de representar 21,71% da variação total dos dados, e apresentou altas correlações positivas com as absorvâncias 1629 cm^{-1} (Amida I), 1240 cm^{-1} (Amida III) e 1175 cm^{-1} (C-O). As bandas de Amida I e II (1629 cm^{-1} e 1240 cm^{-1}) são mais sensíveis às alterações na estrutura secundária das caseínas, e por consequência ao processo da proteólise, lipólise (ácidos graxos, ácido lático).

Na figura 9B (Serra da Canastra), o CP1 e CP2 foram capazes de representar 90,12% da variação total dos dados. O CP1 apresentou alta correlação positiva com as variáveis 2918 cm^{-1} (CH₂), 2850 cm^{-1} (CH₂), 1537 cm^{-1} (Amida II), 1465 cm^{-1} e 1415 cm^{-1} (CH).

O CP2 foi capaz de representar 29,56% da variação total dos dados, e apresentou altas correlações positivas com as absorvâncias 3341 cm^{-1} (O-H/N-H), 2956 cm^{-1} (CH₃), 1634 cm^{-1} (Amida I), 1315 cm^{-1} e 1239 cm^{-1} (Amida III).

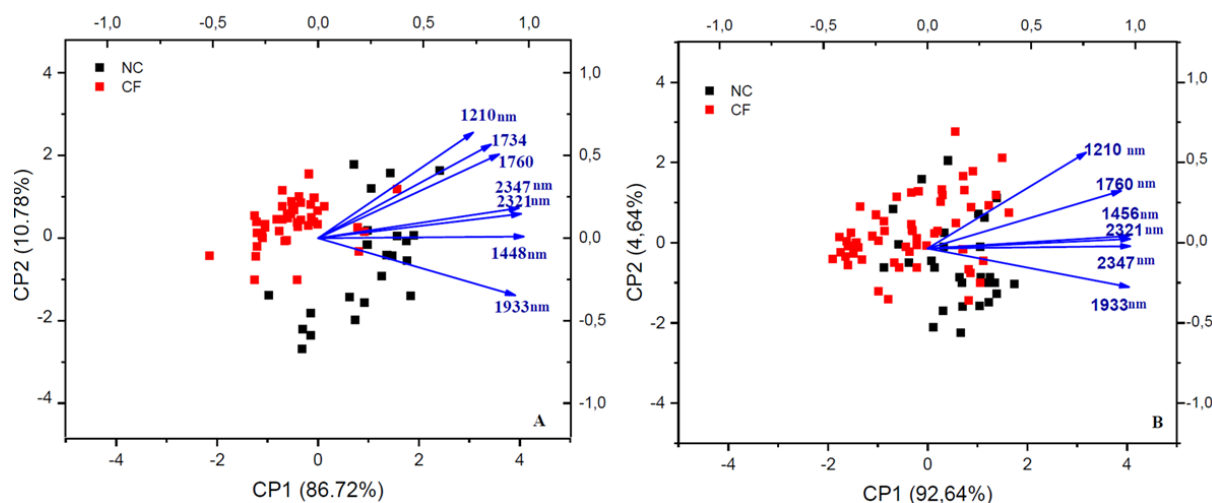
Houve uma dispersão quanto ao queijo Serra da Canastra com o CP2 separando as amostras conformes (CF) das não conformes (NC). No entanto, segundo BANDIĆ et al. (2023), nos primeiros dias de maturação há maior possibilidade de ocorrer o estágio inicial do evento

bioquímico da proteólise, que ocorre principalmente pela ação do coagulante, que inicia a degradação da caseína em peptídeos grandes e de tamanho intermediário, pela ação da plasmina e da flora secundária (BAL) responsável pelas enzimas proteolíticas (proteases e peptidases). Mas como foi observado no queijo Serra da Canastra o comportamento foi diferente, pois os queijos com os tempos iniciais (NC), não ficaram localizados no quadrante referente aos grupos funcionais da proteólise (Amida I, Amida III), reforçando que os queijos dessa região não apresentam essa transformação bioquímica tão intrínseca nos tempos iniciais.

5.3 Análise de Componentes Principais (ACP) do NIR

As bandas foram selecionadas das regiões de maior absorvância dos espectros NIR. O gráfico biplot dos Componentes Principais (CPs) das amostras de Queijos Minas Artesanal (QMA) do Araxá (A) e Serra da Canastra (B) dos espectros NIR estão apresentados na Figura 10.

Figura 10- Análise de componentes principais (ACP) de queijos Minas Artesanais do Araxá e Serra da Canastra maturados em seis tempos diferentes (1, 7, 14, 28, 42 e 56 dias) por Espectroscopia de Infravermelho próximo. (A) Araxá e (B) Canastra.



A Figura 10A apresenta os resultados obtidos pelo espectro NIR do Araxá, onde dois CPs explicaram 97,5% da variação total dos dados. O CP1 explicou 86,72% da variação dos dados, sendo altamente correlacionados com as absorvâncias 2347 nm e 2321 nm (NH e NH₃), 1933 nm e 1448 nm (O-H). As amostras consideradas como as não conformes (NC) foram as que apresentaram maiores probabilidades de terem transformações bioquímicas como proteólise e a interação com água, ou seja nos tempos iniciais pode ocorrer a incidência da perda de umidade e a_w . Segundo TAVIERA et al. (2013) a condição na qual o queijo é armazenado

durante a maturação influencia a_w ou a diminuição com a perda de umidade, proteólise e lipólise.

O CP2 explicou 10,78% da variância total dos dados, tiveram altas correlações com as absorvâncias 1760 nm e 1734 nm (C-H) e 1210 nm (CH₃). Foi observado formação de grupo no quadrante esquerdo do CP2 dos queijos Conformes (CF), de modo que esses queijos tem a maior probabilidade de ocorrência da lipólise, e sugere que o processo de maturação no Araxá promove uma padronização mais acelerada ou uniforme, resultando em um perfil espectral de conformidade mais integro para fins de fiscalização e controle de qualidade.

Para a região da Serra da Canastra, figura 10B, dois CPs explicaram 97,28% da variação total dos dados. O CP1 explicou 92,64% da variação dos dados, sendo altamente correlacionados com as absorvâncias 2347 nm e 2321 nm (NH e NH₃), 1933 nm e 1456 nm (O-H). Os queijos da Serra da Canastra apresentaram maior dispersão e sobreposição entre os grupos NC e CF. Isso ocorre por que as características espectrais dos queijos em tempos intermediários de maturação ainda se confundem muito com os queijos dos tempos iniciais. Por conta dessas inconstâncias relacionadas as matrizes complexas que se faz necessário fazer a classificação pelos métodos supervisionados como PLS-DA e SIMCA.

O CP2 explicou 4,64% da variância total dos dados, tiveram altas correlações com as absorvâncias 1760 nm (C-H) e 1210 nm (CH₃).

5.3 PLS-DA

A análise PLS-DA foi utilizada para desenvolver modelos de classificação das amostras de Queijo Minas Artesanal (QMA) de acordo com tempo de maturação, utilizando dados espectroscópicos completos MIR e NIR. Para a obtenção dos resultados de PLS-DA foram realizados diversos pré-processamento de dados conforme apresentado na Tabela S2 e Tabela S4. A técnica de PLS-DA permite prever a qual classe uma amostra pertence por meio dos modelos criados. Os modelos desenvolvidos e validados são apresentados na Tabela 1.

Os resultados obtidos por PLS-DA mostram que os melhores modelos foram obtidos a partir dos dados NIR para as amostras CF e NC na região do Araxá que passaram pelo pré-processamento da 2° derivada e a região da Canastra com os dados centralizados na média, corroborado pelo estudo de SILVA et al. (2021) que reforça o uso da técnica na investigação do estágio de maturação, na identificação de proteínas e aminoácidos, durante e após o processo de maturação.

Tabela 1- Capacidade de precisão, especificidade e sensibilidade do modelo PLS-DA para amostras de queijos Minas Artesanais do Araxá e Serra da Canastra ao longo do período de maturação, utilizando MIR e NIR.

