

APLICAÇÕES DA ESPECTROSCOPIA FTIR NA CADEIA DO LEITE: INOVAÇÃO PARA SEGURANÇA, RASTREABILIDADE E SUSTENTABILIDADE

Mariane Wolf¹;

Núcleo de Ciência, Tecnologia e Inovação do Leite/ Universidade do Estado de Santa Catarina (NCTI/UDESC), Pinhalzinho, Santa Catarina.

<http://lattes.cnpq.br/8711783303286696>

Larissa Karla Monteiro²;

Núcleo de Ciência, Tecnologia e Inovação do Leite/ Universidade do Estado de Santa Catarina (NCTI/UDESC), Pinhalzinho, Santa Catarina.

<http://lattes.cnpq.br/6575243577701104>

Andréia Zilio Dinon³.

Núcleo de Ciência, Tecnologia e Inovação do Leite/ Departamento de Engenharia de Alimentos e Engenharia Química/ Universidade do Estado de Santa Catarina (NCTI/DEAQ/ UDESC), Pinhalzinho, Santa Catarina.

<http://lattes.cnpq.br/3603845531003036>

RESUMO: A busca pela segurança alimentar, associada a rastreabilidade e a sustentabilidade tem estimulado a adoção de tecnologias avançadas na cadeia do leite. Nesse contexto, a espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) se destaca como uma ferramenta promissora para a detecção rápida e não destrutiva de resíduos de antibióticos, sanitizantes, contaminantes e adulterantes no leite e em seus derivados. Neste capítulo de revisão, são analisadas criticamente suas principais aplicações, abordando-se os fundamentos físico-químicos, os modos de operação (transmitância, refletância e ATR) e as vantagens frente aos métodos convencionais. A integração da FTIR com a quimiometria e sistemas de monitoramento em tempo real amplia sua utilização em ambientes industriais, favorecendo decisões mais ágeis e o controle da qualidade de forma contínua. A espectroscopia FTIR também contribui com a rastreabilidade por meio da transparência na cadeia produtiva de leite, cumprindo às exigências regulatórias pertinentes e às expectativas dos consumidores. Por fim, são discutidos os desafios e as perspectivas de expansão da FTIR, consolidando seu papel estratégico na modernização e na inovação do setor lácteo.

PALAVRAS-CHAVE: FTIR. Leite. Segurança alimentar.

APPLICATIONS OF FTIR SPECTROSCOPY IN THE MILK SUPPLY CHAIN: INNOVATION FOR SAFETY, TRACEABILITY AND SUSTAINABILITY

ABSTRACT: The growing demand for food safety, traceability, and sustainability has driven the use of advanced technologies in the dairy chain. In this context, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) stands out as a promising tool for the rapid and non-destructive detection of antibiotic, sanitizer, contaminant, and adulterant residues in milk and dairy products. This review chapter provides a critical appraisal of its main applications, elucidating the underlying physicochemical principles, delineating the operating modes (transmittance, reflectance, ATR), and highlighting its advantages over conventional analytical approaches. The integration of FTIR with chemometric models and real-time monitoring systems has expanded its use in industrial settings, promoting faster decision-making and continuous quality control. Furthermore, the technique contributes to traceability and transparency in the production chain, aligning with regulatory requirements and consumer expectations. Finally, the challenges and prospects for FTIR's expansion are discussed, consolidating its strategic role in the modernization and innovation of the dairy sector.

KEY-WORDS: FTIR. Milk. Food safety.

INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva do leite é importante para a economia e a segurança alimentar, sendo uma das mais complexas e extensas do setor agroalimentar. No Brasil, o setor leiteiro contribui significativamente para a geração de renda e empregos, além de promover o desenvolvimento regional, posicionando o país entre os maiores produtores mundiais. No entanto, tanto no âmbito nacional quanto internacional, essa cadeia enfrenta desafios crescentes relacionados à segurança dos alimentos, à autenticidade dos produtos e à sustentabilidade ambiental (MÉNARD et al., 2024).

