

# Aplicaciones de NIRS en Muestras de Forraje para el Análisis de los Principales Parámetros de Calidad Nutricional: Revisión sistemática

**Sergio Alejandro Jaramillo Zapata**

**Director (a)  
Julieth Orduña Ortega**

**Universidad Santiago de Cali  
Facultad de Ciencias Básicas  
Programa de Química  
Cali, Colombia  
2024**

Calle 5 Carrera 62 Campus Pampalinda A.A. 4102 / Teléfono: PBX 5183000  
web: [www.usc.edu.co](http://www.usc.edu.co) / Nit. 890.303.797-1 / Santiago de Cali - Colombia



# **Aplicaciones de NIRS en Muestras de Forraje para el Análisis de los Principales Parámetros de Calidad Nutricional: Revisión sistemática**

**Sergio Alejandro Jaramillo Zapata**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
Química**

**Director (a)  
Julieth Orduña Ortega**

**Grupo de Investigación: GIEMA**

**Línea de Investigación: Aseguramiento de la calidad**

**Nombrar ODS en el que se enmarca el trabajo de grado: Producción y consumo responsable**

**Universidad Santiago de Cali  
Facultad de Ciencias Básicas  
Programa de Química  
Ciudad, Colombia  
2024**

## IMPACTOS

Relacione el (los) impacto(s) que presentó el Trabajo de Grado según los siguientes criterios:

IMPACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO(S)
Económico		
Responsabilidad social		
Científico	Apropiación social del conocimiento en las aplicaciones del equipo NIRS	Sector agropecuario y ganadero
Indicadores de Gestión		
Tecnológico		
Técnico		
Ambiental		
Social		
Cultural		

\*Incluir los productos obtenidos derivados de la investigación como: apropiación social del conocimiento, generación de nuevo conocimiento entre otros.

# APLICACIONES DE NIRS EN MUESTRAS DE FORRAJE PARA EL ANÁLISIS DE LOS PRINCIPALES PARÁMETROS DE CALIDAD NUTRICIONAL: REVISIÓN SISTEMÁTICA

Sergio Alejandro Jaramillo Zapata<sup>1</sup> ([Sergio.jaramillo00@usc.edu.co](mailto:Sergio.jaramillo00@usc.edu.co))<sup>1</sup>; Julieth Orduña Ortega<sup>2</sup> ([julieth.orduna00@usc.edu.co](mailto:julieth.orduna00@usc.edu.co))<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación GIEMA, Programa de Química. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad Santiago de Cali. Campus Pampalinda Calle 5 # 62-00. Santiago de Cali. Colombia

## RESUMEN

La espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) se ha consolidado en las últimas décadas como una técnica analítica rápida y no destructiva para evaluar la composición química de los forrajes. Este método se basa en la absorción de luz en la región del infrarrojo cercano del espectro electromagnético y permite determinar diversos parámetros nutricionales críticos en el forraje para la alimentación de animales rumiantes. Evaluar estos parámetros es crucial para mejorar la calidad del forraje destinado a la alimentación animal, lo que impacta directamente en la productividad y la salud de los rumiantes.

Los pastos tropicales, frecuentemente utilizados como forraje, muestran una considerable variabilidad en su calidad nutricional debido a factores ambientales. En este contexto, la aplicación de NIRS ofrece una herramienta invaluable para la determinación rápida y precisa de componentes clave, como la proteína cruda, la fibra y los minerales, entre otros. Esta revisión se centra en la búsqueda bibliográfica de estudios recientes sobre las aplicaciones de NIRS en muestras de forraje, con un enfoque especial en los pastos tropicales. Se discuten los principales parámetros de calidad nutricional del forraje, se describe la técnica NIRS, se aborda la preparación de muestras y se revisan las metodologías aplicadas para obtener resultados en diversos estudios

**Palabras clave:** *Forraje; pasto tropical; preparación de la muestra y técnicas NIRS*

## NIRS Applications in Forage Samples for the Analysis of the Main Nutritional Quality Parameters

### ABSTRACT

Near-infrared spectroscopy (NIRS) has become established over the past decades as a rapid and non-destructive analytical technique for evaluating the chemical composition of forages. This method is based on the absorption of light in the near-infrared region of the electromagnetic spectrum and allows for the determination of various critical nutritional parameters in forage used for ruminant feed. Assessing these parameters is crucial for improving the quality of forage intended for animal feed, which directly impacts the productivity and health of ruminants.