Região	Técnica	Classe	Pré Processamento	Calibração			Validação		
				PREC(%)	ESPEC(%)	SENS(%)	PREC(%)	ESPEC(%)	SENS(%)
Canastra	MIR	CF	2° Derivada	94	95	94	80	83	78
			Savitzky-Golay	88	92	84	88	50	91
	NC		MSC	88	88	87	91	100	50
			2° Derivada	94	94	95	80	78	83
	NIR	CF	Bruto	98	95	100	84	100	80
			Centralização	96	91	100	92	100	90
		NC	Bruto	98	100	95	84	80	100
			Centralização	96	100	91	92	90	100
Araxá	MIR	CF	Bruto	93	87	96	93	96	87
			MSC	97	94	100	78	100	75
	NC		Bruto	93	96	87	84	89	75
			MSC	97	100	94	78	75	100
	NIR	CF	Bruto	91	88	92	100	100	100
			2° Derivada	93	95	92	100	100	100
		NC	Bruto	91	92	88	100	100	100
			2° Derivada	93	92	95	100	100	100

PREC= Precisão; ESPEC= Especificidade; SENS = Sensibilidade

CF: Queijos conformes com legislação; NC: Queijos não conformes com legislação.

2° Derivada: Correção de linha de base; Savitzky-Golay: Alisamento com 5 pontos de janelas; MSC: Correção de Efeito Multiplicativo; Bruto: Dados Originais sem pré-processamento; Centralização: Centralização da média

Os modelos criados usando dados de MIR para classificar amostras por tempo de maturação demonstraram forte capacidade de classificação, tanto durante o treinamento (calibração) quanto na validação, para os queijos das regiões do Araxá e Serra da Canastra. Conforme apresentado na Tabela 1, os grupos Não Conforme (NC) e Conforme (CF) apresentaram índices de classificação satisfatórios, variando entre 93% e 97%. Destaca-se que os queijos do Araxá (grupo CF) atingiram 93% de acerto, reforçando a conformidade das amostras com a legislação vigente.

Quanto à especificidade, os grupos NC e CF obtiveram resultados excelentes, entre 95% e 100% nos conjuntos de calibração e validação. Nesse parâmetro, o modelo para a região do Araxá alcançou 100%, indicando que, das 64 amostras analisadas, o modelo foi capaz de identificar corretamente todas as amostras Não Conformes (NC).

De forma análoga, a sensibilidade para ambos os grupos situou-se entre 95% e 100%, com destaque novamente para o grupo NC do Araxá, que atingiu 100%. Isso indica que o

modelo foi plenamente capaz de distinguir e classificar corretamente todas as amostras conformes (CF) dentro do conjunto analisado, assegurando a confiança do método na detecção de irregularidades no tempo de maturação.

Em relação aos modelos criados usando o NIR para classificar amostras por tempo de maturação na região do Araxá e Serra da Canastra, estes demonstraram forte capacidade de classificação durante o treinamento quanto à validação. As figuras de mérito referentes à precisão, especificidade e sensibilidade estão detalhadas na Tabela 1.

Os resultados mostraram elevada taxa de acerto para os grupos NC e CF, com índices de classificação excelentes entre 96% e 100%. Destaca-se que os queijos do Araxá pertencentes ao grupo CF atingiram 100% de acerto, o que corrobora a conformidade das amostras com a legislação vigente.

A especificidade nos grupos NC e CF apresentou índices de classificação excelente entre 95% e 100%. Ambas as regiões apresentaram desempenho máximo (100%) em subgrupos específicos: no Araxá, tanto para os grupos NC quanto CF; e na Serra da Canastra, para o grupo CF. Isso demonstra a eficiência do modelo para o Araxá, em identificar corretamente todas as 66 amostras, distinguindo com confiança os queijos conformes dos não conformes.

A sensibilidade nos grupos NC e CF também apresentou índices expressivos entre 95% e 100%. Índices de 100% foram observados nos grupos NC e CF do Araxá, bem como no grupo NC da Serra da Canastra, reforçando a confiabilidade da generalização do modelo para outros queijos artesanais.

Embora XU et al. (2025) entendam que a espectroscopia MIR seja uma técnica amplamente estudada para determinação da estrutura de proteínas secundárias, e que seja referência em resolução e sensibilidade aos traços dos componentes, os autores citam que o NIR apresenta bom desempenho em termos de eficiência operacional e de adaptação ao ambiente industrial. Assim, para fins de aplicabilidade industrial e maior poder discriminatório, os resultados do PLS-DA devem ser priorizados.

A explicação por trás do modelo do NIR ser superior ao do MIR deve-se, em parte, à sensibilidade do infravermelho próximo às interferências da água. Esse resultado corrobora aos espectros de NIR, nos quais foi nítida a distinção entre os grupos conformes (CF) e não conformes (NC) (SKOOG et al., 2016).

Os espectros de infravermelho próximo (NIR) constituem uma fonte rica e natural de informações sobre a anarmonicidade das vibrações moleculares. Nessa região, a absortividade das transições diminui gradualmente em direção aos sobretons mais elevados e às bandas de combinação de ordem superior. A coexistência de múltiplas bandas (como o primeiro, segundo

e terceiro sobretons) em um mesmo espectro representa uma vantagem fundamental da técnica (BEC et al., 2019). No NIR, as bandas originadas das vibrações de grupos X-H (por exemplo, C-H, O-H, N-H) são fortemente definidas, sendo esses grupos os principais responsáveis pela formação de ligações de hidrogênio. Tal característica amplia o potencial para explorar a natureza dessas ligações e das interações moleculares (MOHAMMED et al., 2016).

Nessa região espectral, observa-se que bandas referentes a espécies não associadas costumam ser mais intensas do que aquelas de moléculas agregadas. Essa característica vibracional, distinta da observada no infravermelho médio (MIR), gera um expressivo volume de informações espectrais independentes e de alto valor para a físico-química. Contudo, a análise no NIR permanece sujeita a ambiguidades devido à sobreposição de bandas, à anarmonicidade e à onipresença de efeitos coexistentes, que resultam em mudanças espectrais complexas (LIU et al., 2018).

Esses desafios intrínsecos representaram, historicamente, obstáculos para a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), impulsionando o uso extensivo de métodos de pré-processamento quimiométrico. Por outro lado, a penetração relativamente profunda da radiação NIR permite uma análise eficaz e aprofundada da amostra, conferindo aplicabilidade a estudo de estágio de maturação. Em suma, o NIR demonstra uma adequação única para a investigação de interações intermoleculares, com destaque para as ligações de hidrogênio (MARTINS et al., 2023).

Os resultados mais confiáveis obtidos com o NIR, quando comparados ao MIR, podem ser justificados pelas características intrínsecas das vibrações moleculares. As vibrações fundamentais são influenciadas pelo arranjo tridimensional da molécula e por forças externas, como as ligações de hidrogênio. Em peptídeos e proteínas, as amidas apresentam distintos modos vibracionais (amida I, II e III), resultantes da combinação de diferentes partes da molécula. Devido à sua sensibilidade conformacional, essas vibrações sofrem deslocamentos em função da estrutura secundária da proteína α -hélices, folhas β , espirais aleatórias e alças espirais (MENDES et al., 2021).

No entanto o modo amida III ($1200\text{--}1340\text{ cm}^{-1}$) que envolve uma combinação complexa de estiramento CN e flexões NH e CO, apresenta um diferencial especialmente para a análise de alimentos: a baixa interferência das moléculas de água. Este é um ponto crítico, pois a água é um forte absorvedor de radiação, apresentando bandas proeminentes em 3360 cm^{-1} (estiramento O-H) e 1640 cm^{-1} (flexão H-O-H). A sobreposição da banda de flexão da água com a região da amida I pode dificultar a interpretação dos espectros no infravermelho médio (LOUDIYI et al., 2022).

Essa eficácia da técnica NIR decorre da presença de sobretons e combinações de vibrações de grupos amida (N-H) que resulta em mudanças características nas bandas espectrais. Essa particularidade torna a técnica amplamente utilizado na área de pesquisa e análise de proteínas. Entre as principais aplicações do NIR, destacam-se a detecção de fraudes em derivados lácteos, a rastreabilidade da origem (incluindo procedência regional e combate à rotulagem falsa) (SAKKAS et al., 2021).

A combinação da espectroscopia NIR com métodos estatísticos como ACP, PLS-DA constitui uma ferramenta relevante para a autenticação e classificação de queijos. Além da sua versatilidade em diferentes estágios de maturação, essa técnica possui alto potencial de integração em sistemas de automação. Ao facilitar o monitoramento em tempo real, o NIR permite a otimização dos processos produtivos e a garantia da padronização de qualidade (HEBLING et al.;2022).