Entre as principais preocupações estão a presença de contaminantes e de resíduos de antibióticos, as fraudes por adulteração e os impactos ambientais associados à produção, ao processamento e à distribuição do leite e de seus derivados. Esses desafios se agravam diante das exigências regulatórias e do maior interesse dos consumidores por transparência, rastreabilidade e práticas sustentáveis. Nesse contexto, é fundamental incorporar tecnologias analíticas inovadoras que proporcionem respostas rápidas, confiáveis e economicamente viáveis para o controle de qualidade, a gestão ambiental e a rastreabilidade (MÉNARD et al., 2024; CENITI et al., 2023).

A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) tem se destacado como uma solução tecnológica promissora, com cada vez mais aplicações na indústria de alimentos. Por ser uma técnica não destrutiva, ela permite a análise simultânea de diversos constituintes químicos de maneira rápida, reprodutível e com mínima preparação

da amostra. Além disso, seu uso contribui para práticas mais sustentáveis, pois otimiza o uso de recursos e reduz a necessidade de reagentes químicos, bem como a geração de resíduos laboratoriais.

OBJETIVO

O presente capítulo tem como objetivo revisar criticamente as contribuições da espectroscopia FTIR como ferramenta analítica aplicada à cadeia produtiva do leite. São apresentadas as principais aplicações na detecção de contaminantes, adulterantes e resíduos de antibióticos, bem como seu potencial em promover rastreabilidade e sustentabilidade por meio da otimização de processos, do controle em tempo real e da redução de impactos ambientais.

METODOLOGIA

A pesquisa foi conduzida por meio de um delineamento qualitativo, de natureza aplicada e abordagem descritiva. A construção metodológica baseou-se em uma revisão da literatura científica, com foco nas aplicações da espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) na cadeia produtiva do leite, especialmente nos aspectos relacionados à segurança alimentar, rastreabilidade e sustentabilidade.

A seleção das referências foi realizada por meio de busca dirigida em bases científicas como Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect e SciELO, utilizando descritores relacionados à espectroscopia FTIR aplicada a leite e derivados. Foram priorizados artigos completos, publicados nos últimos anos, com abordagem aplicada à cadeia do leite em contextos de controle de qualidade, detecção de resíduos ou adulterantes, rastreabilidade ou sustentabilidade.

Para fins de concisão e foco, optou-se por incluir referências representativas e relevantes, que ilustram os principais avanços e aplicações da espectroscopia FTIR na área, com base em avaliação crítica e categorização temática dos estudos selecionados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fundamentos da Espectroscopia FTIR

A FTIR é uma técnica analítica baseada na absorção de radiação infravermelha por ligações químicas das moléculas, o que gera espectros característicos que possibilitam a identificação qualitativa e, em muitos casos, a quantificação de compostos. Entre suas principais vantagens estão a rapidez, a análise não destrutiva, a necessidade mínima de preparo da amostra e a possibilidade de aplicação direta — atributos especialmente relevantes para o setor de alimentos, em particular o de lácteos (CENITI et al., 2023).

Na espectroscopia de infravermelho médio (MIR, de 4000 a 400 cm^{-1}), o modo ATR (attenuated total reflectance) é amplamente utilizado, pois permite a análise direta de amostras líquidas, pastosas ou sólidas planas sem a necessidade de um preparo complexo. Esse modo se baseia na reflexão interna atenuada da radiação IR em um cristal, com penetração superficial de poucos micrômetros. O modo de transmissão, também no MIR, exige que a radiação atravesse a amostra entre janelas translúcidas ao IR, sendo indicado para filmes, soluções ou comprimidos, desde que haja preparo prévio. A reflectância difusa (DRIFT), por sua vez, baseia-se na dispersão da radiação refletida em múltiplas direções e é adequada para sólidos em pó ou granulados, especialmente quando não é possível aplicar pressão direta (CHERNIIENKO et al., 2024).