Tropical grasses, frequently used as forage, exhibit considerable variability in their nutritional quality due to environmental factors. In this context, the application of NIRS offers an invaluable tool for the rapid and accurate determination of key components, such as crude protein, fiber, and minerals, among others. This review focuses on the bibliographic search of recent studies on the applications of NIRS in forage samples, with a special emphasis on tropical grasses. The main nutritional quality parameters of forage are discussed, the NIRS technique is described, sample preparation is addressed, and the methodologies applied to obtain results in various studies are reviewed.

**Keywords:** Forage; tropical grass; sample preparation and NIRS techniques

## HIGHLIGHTS

3 resultados sobresalientes derivados del estudio realizado

1. Rápida y no destructiva: La técnica NIRS permite determinar la calidad nutricional de los forrajes de manera rápida y sin destruir la muestra, lo que la hace ideal para análisis en tiempo real en programas de mejoramiento y producción ganadera.
2. Alta precisión en la predicción de parámetros clave: NIRS ha demostrado ser altamente precisa en la predicción de componentes nutricionales críticos como la proteína cruda, la fibra detergente neutro (FDN) y la energía metabolizable, lo que facilita la toma de decisiones en la alimentación animal.
3. Aplicable a diversas condiciones y tipos de forrajes: La versatilidad de NIRS permite su aplicación en una amplia gama de forrajes, incluyendo pastos tropicales, y bajo diferentes condiciones ambientales, haciendo de esta técnica una herramienta valiosa en regiones de producción agrícola y ganadera diversa.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un forraje es una planta o la parte comestible, no dañina, con valores nutricionales para ser consumida por animales. En la ciencia agrónoma, la estimación precisa y rápida de los atributos del pasto tropical o forraje son importantes para la optimización de la nutrición del ganado, para ello un forraje debe presentar valores equilibrados de proteína cruda (PC) la cual representa la cantidad de nitrógeno que aporta en el desarrollo muscular y producción de la leche; la fibra detergente neutra (FDN) representa la composición vegetal, es decir, la lignina, la hemicelulosa y celulosa, finalmente, también es importante la fibra detergente ácida (FDA) que indica la digestibilidad y calidad del forraje. Estos parámetros y entre otros son cruciales para determinar el valor nutritivo de los forrajes y su adecuación en la dieta animal (Ejecutiva & Ejecutiva, 2017). Para hallar los parámetros, se cuenta con métodos convencionales que permiten estimar de forma precisa los valores de calidad del forraje, pero al desarrollar la metodología demanda tiempo, reactivos y altos costos para la obtención del resultado, para ello se ha requerido el uso de una tecnología basada en el infrarrojo cercano, NIRS se caracteriza por ser versátil y eficiente para el análisis químico no destructivo de una amplia gama de materiales, con aplicaciones clave en la agricultura, industria alimentaria, control de calidad, y la investigación científica, que utiliza la espectroscopía de infrarrojo cercano para analizar la composición química de diversos materiales. La técnica de NIRS ha ganado un amplio reconocimiento como un método valioso para determinar la composición química de una amplia variedad de forrajes (Parrini et al., 2018). La técnica se basa en la absorción de radiación en la región del infrarrojo cercano (generalmente entre 780 nm y 2500 nm) por parte del material a analizar, lo que permite obtener información sobre su composición química, facilitando la toma de decisiones para los diferentes sectores productivos, específicamente en el sector de la ganadería determinar la calidad nutricional del forraje permite alcanzar procesos más eficientes, debido a que los pastos tropicales presentan una variabilidad en su composición nutricional a causa de diversos factores a los que se enfrentan durante el crecimiento, también a suelos deficientes en