O desempenho do PLS-DA observado neste estudo é reforçado por FITZTUM et al. (2023), que utilizaram a mesma técnica para distinguir variedades de queijos (Minas Artesanal, Colonial, Padrão e Meia Cura). Os resultados mostraram a capacidade da técnica em distinguir queijo Minas Artesanal. Dentre as amostras analisadas, as maiores taxas de acerto (precisão) foram observadas para as classes Minas Artesanal (92%) e Meia Cura (80%), superando os resultados do Minas Padrão (76%) e Colonial (72%). Além disso, o modelo apresentou valores de especificidade superiores a 80%, confirmando que o PLS-DA foi eficaz em não classificar erroneamente as amostras de queijo semiduro.

A explicação para o melhor desempenho nos parâmetros de figura de mérito é devido ao fato de que PLS-DA atua como uma abordagem de classificação discriminante, ou seja exige a definição e representação de pelo menos duas classes no conjunto de treinamento. Esses métodos operam buscando um delimitador que divide o domínio global em regiões específicas, atribuídas a classes distintas. Enquanto a natureza desse delimitador é característica do método, sua posição e geometria são moldadas pelas amostras de treinamento de todas as classes envolvidas. Como tal delimitador estabelece regiões abertas e exclusivas, os métodos discriminante raramente produzem atribuições duplas, pois as áreas das classes não se sobrepõem (FERREIRA, 2015).

Quanto aos resultados da matriz de confusão (Tabela 2), os dados obtidos por MIR foram totalmente precisos para o queijos do Araxá para o grupo não conformes (NC- T1 e T7 dias) na calibração e validação. Contudo, as amostras do grupo conformes (CF- T14, T28, T42 e T56 dias) oriundas das regiões de Araxá demonstraram resultados superiores apenas na calibração.

Para a região da Serra da Canastra na etapa de calibração dos dados do MIR, 2 amostras

referentes ao tempo de maturação do CF foram classificadas incorretamente como NC (5,40%). Inversamente, 1 amostras de queijos NC foram erroneamente atribuídas ao grupo CF (4,54%). Na etapa de validação, 4 amostras do CF foram classificadas como NC (21,05%), enquanto apenas 1 amostra de NC foi classificada como CF (16,67%).

Tabela 2- Matriz de confusão para amostras de queijos artesanais do Araxá e Serra da Canastra de calibração e validação com base em modelos PLS-DA, considerando dados NIR e MIR.

Região	Técnica	Classe	Calibração		Classe	Validação	
Canastra	MIR		CF	NC		CF	NC
		CF	94,59%	5,40%	CF	78,94%	21,05%
	MIR	NC	4,54%	95,45%	NC	16,67%	83,33%
			CF	NC		CF	NC
	NIR	CF	100%	0%	CF	90%	10%
		NC	9,09%	95,45%	NC	0%	100%
Araxá	MIR		CF	NC		CF	NC
		CF	100%	0%	CF	75%	25%
	MIR	NC	5,26%	94,73%	NC	0%	100%
			CF	NC		CF	NC
	NIR	CF	92,30%	7,69%	CF	100%	0%
		NC	5%	95%	NC	0%	100%

CF: Queijos conformes com legislação; NC: Queijos não conformes com legislação.

A matriz de confusão para os dados NIR também apresentou classificações corretas para os grupos CF e NC nas etapas de treinamento e validação para os queijos do Araxá e da Serra da Canastra. Contudo, o destaque foi o queijo da região de Araxá, que apresentou desempenho superior a 90% tanto na calibração quanto na validação, além de excelentes resultados na distinção dos grupos durante a validação. Este desempenho indica a viabilidade do modelo para prever o tempo de maturação de queijos artesanais nessas regiões, em conformidade com a Portaria IMA nº 2322, 19 de Agosto de 2024 (IMA, 2024). Esta norma define o período de maturação do Queijo Minas Artesanal (QMA) para Araxá e Serra da Canastra, permitindo que os resultados espectroscópicos auxiliem de forma rápida e precisa no enquadramento dos produtos aos tempos previstos nos decretos estaduais de Minas Gerais.

CARDOSO et al. (2025) utilizaram técnicas espectroscópicas para a discriminação do Queijo Minas Artesanal (QMA) proveniente das regiões do Serro, Serra da Canastra e Cerrado. Os autores observaram que o modelo PLS-DA apresentou classificações incorretas para amostras do Serro e da Serra da Canastra durante as etapas de calibração e validação. Em contrapartida, para a região do Cerrado, a precisão da classificação foi de 88,88% durante o

treinamento e 100% durante a validação. Foi observado ainda que embora a diferenciação seja possível, fatores ambientais como clima, vegetação e manejo do gado leiteiro podem induzir a classificação incorreta.

5.4 SIMCA

Para a obtenção dos resultados de Modelagem Suave Independente de Classes (SIMCA) foram realizados diversos pré-processamentos de dados conforme apresentado na Tabela S1 e Tabela S3, dentre os resultados foram selecionados os melhores para discussão.

As respostas mais expressivos foram obtidos a partir dos dados brutos de MIR da região de Araxá, abrangendo os grupos conforme (CF) e não conforme (NC), apresentando 100 % de confiabilidade de generalização do modelo para outros queijos artesanais mostrado na tabela 3. Estes índices são considerados excelentes, pois quanto mais próximo de 100% maior a probabilidade de uma resposta correta e também denota uma elevada capacidade preditiva do modelo. Em contrapartida, embora o NIR tenha apresentado resultados satisfatórios para ambas regiões e grupos, estes não demonstraram a mesma consistência observada no MIR.

Tabela 3- Capacidade de precisão, especificidade e sensibilidade do modelo SIMCA para amostras de queijos Araxá e Serra da Canastra utilizando MIR e NIR.

Região	Técnica	Classe	Pré Processamento	Calibração			Validação		
				PREC(%)	ESPEC(%)	SENS(%)	PREC(%)	ESPEC(%)	SENS(%)
Canastra	MIR	NC	1º Derivada	89	87	94	80	81	77
			2º Derivada	93	89	100	80	73	100
		CF	MSC	84	70	94	84	0	100
			2º Derivada	84	63	97	76	33	89
	NIR	NC	Bruto	94	94	95	80	75	100
			1º Derivada	88	86	91	88	90	80
		CF	Savitzky-Golay	98	100	95	84	80	100
			Centralização	93	91	94	88	100	85
Araxá	MIR	NC	Bruto	100	100	100	100	100	100
			Centralização	100	100	100	100	100	100
		CF	Bruto	100	100	100	100	100	100
			Centralização	100	100	100	100	100	100
	NIR	NC	Bruto	91	85	100	85	81	100
			2º Derivada	97	96	100	95	94	100
		CF	SNV	97	94	100	90	87	100
			2º Derivada	93	90	96	100	100	100

PREC= Precisão; ESPEC= Especificidade; SENS = Sensibilidade

CF: Queijos conformes com legislação; NC: Queijos não conformes com legislação.

1º e 2º Derivada: Correção de linha de base; Savitzky-Golay: Alisamento com 5 pontos de janelas; MSC: Correção de Efeito Multiplicativo; Bruto: Dados Originais sem pré-processamento, Centralização: Centralização da média.

FITZTUM et al. (2023) utilizaram o método SIMCA para a classificação de diferentes variedades de queijos (Minas Artesanal, Colonial, Minas Padrão e Meia Cura), os resultados mostraram a capacidade da técnica em distinguir os queijos. Os referidos autores reportaram taxas de acerto superiores para as denominações Meia Cura (84,37%) e Minas Padrão (81,25%), seguidas pelos queijos Minas Artesanal (76%) e Colonial (71,87%). Os valores de especificidade situaram-se entre 80% e 100% para as denominações Minas Artesanal, Minas Padrão e Meia Cura, ou seja o modelo SIMCA foi eficaz em não classificar erroneamente as amostras de queijo semiduro.

A eficácia do Infravermelho Médio (MIR) em relação ao Infravermelho Próximo (NIR) justifica-se pela natureza das informações moleculares obtidas. Enquanto o NIR lida predominantemente com sobretons e bandas de combinação que geram sinais mais fracos e complexos, o MIR permite o acesso direto às vibrações fundamentais da estrutura proteica (DEWANTIER et al., 2023).