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), que opera entre 10.000 e 4.000 cm^{-1} , utiliza absorções de sobretons e bandas combinadas, permitindo análises rápidas, não invasivas e com mínimo preparo. A espectroscopia NIR é amplamente aplicada na indústria de laticínios na determinação de constituintes como gordura, proteína, lactose e sólidos totais, entre outras aplicações específicas (SAJI et al., 2024).

O avanço tecnológico dos dispositivos FTIR ampliou o seu uso em análises em tempo real ao longo da cadeia produtiva. Além da notável contribuição das ferramentas quimiométricas associadas, como o PCA (*Principal Component Analysis* — Análise de Componentes Principais) e o PLS (*Partial Least Squares* — Regressão por Mínimos Quadrados Parciais), que potencializa a extração de informações a partir dos espectros, tornando as análises mais eficientes (SAJI et al., 2024; ALTEMIMI et al., 2025; CENITI et al., 2023).

Aplicações da FTIR na Segurança da Cadeia do Leite

A segurança dos alimentos é um dos pilares fundamentais da cadeia produtiva do leite. A presença de contaminantes químicos, de resíduos de medicamentos veterinários ou de adulterações intencionais não apenas compromete a qualidade nutricional do produto, como também a saúde pública. Nesse contexto, a espectroscopia FTIR tem se destacado como uma ferramenta promissora para o monitoramento rápido e não destrutivo de parâmetros críticos de segurança no leite e seus derivados.

Deteção de resíduos de antibióticos

A administração de antibióticos no rebanho leiteiro, embora essencial para o controle de infecções, pode resultar na presença de resíduos no leite, especialmente quando os períodos de carência não são respeitados. As classes de antibióticos mais frequentemente investigadas incluem os β -lactâmicos (como a penicilina G e a ampicilina), as tetraciclina e os macrolídeos (como a tilosina), devido ao seu uso difundido e ao potencial de indução de resistência antimicrobiana em humanos (CENITI et al., 2023). Estudos recentes demonstram

que a FTIR, especialmente no modo de reflexão total atenuada (ATR), é capaz de identificar padrões espectrais associados à presença desses fármacos, mesmo em concentrações próximas aos limites máximos de resíduos estabelecidos por órgãos reguladores. Os espectros característicos desses compostos geralmente apresentam bandas específicas associadas a grupos funcionais, como carbonilas (C=O) e aminas (N–H), o que facilita sua identificação (CASARRUBIAS-TORRES et al., 2018; FREITAS et al., 2021).

Comparativamente, os métodos tradicionais, como a cromatografia líquida de alta eficiência e os testes microbiológicos de inibição, oferecem elevada sensibilidade e especificidade, mas são demorados e exigem reagentes e um preparo laboratorial complexo. A FTIR, por outro lado, permite uma triagem inicial rápida e tem potencial para ser utilizada *in loco* como ferramenta de monitoramento contínuo (SAJI et al., 2024; CENITI et al., 2023).

Identificação de sanitizantes e contaminantes químicos

Durante a higienização dos equipamentos da indústria de laticínios, compostos como hipoclorito de sódio, peróxidos e soluções de limpeza CIP (*Cleaning in Place*) podem permanecer no leite como resíduos, caso os enxágues não sejam eficientes. A ingestão desses contaminantes pode modificar as características sensoriais e funcionais do leite e de seus derivados, além de representarem um risco à saúde humana (KEMMERLING et al., 2025).

A espectroscopia FTIR tem sido eficaz na identificação desses resíduos por meio de bandas de absorção específicas para grupos cloro-oxigenados, peróxidos e compostos oxidantes. Esses contaminantes podem alterar o perfil espectral do leite e sua detecção é fundamental para garantir a integridade do produto (CHOWDHURY et al., 2023).