nutrientes, cambios climáticos e factores que no permiten la nitrificación del suelo, por lo anterior el uso de una técnica de alta precisión y rápida como es el NIRS ofrece a los productores ganaderos y a los investigadores de forrajes un método rápido, económico y versátil para determinar la composición de los nutrientes en el forraje (Paz et al., 2019). Por otra parte NIRS constituye un método computarizado de análisis rápido (Callejo Ramos A., 2017), contando en el mercado con dispositivos portátiles, rápidos, precisos y exactos una vez el equipo este correctamente calibrado (Rocateli & Zhang, 2017). Cabe resaltar que esta técnica de NIRS no necesita solventes ni reactivos, evitando así la contaminación ambiental por lo que se considera un método ecológico, que está de acuerdo con los principios de la química verde (Cayuela & García, 2017). Por consiguiente, el uso de esta técnica presenta ventajas frente a la química húmeda, debido a que permite el análisis simultáneo de varios componentes de la muestra, es decir no es destructiva ni invasiva, ya que tiene alta velocidad de procesamiento y no requiere de reactivos químicos, pero necesita mínima mano de obra, puesto que el costo de análisis es bajo y presenta alta precisión de predicción de las características nutricionales de los forrajes. (Erika A. Hernandez et al., 2021).

Esta revisión destaca los últimos estudios sobre las aplicaciones de NIRS en muestras de forraje, enfocándose en los parámetros nutricionales de los pastos tropicales. Iniciando con una descripción de la técnica NIRS, destacando las características de las muestras, seguido de estudios donde NIRS se ha aplicado exitosamente en el análisis del forraje.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1. Búsqueda bibliográfica y criterios de inclusión y exclusión.**

La forma de búsqueda se describirá en pasos, la realización del Review sobre la técnica NIRS en el análisis de forrajes:

#### **1. Objetivo de la Revisión**

Se realizar una búsqueda bibliográfica de las aplicaciones de NIRS en muestras de forraje para el análisis de los principales parámetros de calidad nutricional.

#### **2. Búsqueda Sistemática de la Literatura**

- Estrategia de Búsqueda: En la búsqueda se definirá en cada base de datos como son Scopus, Web of Science, Google Scholar. La aplicación de términos como "NIRS", "Near-Infrared Spectroscopy", "forage", "tropical grass", "forage quality", entre otros.
- Bases de Datos: Escoger bases de datos multidisciplinarias relevantes para buscar literatura científica, incluyendo Scopus, ScienceDirect, Web of Science, entre otras.
- Criterios de Inclusión y Exclusión: Para los criterios de Inclusión se tendrá estudios publicados desde 2017 en adelante, estudios que apliquen la técnica NIRS en el análisis de forrajes, artículos en inglés y/o español, Bases de datos multidisciplinaria de revista, artículo, fuentes documentales y publicaciones científicas, se usará un gestor bibliográfico para apoyar esta etapa(mendeley); por otra parte, los criterios de exclusión: Estudios que no se enfoquen en la aplicación de la técnica NIRS calidad nutricional del forraje y publicaciones de documento académico de baja confiabilidad.

#### **3. Selección de Estudios**

Desarrollar un proceso de selección en dos etapas:

- Primera Etapa: Evaluar títulos y resúmenes de los artículos identificados, para excluir aquellos que no cumplan con los criterios de inclusión.

- Segunda Etapa: Revisar el texto completo de los estudios seleccionados para determinar su inclusión final en la revisión.

#### 4. Extracción y Manejo de Datos

Plantilla de Extracción de Datos: Diseñar una plantilla y/o tabla de datos en Excel que detalle los documentos científicos seleccionados para el desarrollo del estudio, incluyendo la extracción de datos de los estudios. Los datos pueden incluir: Información sobre los autores, año de publicación, objetivo del estudio, tipo de forraje analizado, parámetros nutricionales evaluados por ejemplo PC, FDN, FDA, metodología, calibración de NIRS empleada y resultados principales.

Para la gestión de Referencias: se utilizará un software de gestión de referencias como Mendeley para organizar y gestionar los artículos seleccionados.