Como as ligações de hidrogênio são os pilares de estabilização das proteínas. O MIR destaca-se como um dos poucos métodos capazes de relatar diretamente a força dessas interações. Nessa região do espectro, observa-se que a formação da ligação de hidrogênio reduz a força restauradora das vibrações de estiramento (diminuindo sua frequência) e aumenta a das vibrações de flexão. Essa sensibilidade permite medir deslocamentos específicos (como no grupo C=O) que seriam impossíveis de isolar com precisão no NIR (LOUDIYI et al., 2022).

Além disso, o MIR oferece especificidade das bandas Amida (A, B, I, II e III). A estrutura secundária das proteínas (α -hélices e folhas β) é definida por padrões de vibração da cadeia principal, e o MIR fornece janelas de observação claras para esses modos. A banda Amida I, por exemplo, é essencial para identificar o enrolamento da α -hélices ou o empilhamento folhas β . Além do mais, a amida I, que absorve próximo a 1650 cm^{-1} , origina-se primordialmente do estiramento C=O, com contribuições menores do estiramento CN fora de fase, da deformação CCN e da flexão NH no plano. Esta é a característica mais investigada na espectroscopia de proteínas, pois seu perfil é altamente sensível aos elementos da estrutura secundária e sofre pouca interferência das cadeias laterais (ANDRADE et al., 2018).

Já a banda Amida II, por envolver a flexão N-H, é altamente sensível ao ambiente químico da proteína, uma resolução que o NIR não consegue replicar. Contudo, nela a correlação entre a frequência vibracional e a estrutura secundária é menos direta do que na amida I (ANDRADE et al., 2018). Por fim, o MIR possui sensibilidade suficiente para detectar mudanças no ambiente de um único átomo, permitindo a identificação de cadeias laterais essenciais para o mecanismo molecular (SENA et al., 2018).

Segundo XU et al. (2025), um dos fatores que pode ter influenciado os resultados do modelo SIMCA para os dados NIR é a dificuldade de extrair informações e interpretar a grande quantidade de dados espectrais. Acrescenta-se a isso o fato de que a espectroscopia de infravermelho próximo (NIR) apresenta forte sensibilidade às ligações de hidrogênio e às variações de temperatura. Além disso, a presença de sinais sobrepostos resulta em um espectro com bandas largas, o que dificulta a resolução e a interpretação individual dos picos.

Os resultados superiores obtidos pelo método SIMCA na região do infravermelho médio (MIR) podem ser atribuídos à maior resolução e especificidade das bandas fundamentais nesta região, em contraste com os sobretons fracos e sobrepostos do infravermelho próximo (NIR). Uma vez que o SIMCA baseia-se na modelagem da variância interna de cada classe grupo através do ACP, a presença das bandas Amida I e II no MIR fornece variáveis latentes com alto significado químico e estrutural. A sensibilidade direta do MIR às ligações de hidrogênio permite que o modelo defina fronteiras de classe mais precisas, enquanto no NIR, a sobreposição excessiva de bandas resulta em modelos de classe menos definidos e com menor poder de discriminação (SAKKAS et al., 2021).

CAPÍTULO V : CONCLUSÕES

6.CONCLUSÃO

A caracterização espectral por MIR e NIR permitiu identificar a variabilidade química dos queijos Minas Artesanais (Araxá e Serra da Canastra) ao longo dos 56 dias de maturação. No MIR, as bandas espectrais refletiram com clareza as alterações nos grupos amina/amida (proteólise), ácidos graxos (lipólise) e carboidratos (glicólise), enquanto o NIR apresentou as variações em lipídios (lipólise) e proteínas (proteólise). Além disso, o NIR mostrou o quanto sensível é a interferência das ligações de hidrogênio com a nítida divisão de grupos conformes (CF) e não conformes (NC).

A Análise de Componentes Principais (ACP) aplicada aos dados de MIR e NIR foram importantes para entender quanto a distinção dos queijos e grupos. Na região do Araxá, revelou uma associação direta entre os queijos conformes (CF) com os processos bioquímicos da proteólise e lipólise. Quanto a região da Serra da Canastra, observou-se um comportamento bioquímico distinto. Em relação ao NIR, a região do Araxá, evidenciou o processo da perda de umidade e atividade de água (a_w) nos estágios iniciais (NC), além disso associou aos queijos Conformes (CF) à lipólise. Em contrapartida, os queijos da Serra da Canastra apresentaram maior dispersão e sobreposição espectral entre os grupos NC e CF.

A análise pelo PLS-DA, mostrou que o MIR e NIR foram capazes de gerar modelos para discriminar os QMA. Com NIR apresentando melhor desempenho para os modelos nas amostras enquadradas nos grupos CF e NC da região do Araxá. Isso confirma que a técnica é capaz de discriminar com total segurança as amostras em relação ao limite crítico de 14 dias exigido pela legislação vigente.

Quanto ao SIMCA melhores modelos foram obtidos a partir dos dados de MIR para a região do Araxá, abrangendo os grupos conforme (CF) e não conforme (NC). Dessa forma, a aplicação das técnicas espectroscópicas combinadas com a quimiometria se mostrou uma importante ferramenta estratégica para a fiscalização, garantindo a conformidade regulatória, a autenticidade e a segurança dos queijos artesanais.

CAPÍTULO VI : REFERÊNCIAS

7. REFERÊNCIAS

- ALINOVI, Marcello; MUCCHETTI, Germano; TIDONA, Flavio. Application of NIR spectroscopy and image analysis for the characterisation of grated Parmigiano-Reggiano cheese. **International Dairy Journal**, v. 92, p. 50-58. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.01.010>.
- ANDRADE, J. ; PEREIRA, C. G.; RANQUINE, T. AZARIAS, C. A.; BELL, M. J. V.; ANJOS, V de C. dos. Long-Term Ripening Evaluation of Ewes' Cheeses by Fourier-Transformed I. **Journal of Spectroscopy**. v. 2018, p. 9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/1381864>.
- APROCAN- Associação dos produtores de queijos canastra. 2024. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.gov.br/inpi/ptbr/servicos/indicacoes-geograficas/arquivos/cadernos-de-especificacoes-tecnicas/Canastra.pdf>. Acesso em 20 de agosto de 2025.
- ARAÚJO, J. P. A.; CAMARGO, A. C.; CARVALHO, A. F.; NERO, L. A. Uma análise histórico-crítica sobre o desenvolvimento das normas brasileiras relacionadas a queijos artesanais. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 72, p. 1845- 1860, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4162-11766>
- ATASEVER, M.; MAZLUM, H. Biochemical Processes During Cheese Ripening. **Veterinary Food Hygiene and Technology**. v. 19, p. 174-182. 2024. DOI: 10.17094/vetsci.1609184.
- BARRETT, T.; DOWLE, M.; SRINIVASAN, A.; GORECKI, Jan; CHIRICO, M.; HOCKING, T.; SCHWENDINGER, B.; KRYLOV, I. **data.table: Extension of data.frame**. Versão 1.16.2. CRAN, 2025. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=data.table>. Acesso em: 26 dez. 2025.
- BANDIĆ, L. M.; OŠTARIĆ, F.; VINCEKOVIĆ, M.; MIKULEC, N. Biochemistry of aroma compounds in cheese. **Mljekarstvo : Dairy Experts Journal**. v. 73, p. 211-224. 2023. DOI: 10.15567/mljekarstvo.2023.0401.
- BRASIL. Dispõe sobre o processo de fiscalização de produtos alimentícios de origem animal produzidos de forma artesanal. **Lei nº 13.680, de 14 de junho de 2018**. 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/producao-animal/selo-arte-selo-queijo-artesanal/legislacao/LEIN13.680DE14DEJUNHODE2018..pdf/view>. Acesso em 20 de outubro de 2025.
- BRASIL. Lei nº 13.860, de 18 de julho de 2019. **Dispõe sobre a elaboração e a comercialização de queijos artesanais**. Brasília, DF: Presidência da República. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/producao-animal/selo-arte-selo-queijo-artesanal/legislacao/lei-no-13-860-de-18-de-julho-de-2019.pdf/view>. Acesso em 01 de

janeiro de 2026.

BRASIL. Dispõe sobre a elaboração e a comercialização de produtos alimentícios de origem animal produzidos de forma artesanal. **Decreto nº 11.099, de 21 de junho de 2022**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/producao-animal/selo-arte-selo-queijo-artesanal/legislacao/decreto-no-11-099-de-21-de-junho-de-2022-decreto-no-11-099-de-21-de-junho-de-2022-dou-imprensa-nacional.pdf/view>. Acesso em 30 de outubro de 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Lista de IGs Nacionais e Internacionais Registradas**. Brasília, DF: MAPA, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/indicacao-geografica/listaigs>. Acesso em: 22 de dezembro de 2025.