Detecção de adulterações fraudulentas

A adulteração do leite é uma prática fraudulenta que tem por objetivo aumentar o volume ou mascarar a baixa qualidade do produto. Entre as formas mais comuns de adulteração estão a adição de água, sacarose, ureia, peróxidos e neutralizantes alcalinos. Esses aditivos alteram a composição química do leite, podendo comprometer sua segurança, qualidade e valor nutricional (DA COSTA FILHO et al., 2022).

A FTIR tem se destacado como uma ferramenta sensível e não destrutiva para a detecção de adulterações no leite, pois é capaz de identificar alterações específicas nas bandas de absorção associadas aos principais constituintes químicos da matriz láctea. Cada adulterante introduz modificações mensuráveis no espectro infravermelho, o que permite sua identificação e quantificação. A adição de água, por exemplo, dilui as bandas de proteínas (amida I, $\sim 1650\text{ cm}^{-1}$) e lipídios ($\sim 1740\text{ cm}^{-1}$), além de intensificar a região de absorção da água ($3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$). A sacarose exibe bandas distintas entre 1000 e 1200 cm^{-1} , atribuídas às vibrações C–O e C–C dos açúcares. A ureia apresenta sinais

entre 1.500 e 1.700 cm^{-1} , relacionados às ligações C=O e N–H. Já os peróxidos afetam principalmente a região de 850 a 950 cm^{-1} , correspondente ao estiramento O–O de grupos oxigenados. Assim, a FTIR não apenas permite a detecção da presença de adulterantes, como também possibilita a compreensão dos mecanismos químicos envolvidos nas alterações da composição do leite (SAJI et al., 2024; DA COSTA FILHO et al., 2022). A capacidade da espectroscopia FTIR de identificar essas alterações de maneira rápida e sem o uso de reagentes químicos permite o desenvolvimento de modelos de triagem para verificar a autenticidade e a integridade do leite, contribuindo significativamente para a prevenção de fraudes ao longo da cadeia produtiva.

Contribuições da FTIR para a Rastreabilidade Láctea

A rastreabilidade na cadeia produtiva do leite é essencial para garantir a qualidade e segurança alimentar. Ao assegurar a autenticidade do produto e atender às normas regulatórias e de mercado, o produto lácteo ganha credibilidade e valorização. Nesse contexto, a espectroscopia FTIR tem se destacado como uma ferramenta promissora para determinar a origem e o histórico produtivo do leite por meio das características físico-químicas detectadas em espectro infravermelho.

Rastreabilidade geográfica e zootécnica

Estudos têm mostrado a capacidade da FTIR ao diferenciar amostras de leite de acordo com a região geográfica de produção, refletindo fatores como clima, solo e vegetação, que influenciam sua composição nutricional. A FTIR também permite distinguir entre diferentes sistemas zootécnicos, como a alimentação à base de pasto e concentrados, e entre modos de produção convencionais e orgânicos, por meio da identificação de variações nos perfis lipídicos e/ou proteicos (KARAMAN et al., 2021).

A utilização conjunta da FTIR com técnicas de análise multivariada, como PCA e PLS, têm apresentado alto potencial discriminatório, contribuindo para a certificação de origem, a valorização de produtos com indicação geográfica e o combate a fraudes de rotulagem (SPINA et al., 2022). Além disso, a FTIR possibilita a caracterização de atributos associados ao bem-estar animal e às práticas sustentáveis de produção, promovendo transparência na cadeia láctea e fortalecendo a confiança do consumidor.

Rastreabilidade tecnológica

A rastreabilidade tecnológica consiste na capacidade de monitorar e documentar continuamente as etapas do processamento industrial do leite, garantindo a integridade do produto final e sua conformidade com os padrões de qualidade e segurança. Nesse contexto, a espectroscopia FTIR tem se destacado como uma ferramenta eficaz, especialmente

quando empregada em sistemas de monitoramento em tempo real, seja *inline* (instalada diretamente na linha de produção) ou *online* (com coleta e análise imediata de amostras) (CHERNIIENKO et al., 2024).