### 3. DESARROLLO Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Descripción de la técnica

En los últimos años, NIRS, basada en la absorción del espectro electromagnético (radiación en longitudes de onda entre 780 y 2500 nm), se ha utilizado en las industrias farmacéutica, petroquímica, agrícola y de procesamiento de alimentos, entre otras. La espectroscopia NIRS requiere poca o ninguna preparación de la muestra (Teye et al., 2019), ofreciendo así una forma sencilla, rápida y fiable de sustituir algunos procedimientos rutinarios de laboratorio y proporcionando una huella digital de la composición de la muestra. La energía en el rango NIR se dirige a la muestra, y la energía reflejada es medida por el instrumento, es decir, NIRS registra la absorción de energía en enlaces de C-H, N-H y O-H que se encuentran presentes en componentes orgánicos; de esta manera, cuando la luz entra en contacto con la materia, induce la absorción de energía únicamente en los enlaces que vibren con una frecuencia similar a la energía incidente. La absorción puede ser débil o fuerte conforme a la naturaleza de los enlaces químicos de los compuestos sólidos o líquidos; de esta manera cada grupo funcional absorbe luz de la región NIRS a una frecuencia y longitud de onda específica representado en el espectro como picos de absorción (Rivera et al., 2017), los datos de reflectancia (R) se expresan como  $\log(1/R)$ , lo cual se refiere a los datos de absorbancia, y se miden en intervalos de 1 nm para obtener los espectros de infrarrojo cercano (NIRS). Cada espectro se compone de múltiples puntos de datos, lo que permite evaluar la presencia de ruido espectral. Este ruido suele estar presente en regiones por debajo de  $3741 \text{ cm}^{-1}$  (2673 nm). Los espectros NIRS obtenidos a partir de las muestras de forraje tienen bandas de absorción que están correlacionadas con compuestos específicos. Las regiones espectrales entre 1650-1670 y 2260-2280 nm están correlacionadas con enlaces C-H en lignina y celulosa, y las bandas de absorción de la región 2100-2200 nm están correlacionadas con grupos funcionales de proteínas (Paixão et al., 2020); Sin embargo, esta técnica no destructiva requiere un procedimiento de calibración utilizando algunos métodos de referencia. La combinación de espectroscopia NIRS y análisis de datos multivariados (quimiometría o química computacional) proporciona modelos de calibración que correlacionan la respuesta espectral de una muestra con su perfil compositivo. (Véstia et al., 2019).

#### 3.2 Limitaciones de la técnica y cómo estas limitaciones pueden influir en los resultados del forraje

La precisión de los modelos NIRS es fundamental para garantizar la exactitud en la evaluación de propiedades químicas y físicas de las muestras, particularmente en el análisis de forrajes. Sin embargo, esta precisión puede verse comprometida por diversos factores, como las calibraciones incorrectas, la heterogeneidad de las muestras y las condiciones ambientales extremas. Comprender cómo estos elementos pueden afectar la precisión de los modelos es crucial para mejorar la confiabilidad de la técnica y asegurar resultados consistentes.

En primer lugar, las calibraciones incorrectas representan un riesgo significativo para la precisión de los modelos NIRS. Si este proceso no se lleva a cabo correctamente, o si se utilizan datos de baja calidad, el modelo resultante puede ser inexacto. Un modelo mal calibrado puede generar resultados que no reflejan con precisión las propiedades de la muestra, llevando a errores en la toma de decisiones. Esto es particularmente problemático en

la industria agrícola, donde las decisiones basadas en análisis NIRS, como la composición nutricional del forraje, pueden tener un impacto significativo en la producción y la calidad de los productos animales.

La heterogeneidad de las muestras es otro factor que puede afectar la precisión de los modelos NIRS. Las muestras heterogéneas, es decir, aquellas que presentan una gran variabilidad en su composición, pueden complicar el proceso de calibración y la interpretación de los resultados. Cuando las muestras son muy variables, el modelo NIRS puede tener dificultades para identificar patrones consistentes, lo que reduce su capacidad para predecir con precisión las propiedades de muestras futuras. Además, la heterogeneidad puede llevar a una representación sesgada de los datos si no se incluyen suficientes variaciones en el conjunto de calibración, lo que podría resultar en un modelo que no sea representativo de la población general de muestras.