BRASIL. **Curso selos de identificação artesanal: selo ARTE e selo queijo artesanal**. [S. l.]: Enagro/Mapa; Centro de Educação a Distância e Tecnologias Educacionais/UnB, 2024. Conteúdo: Rafaela Couto; Fabrício Santana Santos.

CAMPOS, S. K.; OLIVEIRA, W. A. F.; DE OLIVEIRA, C. C.; MELO, C. M. T. Avaliação microbiológica de queijos minas artesanal da região do Pontal do Triângulo Mineiro. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 3, p. 1-8, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v12i2.40282>.

CAMARGO, A. C. COSTA, E. A.; FREITAS, A. F. R. de; NERO, L. A. ; CARVALHO, A. F. de. Microbial shifts through the ripening of the “Entre Serras” Minas artisanal cheese monitored by high-throughput sequencing. **Food Research International**. v. 139, p.1-8. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109803>.

CARDOSO, K. L. R.; JESUS, J. C.; DARGÈRE, A. F.; CAPELA, A. P. da; OLIVEIRA, T. de F.; CARVALHO, G. R.; SANTOS, L. S.; FARIA, P. B., FERRÃO, S. P. B. Discrimination of artisanal Minas cheeses according to geographical origin using spectroscopic and chromatographic techniques associated with chemometrics. **Food Chemistry**. v. 484, p. 144466. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144466>

CHAMPE, P. C.; HARVEY, R. A. **Bioquímica Ilustrada**. In Capítulo 6: Conceitos Básicos do Metabolismo. 2. ed. Porto Alegre, RS: Artmed, 2002. p. 81-91. ISBN 8573070986.

COSTA, I. B. B. de A. Maturação em queijo dos Açores Determinação de ácidos orgânicos e metabolismo do lactato. Lisboa: (Dissertação de Mestrado), Universidade de Lisboa, 2012. p.105.

CURRÒ, S.; MANUELIAN, C. L.; PENASA, CASSANDRO, M. M.; DE MARCHI, M. *Technical note: Feasibility of near infrared transmittance spectroscopy to predict cheese ripeness*. **Journal of Dairy Science**. v. 100, p. 1-11. 2017. DOI:

<https://doi.org/10.3168/jds.2017-13001>.

DA SILVA, K. T.; OLIVEIRA M., P. J. Aspectos geográficos, culturais e socioeconômicos do Queijo Minas Artesanal das Serras da Ibitipoca, MG. **Revista de Geografia- PP GEO-UFJF**, v. 13, n. 1.2023.

DEWANTIER, G. R.; TORLEY, P. J.; BLANCH, E. W. Identifying Chemical Differences in Cheddar Cheese Based on Maturity Level and Manufacturer Using Vibrational Spectroscopy and Chemometrics. **Molecules**, v. 28, p. 8051. 2023. DOI: [10.3390/molecules28248051](https://doi.org/10.3390/molecules28248051).

DUPONT, M. F.; ELBOURNE, A.; COZZOLINO, D.; CHAPMAN, J., V. TRUONG, V. K.; CRAWFORD, R. J.; LATHAM, K. Chemometrics for environmental monitoring: a review. **Analytical Methods**, v. 12, p. 4597–4620. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0AY01389G>.

EMATER. Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de Minas Gerais. 2023. Queijo Minas Artesanal Patrimônio Cultural e Imaterial Brasileiro. Disponível em: <https://www.emater.mg.gov.br/portal.do/site-noticias/emater-mg-publica-catalogo-do-queijo-minas-artesanal-com-informacoes-de-74-produtores-do-estado>

[/?flagweb=novosite_pagina_interna_noticia&id=27052](https://www.emater.mg.gov.br/portal.do/site-noticias/emater-mg-publica-catalogo-do-queijo-minas-artesanal-com-informacoes-de-74-produtores-do-estado/?flagweb=novosite_pagina_interna_noticia&id=27052). Acesso em 01 de dezembro de 2024.

EMATER. Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural de Minas Gerais. **Catálogo do Queijo Minas Artesanal**. 2022. Disponível: <https://www.emater.mg.gov.br/download.doid=87229>. Acesso em: 16 de abril de 2025.

ESKIN, N.A. M.; SHAHIDI, F. Bioquímica de Alimentos. 3 ed. Rio de Janeiro: Elsevier. 2015.

FERREIRA, M. M.C. **Quimiometria: Conceitos. Métodos e Aplicações**. 1. ed. Campinas: Unicamp, 2015.

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

FITZTUM, A. C.; LIMA, L. S.; JUDACEWSKI, P.; SALEM, R. D. S.; LINDNER, J. D.; DEMIATE, I. M.; ZIELINSKI, A. A. F.; ALBERTI, A.; NOGUEIRA, A. Evaluation of traditional semi-hard Brazilian cheeses using chemometric tools to identify possible denomination fraud. **International Journal of Dairy Technology**, v. 76, p. 616-626. 2023. DOI: 10.1111/1471-0307.12954.

FILHO, M. de J.; KLEIN, B.; WAGNER, R.; GODOY, H. T. Key aroma compounds of Canastra cheese: HS-SPME optimization assisted by olfactometry and chemometrics. **Food Research International**, v. 150, p.110788, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110788>.

FILHO, J. V. D.; LUNARDI, A.; FERREIRA, C. C.; CAVALI, J.; VAIS, J. O.; DIAS, A. de A. Non Starter Lactic acid bacteria (NSLAB): A challenge to the cheese industry. **Brazilian**

- Journal of Development**, v.7, n.3, p. 26383-26409. 2021b. DOI: [10.34117/bjdv7n3-372](https://doi.org/10.34117/bjdv7n3-372).
- FONSECA, S. H.; SOUZA, M. R. ; de SOUZA, B. M. S; CORTEZ, M. A. S.; da FONSECA, L. M. Factors related to ripening of artisanal cheeses which have depletive effects on pathogenic microorganisms – a review. **Revista Instituto Laticínios Cândido Tostes**.v. 77, p. 227-238. 2022. DOI: 10.14295/2238-6416.v77i4.910.
- FIRMO, M. J. N.; MENEZES, L. D. M.; SALES, G. de A.; CARVALHO, A. F. de; COSTA, N. M. E. P. de L. da ; JÚNIOR, B. R. de C. L.; MARTINS, M. L. Diagnosis of the microbiological quality of fiscal artisanal Minas cheese samples. **Food Control**. v. 153 , p. 1-10. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109887>.
- FEVZIOGLU, M.; OZTURKB, O. K.; HAMAKER, B. R.; CAMPANELLA, O. H. Quantitative approach to study secondary structure of proteins by FT-IR spectroscopy, using a model wheat gluten system. **International Journal of Biological Macromolecules**. v. 164, p. 2753–2760. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.299>.
- FOX, P. F.; GUINEEE, T. P.; COGANN, T. M.; MCSWEENEY, P. L. H. **Fundamentals of Cheese**. 2. Ed. New York, EUA: Springer. 2017a.
- FOX, P.F.; UNIACKE- LOWE, T.; MCSWEENEY, P. L. H.; O’ MAHONY, J.A. **Dairy Chemistry and Biochemistry**. 2. Ed. New York, EUA: Springer. 2017b.
- HEBLING E TAVARES, J. P.; MEDEIROS, M. L. da S.; BARBIN, D. F. Near-infrared techniques for fraud detection in dairy products: A review. **Journal of Food Science**. v. 87, p. 1917-2244. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16143>.
- IMA, Instituto Mineiro de Agropecuária. Dispõe sobre o período de maturação do Queijo Minas Artesanal. **Portaria do IMA nº 1736, de 27 de julho de 2017**.
- IMA, Instituto Mineiro de Agropecuária. Dispõe sobre a produção e a comercialização dos queijos artesanais de Minas Gerais. **Lei nº 23.157, de 18/12/2018**. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/LEI/23157/2018/>. Acesso em 28 de dezembro de 2025.
- IMA, Instituto Mineiro de Agropecuária. Identifica a Região de Diamantina como produtora de Queijo Minas Artesanal. **Portaria nº 2.129, de 22 de março de 2022**. 2022c.
- IMA, Instituto Mineiro de Agropecuária. Dispõe sobre os períodos de maturação do Queijo Minas Artesanal. **Portaria nº 2322, 19 de Agosto de 2024**.
- ISAKSSON , T. e NAES, T. The Effect of Multiplicative Scatter Correction (MSC) and Linearity Improvement in NIR Spectroscopy’. **Application Spectroscopy**. v, 42 p.1273-1284. 1988.
- JAHANI, T.; KASHANINEJAD, M.; ZIAIIFAR, A. M.; GOLZARIAN, M.; AKBARI, N.;