A técnica FTIR permite a detecção de parâmetros críticos como a composição química de lácteos durante processos tecnológicos na indústria. Por exemplo, em leites fermentados, a técnica pode monitorar a conversão da lactose em ácido lático por meio da redução de intensidade de bandas características da lactose ($\sim 1040\text{ cm}^{-1}$) e o aumento de sinais relacionados aos grupos carboxílicos. Além disso, a FTIR garante suporte ao controle de qualidade ao detectar modificações indesejadas causadas por desvios de processo, como contaminações, degradação de componentes sensíveis, entre outros (SAJI et al., 2024). O potencial da espectroscopia FTIR é especialmente relevante quando se pensa em indústria 4.0, onde a integração de sensores analíticos inteligentes visa otimizar a produção, reduzir perdas e garantir rastreabilidade automatizada e a tomada de decisões em tempo real.

Assim, a utilização da FTIR como parte de sistemas de rastreabilidade tecnológica fortalece o controle da cadeia produtiva do leite, promovendo maior eficiência operacional, redução de riscos e garantia da qualidade final.

Vantagens e Limitações da FTIR na Cadeia do Leite

A aplicação da FTIR na cadeia produtiva do leite proporciona diversas vantagens estratégicas, porém também impõe limitações que devem ser consideradas, principalmente no que se refere à validação e à padronização de sua aplicação em larga escala.

Vantagens

A espectroscopia FTIR se destaca por sua rapidez, precisão e caráter não destrutivo, sendo altamente adequada para aplicações em rotina industrial e monitoramento em tempo real. Com um preparo mínimo das amostras, ela reduz significativamente o uso de reagentes e o tempo de análise, fornecendo resultados em segundos. Essa agilidade permite sua integração eficiente a sistemas de controle de processo *in situ* e *online*. A partir de um único espectro, a técnica permite a identificação simultânea da composição química e de possíveis adulterações ou contaminações no leite e em seus derivados (CENITI et al., 2023).

Ela é compatível com o uso da quimiometria, que possibilita o desenvolvimento de modelos robustos de predição e classificação baseados em grandes volumes de dados espectrais, aumentando significativamente sua sensibilidade e especificidade na detecção de padrões e desvios no leite e seus derivados (SAJI et al., 2024). A incorporação de ferramentas de inteligência artificial potencializa ainda mais esse processo ao permitir a identificação automática de tendências complexas e a adaptação contínua dos modelos

preditivos. Com isso, são promovidas análises mais rápidas, precisas e escaláveis em ambientes industriais e laboratoriais (ALTEMIMI et al., 2025).

Limitações

Algumas limitações da espectroscopia precisam ser reconhecidas, como a sobreposição de bandas espectrais em matrizes complexas, como a do leite, que pode dificultar a identificação direta de compostos específicos. Esses casos exigem um tratamento de dados com softwares avançados, além de bibliotecas espectrais estruturadas para a aplicação (SAJI et al., 2024). Além disso, a sensibilidade da FTIR pode ser inferior à dos métodos cromatográficos na detecção de contaminantes em níveis traços, como os antibióticos, sendo necessária uma calibração rigorosa ou a associação com técnicas complementares. Ainda, a variação natural na composição da matriz do leite (por exemplo, entre estações, raças e dietas) pode afetar a robustez dos modelos, exigindo validação contínua das curvas de calibração (CENITI et al., 2023).

Outro desafio envolve o conhecimento técnico necessário para a operação e a interpretação dos resultados, principalmente ao envolver análise quimiométrica multivariada, o que pode limitar sua adoção em pequenas unidades produtoras. Contudo, apesar dessas limitações, a FTIR continua sendo uma ferramenta promissora e estratégica para garantir a segurança e a qualidade da cadeia do leite, principalmente quando associada a protocolos padronizados, treinamento técnico e integração com outras ferramentas analíticas (ALTEMIMI et al., 2025; SAJI et al., 2024).