- SOLEIMANIPOUR, A. Effect of selected pre-processing methods by PLSR to predict low-fat mozzarella texture measured by hyperspectral imaging. **Journal of Food Measurement and Characterization**. v. 18, p.5060–5072. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-024-025560>
- JESUS, J. C.; SILVA, G. J.; GONÇALVES, B. R. F.; SOUZA, M .R.; SANTOS, L. S.; FERRÃO, S. P. B. Quick identification of the time of maturation of artisanal Minas cheese by FTIR-ATR spectroscopy and multivariate techniques. **Journal Brazilian Chemical Society**. v.31, p. 2001-2011. 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.21577/0103-5053.20200100>.
- JÚNIOR, L. C. G. C.; MORENO, V. J.; MAGALHÃES, F. A. R.; COSTA, R. G. B.; RESENDE, E. C. ; CARVALHO, K. B. A. MATURAÇÃO DO QUEIJO MINAS ARTESANAL DA MICRORREGIÃO CAMPO DAS VERTENTES E OS EFEITOS DOS PERÍODOS SECO E CHUVOSO. **Revista Instituto Laticínios Cândido Tostes**. v. 69, n. 2, p. 111-120, 2014. DOI: 10.14295/2238-6416.v69i2.326.
- KAMIMURA, B. A.; MAGNANI, M.; LUCIANO, W. A.; CAMPAGNOLLO, F. B.; PIMENTEL, T. C.; ALVARENGA, V. O.; PELEGRINO, B. O.; CRUZ, A. G.; SANT’ANA, A. S.. Brazilian Artisanal Cheeses: An Overview of their Characteristics, Main Types and Regulatory Aspects. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**. v. 18, p. 1636–1657, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12486>.
- KHARBACH, M.; MANSOURI, M. A.; TAABOUZ, M.; YU, H. Current Application of Advancing Spectroscopy Techniques in Food Analysis: Data Handling with Chemometric Approaches. **Foods**. v. 12, p. 2753. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12142753>
- KAMAL, M.; KAROUI, R. Analytical methods coupled with chemometric tools for determining the authenticity and detecting the adulteration of dairy products: A review. **Trends in Food Science in Technology**, v. 46, p. 27-48, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.07.007>.
- KUCHERYAVSKIY, S. **mdatools: Multi-way Data Analysis Tools**. Versão 0.14.1. CRAN, 2023. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=mdatools>. Acesso em: 26 dez. 2025.
- KIELISZEK, M.; POBIEGA, K.; PIWOWAREK, K.; KOT, A. M. Characteristics of the Proteolytic Enzymes Produced by Lactic Acid Bacteria. **Molecules**. v. 26, p. 1858. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26071858>.
- KOOLMAN, J.; ROHM, Klaus- H. **Bioquímica**.3 ed. Porto Alegre: Artmed. 2005.
- KUCHERYAVSKIY, S.. **pcv: Multi-way Data Analysis Tools**. Versão 0.14.1. CRAN, 2024. . Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=mdatools>. Acesso em: 26 dez. 2025.

- LEI, T.; SUN, D-W. Developments of Nondestructive Techniques for Evaluating Quality Attributes of Cheeses: A Review. **Trends in Food Science and Technology**. v.88, p.527-542, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.04.013>.
- LILAND, K. H. **plsVarSel: Functional Data Analysis and Spectroscopy**. Versão 1.3-5. CRAN, 2025. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=baseline>. Acesso em: 26 dez. 2025.
- LIU, N.; PARRA, H. A.; PUSTJENSA, A.; HETTING, K.; MONGONDRY P.; RUTH, S. M. Van. Evaluation of portable near-infrared spectroscopy for organic milk authentication. **Talanta** v.184, p. 128-135, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.02.097>.
- LOUDIYI, M.; TEMIZ, H.T.; SAHAR, A.; AHMAD, M. H.; BOUKRIA, O.; HASSOUN, A.; AÏTKADDOUR, A.; Spectroscopic techniques for monitoring changes in the quality of milk and other dairy products during processing and storage. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 62, p. 3063-3087. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1862754>.
- MARTINS, J. A.; CARDOSO, M. de M.; FLORENCIO, G. M.; SARGENTELLI, V. NIR associado à quimiometria—uma poderosa ferramenta analítica. **Prospectus**, v. 5, p. 15-48, 2023. DOI: 10.5281/zenodo.10045561.
- MELO, A. P. M.; BENDAYAN, L. L.; RAMOS, M. M.; BICHARA, C. M. G. Estudo retrospectivo de dados microbiológicos de produtos lácteos artesanais no estado do Pará. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 22, p. 811-824, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv22n1-043>
- MENDES, E.; DUARTE, N. Mid-Infrared Spectroscopy as a Valuable Tool to Tackle Food Analysis: A Literature Review on Coffee, Dairies, Honey, Olive Oil and Wine. **Foods**. v. 10, p. 477. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10020477>.
- MIGUELEZ, J. M. M.; MARTIN, I.; ROBLEDO, J.; VENTANAS, S.; CORDOBA, J. J. Effect of Artisanal Processing on Volatile Compounds and Sensory Characteristics of Traditional Soft-Ripened Cheeses Matured with Selected Lactic Acid Bacteria. **Foods**, v. 14, p. 1- 20, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14020231>.
- MOHAMMED, Y. F.; SALEM, MD E. Z.; MD, I. M. I.; SHAHIN, MD.; ABDO, H. M. MD; Emam, H. E. MD.; FAWZY, M. MD; SALAM, M. F.; MD, A. Applicability of Fourier transform infrared (FTIR)spectroscopy in rapid identification of some Candida and dermatophyte species infections in humans. **International Journal of Dermatology**, v. 55, p. 1164–1171, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijd.4957>.
- MONTEIRO, R. P.; MATTA, V. M. Queijo Minas Artesanal: Valorizando a Agroindústria

Familiar. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Brasília-DF: Embrapa Agroindústria de Alimentos; Rio de Janeiro. p.1-102, 2018.

OLIVEIRA, M. M.; Ferreira, M.V.S; KAMRUZZAMAN, M.; BARBIN, D. F. Prediction of impurities in cocoa shell powder using NIR spectroscopy. **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis Open**, v.2, p.100015, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2023.100015>.

PATEL, H.; ARU, V.; SØRENSEN, K. M; ENGELSEN, S. B.; Towards on-line cheese monitoring: Exploration of semi-hard cheeses using NIR and ¹H NMR spectroscopy. **Food Chemistry**. v. 454 , p. 1- 10. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139786>.

PRIYASHANTHA, H.; HOJER, A.; SAEDEN, K. H.; LUNDH, A.; JOHANSSON, M.; BERNES, G.; GELADI, Paul; HETTA, M. Use of near-infrared hyperspectral (NIR-HS) imaging to visualize and model the maturity of long-ripening hard cheeses. **Journal of Food Engineering**. v. 264, 2020, 109687. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109687>.

PERIN, L. M.; SARDARO, M. L. S.; NERO, L. A.; NEVIANI, Erasmo; GATTI, M. Bacterial ecology of artisanal Minas cheeses assessed by culture-dependent and -independent methods. **Food Microbiology**. v. 65, p. 160-169. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.02.005>

PEREIRA, M. G. A.; SILVA, M. S.; LIMA, A. M. F.; RIBEIRO, N.M. Indicações Geográficas e Desenvolvimento Sustentável: uma análise bibliométrica. **Cadernos de Prospecção**. v. 17, p. 337-353. 2020. DOI: <https://doi.org/10.9771/cp.v17i1.56568>.

PENNA, A. L. B.; GIGANTE, M. L.; TODOROV, S. D. Artisanal brazilian cheeses—history, marketing, technological and microbiological aspects. **Foods**. v. 10, p.1-21 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10071562>.

PEREIRA, Cristina G; LUIZ, Leandro C; BELL, Maria José V; ANJOS, Virgílio. Near And Mid Infrared Spectroscopy To Assess Milk Products Quality: A Review Of Recent Applications. **Journal of Dairy Research & Technology**. v. 3, p.1–10, 2020. DOI:10.24966/DRT- 9315/100014.