Sustentabilidade e Inovação tecnológica com o uso da FTIR

A FTIR é considerada uma ferramenta estratégica ao promover a sustentabilidade e impulsionar a inovação tecnológica na cadeia do leite. Sua aplicação reduz significativamente a necessidade de reagentes químicos e solventes, que são tradicionalmente utilizados em métodos analíticos convencionais, como a cromatografia. Essa característica contribui diretamente para a minimização do impacto ambiental e geração de resíduos laboratoriais, alinhando-se aos princípios da química verde e às exigências contemporâneas de responsabilidade ambiental. Além disso, a rapidez das análises por FTIR e a possibilidade de realizar medições diretas em amostras com mínima ou nenhuma preparação proporcionam economia de tempo e energia, otimizando rotinas laboratoriais e industriais. Essa eficiência operacional, associada à alta reprodutibilidade dos resultados, favorece o uso da técnica em ambientes industriais que demandam análises em tempo real (CHERNIIENKO et al., 2024; AGIOMAVRITI et al., 2024).

O avanço na miniaturização de dispositivos FTIR e sua integração com tecnologias digitais ampliam seu potencial de aplicação. Dispositivos robustos e portáteis podem ser utilizados em laboratórios móveis e linhas de produção inteligentes. Os espectros FTIR

podem ser conectados a sistemas com inteligência artificial, possibilitando a interpretação automatizada de espectros e facilitando a tomada de decisões em tempo real. Além disso, o uso de tecnologias para o registro seguro e imutável dos dados espectrais melhora a rastreabilidade ao longo da cadeia produtiva, fortalecendo a transparência e a confiança do consumidor e impulsionando a inovação nos sistemas de controle de qualidade e de segurança alimentar (AGIOMAVRITI et al., 2024; CHERNIENKO et al., 2024).

Desafios e Perspectivas futuras

Apesar dos avanços da espectroscopia FTIR, sua ampla adoção na cadeia do leite ainda enfrenta obstáculos ligados principalmente à falta de infraestrutura, capacitação e recursos. Dessa forma, a oportunidade de ampliação de acesso a esta tecnologia depende de políticas públicas, de equipamentos mais acessíveis e de treinamentos específicos.

Além dos entraves econômicos, a padronização de modelos quimiométricos também representa um desafio. É essencial construir bases de dados robustas e representativas, considerando diferentes regiões, raças e tipos de processamento. Tudo isso para assegurar a reprodutibilidade e a confiabilidade dos resultados alcançados. Um ponto a ser destacado é a baixa quantidade de validações interlaboratoriais, o que compromete a comparabilidade entre estudos, dificultando a consolidação da FTIR como ferramenta de rotina na indústria e na regulação. A articulação entre centros de pesquisa, órgãos públicos e o setor produtivo é crucial para harmonizar protocolos e validar metodologias.

Do ponto de vista tecnológico, a FTIR tem um grande potencial de detectar adulterantes, contaminantes, antibióticos e sanitizantes. A FTIR também se destaca em sistemas de certificação e rastreabilidade, como no caso dos leites orgânicos, leite tipo A2, leite livre de antibióticos ou com indicação geográfica. A identificação de assinaturas espectrais específicas permite análises preditivas mais amplas, especialmente com o apoio de algoritmos avançados (SPINA et al., 2022; KARAMAN et al., 2021). A integração da FTIR com outras tecnologias, como a técnica de Raman, a dos biossensores e a da microfluídica, favorece o desenvolvimento de plataformas multianalíticas mais sensíveis, seletivas e operacionais em tempo real, tanto no laboratório quanto na linha de produção. A geração de dados objetivos em tempo real fortalece a transparência e amplia a confiança do consumidor. Dessa maneira, a técnica contribui para uma indústria mais moderna, segura e alinhada à demanda por alimentos sustentáveis e rastreáveis.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A espectroscopia FTIR é uma ferramenta estratégica para a indústria de lácteos diante das demandas por segurança alimentar, rastreabilidade e sustentabilidade. Trata-se de uma técnica analítica rápida, não destrutiva e confiável, capaz de fornecer informações precisas sobre compostos químicos de interesse, contribuindo para o controle de qualidade

e para o cumprimento das exigências regulatórias.