PINEDA, A. P. A.; CAMPOS, G. Z.; PIMENTEL-FILHO, N. J.; FRANCO, B. D. G. de M.; PINTO, U. M. Brazilian Artisanal Cheeses: Diversity, Microbiological Safety, and Challenges for the Sector. **Frontiers in Microbiology**. v.12, p. 1-16, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.666922>.

RODRIGUES, Jéssica F.; MANGIA, B. A.; SILVA, J. G. e; LACORTE, G. A.; COIMBRA, L. O.; ESMERINO, E.A. FREITAS, M. Q.; Pinheiro, A. C. M.; CRUZ, A. G. d. Sorting task as a tool to elucidate the sensory patterns of artisanal cheeses. **Journal of Sensory Studies**, v. 35, p. 1-8. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/joss.12562>.

- SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytic Chemistry*. v. **36**, p1627-1639, 1964.
- SANT'ANNA, F. M.; WETZELS, S. U.; CICCIO, S. H. S.; FIGUEIREDO, R. C.; SALES, G. A.; FIGUEIREDO, N. C.; NUNES, C. A.; SCHMITZ-ESSER, S.; MANN, E.; WAGNER, M.; SOUZA, M. R. Microbial shifts in Minas artisanal cheeses from the Serra do Salitre region of Minas Gerais, Brazil throughout ripening time. *Food Microbiology*, v. 82, p.349–362. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fm.2019.02.016>.
- SAKKAS, L., PAPPAS, C. S.; MOATSOU, G. FT-MIR Analysis of Water-Soluble Extracts during the Ripening of Sheep Milk Cheese with Different Phospholipid Content. *Dairy*, v. 2, p. 530–541, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/dairy2040042>.
- SENA, M. M. de; ALMEIDA, M. R. de. **Quimiometria aplicada aos dados espectrais no infravermelho próximo**. In: Capítulo 2. 2018. Disponível <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/73670/2/Quimiometria%20aplicada%20aos%20dados%20espectrais%20no%20infravermelho%20pr%C3%B3ximo.pdfA.pdf>. Acesso em 20 de julho de 2025.
- SILVA, L. K. R.; GONÇALVES, B. R. F., HORA F. F.; SANTOS, L. S.; FERRÃO S.P.B. Spectroscopic Method(FTIR-ATR) And Chemometric Tools To Detect Now's Milk Addition To Buffalo's Milk. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*.v.19, p.11 – 20. 2020. DOI: <https://doi.org/10.24275/rmiq/Alim560>.
- SILVA, L. K. R.; JESUS, J. C.; ONELLI, R. R. V.; CONCEIÇÃO, D. G.; SANTOS, L. S.; FERRÃO, S. P. B. Discriminating Coalho cheese by origin through near and middle infrared spectroscopy and analytical measures. Discrimination of Coalho cheese origin. *International Journal of Dairy Technology*. v. 74, p. 393–403. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12767>.
- SILVA, A. do A. D.; TAVARES, D. G. ; ANDRADE, R. P.; SANTOS, T. L. dos ; DUARTE W. F. Physicochemical Profile of Canastra Cheese Inoculated with Starter Cultures of *Kluyveromyces lactis* and *Torulaspora delbrueckii*. *Foods*, v. 14, p.1-19. 2025. DOI: [10.3390/foods14010121](https://doi.org/10.3390/foods14010121).
- SKOOG, D. A.; HOLLER, F.J.; NIEMAN, T.A. **Princípios de Análise Instrumental**. In Capítulo 16: Introdução à Espectroscopia no Infravermelho. 7.ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2016.
- SUBRAMANIAN, A.; ALVAREZ, V. B.; HARPER, W. J.; RODRIGUEZ-SAONA, L. E. Monitoring amino acids, organic acids, and ripening changes in Cheddar cheese using Fourier-transform infrared spectroscopy. *International Dairy Journal*. v. 21, p. 434–440. 2011.DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2010.12.012>.

THIERRY, A. Y.; COLLINS, F.; MUKDSI, M. C. A.; MCSWEENEY, P. L. H.; WILKINSON, M. G.; SPINNLER, H. E. Chapter 17 - Lipolysis and Metabolism of Fatty Acids in Cheese. **Chemistry, Physics and Microbiology**. p. 423-444, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417012-4.00017-X>.

TOLENTINO, I. C. de S. A.; JESUS, J. C. de; CONCEIÇÃO, D. G.; ONEILLI, R. R. V.; REIS, L. C. C.; SANTOS, L. S.; FERRÃO, S. P. B. Use of MIR spectroscopy associated with chemometric techniques to verify the authenticity of prato cheese. **International Dairy Journal**, v. 142, p. 105643, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2023.105643>.

VISCONTI, L. G.; RODRÍGUEZ, M. S.; ANIBAL, C. V. D. Determination of grated hard cheeses adulteration by near infrared spectroscopy (NIR) and multivariate analysis. **International Dairy Journal**. v. 104, p. 104647, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104647>.

WICKHAM, H.; BRYAN, J.. **readxl: Read Excel Files**. Versão 1.4.3. CRAN, 2025. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=readxl>. Acesso em: 26 dez. 2025.

WICKHAM, Hadley; FRANÇOIS, R.; HENRY, L.; MÜLLER, K.; VAUGHAN, Davis. **dplyr: Multi-way Data Analysis Tools**. Versão 1.1.4. CRAN, 2023. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>. Acesso em: 26 dez. 2025.

WORKMAN JR, Jerome; MARK, Howard. Chemometrics in Spectroscopy. **Spectroscopy**. v. 33, p. 22–26, 2018. DOI: 10.1016/B9780323911641001237.

XU, Y.; KONG, T. Y. M.; ZHAO, Y.; CHU, L.; ZHENG, M. Near-infrared spectroscopy: application in ensuring food quality and safety. **Analytical Methods**. v. 17, p. 3381–3406, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1039/D4AY02039A>.

YAMAN, H.; AYKAS, D. P.; RODRIGUEZ-SAONA, L. E. Monitoring Turkish white cheese ripening by portable FT-IR spectroscopy. **Frontiers in Nutrition**. v.10, p. 40-55, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20313>.

ZARAVELA, A.; KONTAKOS, S.; BADEKA, A. V.; KONTOMINAS, M. G. Effect of adjunct starter culture on the quality of reduced fat, white, brined goat cheese: part I. Assessment of chemical composition, proteolysis, lipolysis, texture and sensory attributes. **European Food Research and Technology**, v. 247, p. 2211–2225, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03780-4>.

ZHANG, Y.; GAO, P.; ZHANG, W.; ZHU, H.; WANG, C.; XIE, N.; WANG, Y.; PANG, X.; MARIE-LAURE, F.; LÜ, J.; ZHANG, S. Free fatty acid hydrolyzed with lipases and their effects on enzyme-modified cheese flavor. **Food Science of Animal Products**. v. 1, p. 1-9,

2023. DOI: <https://www.sciopen.com/journal/2958-4124>.

ZHENG, X.; SHI, X.; WANG, B.. A Review on the General Cheese Processing Technology, Flavor Biochemical Pathways and the Influence of Yeasts in Cheese. **Frontiers in Microbiology** , v. 12, p. 703284, 2021. DOI: 10.3389/fmicb.2021.703284.

ZHANG, Y.; GAO, P.; ZHANG, W.; ZHU, H.; WANG, C.; XIE, N.; WANG, Y.; PANG, X.; MARIE-LAURE, F.; LÜ, J.; ZHANG, S. Free fatty acid hydrolyzed with lipases and their effects on enzyme-modified cheese flavor. Food Science of Animal Products. v. 1. p. 9240031.

2023. DOI: <https://doi.org/10.26599/FSAP.2023.9240031>.

ZHENG, X.; SHI, X.; WANG, B. A review on the general cheese processing technology, flavor biochemical pathways and the influence of yeasts in cheese. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 1-17, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.703284>.

Material Suplementar

Tabela S1- Resultados da capacidade de precisão, especificidade e sensibilidade dos dados MIR e NIR do queijo Serra da Canastra com todos os pré-processamento aplicado no SIMCA.