Sua integração com modelos quimiométricos e sistemas de monitoramento em tempo real amplia sua aplicação nas linhas de produção, contribuindo para decisões mais ágeis e embasadas. No que se refere à rastreabilidade, a técnica possibilita verificar a autenticidade e a conformidade dos produtos, aumentando a transparência e agregando valor à cadeia produtiva.

Do ponto de vista ambiental, a FTIR reduz o uso de reagentes e a geração de resíduos, alinhando-se às práticas sustentáveis e à eficiência dos processos. Apesar dos desafios, como a padronização de métodos e o acesso à tecnologia, a espectroscopia FTIR se projeta como uma aliada essencial para um setor lácteo mais moderno, seguro e responsável.

REFERÊNCIAS

AGIOMAVRITI, A. A. et al. **Spectroscopy-Based Methods and Supervised Machine Learning Applications for Milk Chemical Analysis in Dairy Ruminants**. Chemosensors, v. 12, n. 12, p. 263, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/chemosensors12120263>

ALTEMIMI, A. B. et al. **AI-powered advancements in food analysis and safety: ensuring quality, protection, and precision in modern food systems: a review**. eFood, v. 6, n. 4, e70076, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/efd2.70076>.

CASARRUBIAS-TORRES, L. M. et al. **Mid-infrared spectroscopy and multivariate analysis for determination of tetracycline residues in cow's milk**. Acta Veterinaria Brno, v. 87, n. 2, p. 181–188, 2018. Disponível em: https://actavet.vfu.cz/media/pdf/acta-vet_2018087020181.pdf.

CENITI, C. et al. **Recent advances in the determination of milk adulterants and contaminants by mid infrared spectroscopy**. Foods, v. 12, n. 15, art. 2917, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/foods12152917>.

CHERNIIENKO, A. et al. **IR-EcoSpectra: Exploring sustainable ex situ and in situ FTIR applications for green chemical and pharmaceutical analysis**. Journal of Pharmaceutical Analysis, v. 14, n. 9, p. 100951, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jpha.2024.02.005>.

CHOWDHURY, A. R. et al. **Detection of toxic contaminants in alcohol-based hand sanitizers using infrared spectroscopy**. Applied Spectroscopy Practica, v. 1, n. 2, p. 27551857231204630, 2023. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/27551857231204630>.

DA COSTA FILHO, P. A. et al. **Mid-infrared spectroscopy: screening method for analysis of food adulterants in reconstituted skimmed milk powder**. Food Control, v. 136, 108884, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.108884>.

FREITAS, A. G. M. de et al. **Infrared spectroscopy combined with random forest to determine tylosin residues in powdered milk.** Food Chemistry, v. 365, p. 130477, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130477>.

KARAMAN, A. D. et al. **Determination of the compositional differences in organic and conventional milk using FTIR spectroscopy.** Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology, v. 9, n. 3, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.24925/turjaf.v9i3.452-459.3365>

KEMMERLING, L. et al. **The most effective strategy for verifying the absence of sanitizer contamination in milk depends on the sanitizer type used in fluid milk processing facilities.** Journal of Dairy Science, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3168/jds.2025-26394>.

MÉNARD, H. et al. **Fraude alimentar no Brasil: panorama e impactos para leite e derivados dos último 25 anos.** Observatório de la Economía Latinoamericana, v. 22, n. 8, e6280, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/oelv22n8-119>.

SAJI, R. et al. **Application of FTIR spectroscopy in dairy products: a systematic review.** Food and Humanity, v. 2, 100239, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100239>.

SPINA, A. A. et al. **Mid-infrared (MIR) spectroscopy for the detection of cow's milk in buffalo milk.** Journal of Animal Science and Technology, v. 64, n. 3, p. 531, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5187/jast.2022.e22>.