Técnica	Classe	Pré Processamento	Calibração			Validação		
			PREC(%)	ESPEC(%)	SENS(%)	PREC(%)	ESPEC(%)	SENS(%)
MIR	NC	Bruto	74	57	92	56	52	100
		MSC	72	57	95	84	81	100
		SNV	79	69	92	64	60	100
		1º Derivada	89	87	94	80	81	77
		2º Derivada	93	89	100	80	73	100
		Savitzky-Golay	76	60	96	56	52	100
		Centralização	76	60	96	56	52	100
	CF	Bruto	67	42	87	92	52	100
		MSC	84	70	94	84	0	100
		SNV	76	57	90	92	0	100
		1º Derivada	78	42	95	64	0	100
		2º Derivada	84	63	97	76	33	89
		Savitzky-Golay	81	61	97	92	0	100
		Centralização	81	61	97	92	0	100
NIR	NC	Bruto	94	94	95	80	75	100
		MSC	71	52	96	24	13	100
		SNV	89	87	95	80	70	100
		1º Derivada	88	86	91	88	90	80
		2º Derivada	88	87	90	84	82	87
		Savitzky-Golay	98	95	100	84	80	100
		Centralização	94	94	95	80	75	100
	CF	Bruto	93	91	94	88	100	85
		MSC	78	60	91	92	33	100
		SNV	89	80	94	92	75	100
		1º Derivada	88	73	97	88	40	100
		2º Derivada	91	75	100	88	62	100
		Savitzky-Golay	98	100	95	84	80	100
		Centralização	93	91	94	88	100	85

PREC= Precisão; ESPEC= Especificidade; SENS = Sensibilidade

CF: Queijos conformes com legislação; NC: Queijos não conformes com legislação.

Bruto: Dados Originais sem pré-processamento; MSC: Correção de Efeito Multiplicativo; SNV: Variação Normal Padrão; 1º e 2º Derivadas: Correção de linha de base; Savitzky-Golay: Alisamento com 5 pontos de janelas; Centralização: Centralização da média.

Tabela S 2- Resultados da capacidade de precisão, especificidade e sensibilidade dos dados MIR e NIR do queijo Serra da Canastra com todos os pré-processamento aplicado no PLS-DA.

Técnica	Classe	Pré Processamento	Calibração			Validação		
			PREC(%)	ESPEC(%)	SENS(%)	PREC(%)	ESPEC(%)	SENS(%)
MIR	CF	Bruto	88	92	84	88	50	91
		MSC	88	87	88	91	50	100
		SNV	84	88	81	88	50	91
		1º Derivada	84	78	87	84	66	93
		2º Derivada	94	95	94	80	83	78
		Savitzky-Golay	88	92	84	88	50	91
		Centralização	88	92	84	88	50	91
	NC	Bruto	88	84	92	88	91	50
		MSC	88	88	87	91	100	50
		SNV	84	81	88	88	91	50
		1º Derivada	84	87	78	84	66	93
		2º Derivada	94	94	95	80	78	83
		Savitzky-Golay	88	84	92	88	91	50
		Centralização	88	84	92	88	91	50
NIR	CF	Bruto	98	95	100	84	100	80
		MSC	59	8	97	88	0	100
		SNV	93	90	94	92	87	94
		1º Derivada	94	91	97	96	80	100
		2º Derivada	89	85	92	89	92	85
		Savitzky-Golay	96	91	100	92	100	90
		Centralização	96	91	100	92	100	90
	NC	Bruto	98	100	95	84	80	100
		MSC	59	97	8	88	100	0
		SNV	93	94	90	92	94	87
		1º Derivada	94	97	91	96	100	80
		2º Derivada	89	92	85	96	100	87
		Savitzky-Golay	96	100	91	92	90	100
		Centralização	96	100	91	92	90	100

PREC= Precisão; ESPEC= Especificidade; SENS = Sensibilidade

CF: Queijos conformes com legislação; NC: Queijos não conformes com legislação.

Bruto: Dados Originais sem pré-processamento; MSC: Correção de Efeito Multiplicativo; SNV: Variação Normal Padrão; 1º e 2º Derivadas: Correção de linha de base; Savitzky-Golay: Alisamento com 5 pontos de janelas; Centralização: Centralização da média.

Tabela S 3- Resultados da capacidade de precisão, especificidade e sensibilidade dos dados MIR e NIR do queijo Araxá com todos os pré-processamento aplicado no SIMCA.

Técnica	Classe	Pré Processamento	Calibração			Validação		
			PREC(%)	ESPEC(%)	SENS(%)	PREC(%)	ESPEC(%)	SENS(%)
MIR	NC	Bruto	100	100	100	100	100	100
		MSC	88	88	89	78	75	100
		SNV	95	93	100	78	91	57
		1º Derivada	97	96	100	78	91	57
		2º Derivada	97	96	100	63	45	87
		Savitzky-Golay	97	96	100	68	92	16
		Centralização	100	100	100	100	100	100
	CF	Bruto	100	100	100	100	100	100
		MSC	88	84	92	78	100	75
		SNV	95	100	93	89	100	83
		1º Derivada	91	73	100	84	71	91
		2º Derivada	88	71	96	89	87	90
		Savitzky-Golay	91	93	89	89	66	100
		Centralização	100	100	100	100	100	100
NIR	NC	Bruto	91	85	100	85	81	100
		MSC	87	82	94	85	80	100
		SNV	91	92	88	90	87	100
		1º Derivada	95	92	100	95	100	66
		2º Derivada	97	96	100	95	94	100
		Savitzky-Golay	89	85	94	100	100	100
		Centralização	91	85	100	85	81	100
	CF	Bruto	93	88	96	100	100	100
		MSC	89	88	89	95	80	100
		SNV	97	94	100	90	87	100
		1º Derivada	93	88	96	95	66	100
		2º Derivada	93	90	96	100	100	100
		Savitzky-Golay	93	88	96	100	100	100
		Centralização	93	88	96	100	100	100

PREC= Precisão; ESPEC= Especificidade; SENS = Sensibilidade

CF: Queijos conformes com legislação; NC: Queijos não conformes com legislação.

Bruto: Dados Originais sem pré-processamento; MSC: Correção de Efeito Multiplicativo; SNV: Variação Normal Padrão; 1º e 2º Derivadas: Correção de linha de base; Savitzky-Golay: Alisamento com 5 pontos de janelas; Centralização: Centralização da média.

Tabela S 4- Resultados da capacidade de precisão, especificidade e sensibilidade dos dados MIR e NIR do queijo Araxá com todos os pré-processamento aplicado no PLS-DA.

Técnica	Classe	Pré Processamento	Calibração			Validação		
			PREC(%)	ESPEC(%)	SENS(%)	PREC(%)	ESPEC(%)	SENS(%)
MIR	CF	Bruto	93	87	96	93	96	87
		MSC	97	94	100	78	100	75
		SNV	86	80	90	89	85	91
		1º Derivada	82	73	86	84	85	83
		2º Derivada	88	85	90	78	87	72
		Savitzky-Golay	93	87	96	84	66	92
		Centralização	93	87	96	84	66	92
	NC	Bruto	93	96	87	84	89	75
		MSC	97	100	94	78	75	100
		SNV	86	90	80	89	91	85
		1º Derivada	82	86	73	84	83	85
		2º Derivada	88	90	85	78	72	87
		Savitzky-Golay	93	96	87	84	92	66
		Centralização	93	96	87	84	92	66
NIR	CF	Bruto	91	88	92	100	100	100
		MSC	65	59	100	75	0	100
		SNV	93	94	92	95	100	93
		1º Derivada	91	90	92	90	100	88
		2º Derivada	93	95	92	100	100	100
		Savitzky-Golay	91	88	92	100	100	100
		Centralização	91	88	92	100	100	100
	NC	Bruto	91	92	88	100	100	100
		MSC	65	100	59	75	100	0
		SNV	93	92	94	95	93	100
		1º Derivada	91	92	90	90	88	100
		2º Derivada	93	92	95	100	100	100
		Savitzky-Golay	91	92	88	100	100	100
		Centralização	91	92	88	100	100	100

PREC= Precisão; ESPEC= Especificidade; SENS = Sensibilidade

CF: Queijos conformes com legislação; NC: Queijos não conformes com legislação.

Bruto: Dados Originais sem pré-processamento; MSC: Correção de Efeito Multiplicativo; SNV: Variação Normal Padrão; 1º e 2º Derivadas: Correção de linha de base; Savitzky-Golay: Alisamento com 5 pontos de janelas; Centralização: Centralização da média.