Las condiciones ambientales extremas, como la temperatura y la humedad, también pueden influir en la precisión de los modelos NIRS. Estos factores pueden alterar las propiedades físicas de las muestras, lo que a su vez afecta los espectros NIRS obtenidos durante el análisis. Por ejemplo, cambios en la temperatura pueden modificar las características de absorción de los componentes de la muestra, mientras que la humedad puede afectar la transmisión de la luz infrarroja a través de la muestra. Estos efectos pueden llevar a resultados inconsistentes o inexactos si el modelo NIRS no está diseñado para compensar estas variaciones. Además, las condiciones ambientales extremas pueden influir en el rendimiento de los propios instrumentos NIRS, afectando la estabilidad y la reproducibilidad de los datos. (Guimarães et al., 2023).

El segundo factor, la variabilidad entre instrumentos, representa un desafío significativo en la implementación de la técnica de Espectroscopía de Infrarrojo Cercano (NIRS) para el análisis de forraje, a pesar de los avances tecnológicos en los equipos. Aunque la tecnología NIRS ha progresado sustancialmente, mejorando la precisión y reproducibilidad de los resultados, persiste la posibilidad de variabilidad entre los resultados obtenidos por diferentes instrumentos o en distintos laboratorios. Este fenómeno puede afectar negativamente la reproducibilidad si no se estandarizan adecuadamente las metodologías y calibraciones utilizadas, como se ha observado en estudios previos (Hay and Forage, 2022).

Es fundamental entender que, a pesar de las mejoras en la estabilidad y precisión de los instrumentos modernos de NIRS, existen ligeras diferencias en la configuración y el procesamiento de la información espectral de cada dispositivo. Estas variaciones pueden surgir de factores como los sensores, la fuente de luz y los detectores, que pueden diferir mínimamente entre dispositivos, generando diferencias en los espectros obtenidos para una misma muestra. Si las calibraciones no están ajustadas de manera óptima para cada instrumento en particular, estos pequeños desajustes pueden amplificarse durante el análisis, conduciendo a resultados inconsistentes.

Otra fuente crítica de variabilidad se encuentra en las calibraciones aplicadas, ya sea entre diferentes laboratorios o entre distintos instrumentos dentro del mismo laboratorio. La calibración es un proceso esencial en NIRS, pues consiste en correlacionar los espectros obtenidos con datos de referencia precisos, generalmente obtenidos mediante métodos de química húmeda. La falta de consistencia en las calibraciones, o la falta de actualizaciones que reflejen cambios en las condiciones de las muestras o en los equipos, puede resultar en diferencias significativas en los resultados obtenidos entre distintos instrumentos. Adicionalmente, las calibraciones desarrolladas en un laboratorio específico podrían no ser transferibles a otro entorno, debido a variaciones en la preparación de las muestras, las condiciones ambientales y las características de los propios instrumentos.

Además, la variabilidad en los resultados puede ser influenciada por factores externos como la temperatura, la humedad y el manejo de las muestras, que afectan la interacción de la luz infrarroja con las mismas y, por ende, el espectro medido. Por ejemplo, la humedad de la muestra puede interferir con la absorción de la radiación infrarroja, lo que conduce a resultados inexactos si no se controla adecuadamente. Incluso la preparación de la muestra, como el tamaño de las partículas o el nivel de secado, puede introducir variabilidad en las mediciones obtenidas por diferentes instrumentos.

No obstante, la industria ha realizado esfuerzos significativos para minimizar la variabilidad a través de la estandarización y la mejora continua de las tecnologías NIRS. Organizaciones como el NIRS Forage and Feed Testing Consortium han trabajado en el desarrollo de directrices y protocolos que buscan armonizar las prácticas de calibración y estandarización en la industria. Estos esfuerzos incluyen la creación de bibliotecas espectrales

más completas y la implementación de procedimientos de control de calidad más rigurosos, que ayudan a reducir la variabilidad entre instrumentos.

A pesar de estos avances, la eliminación completa de la variabilidad sigue siendo un desafío. Aunque los fabricantes continúan perfeccionando el diseño de los instrumentos para reducir las diferencias entre dispositivos, cada instrumento posee características únicas que pueden producir resultados ligeramente diferentes. Este problema se acentúa en escenarios donde se utilizan múltiples instrumentos para analizar un gran volumen de muestras, como es común en la industria del forraje. En estos casos, es crucial que los laboratorios adopten prácticas de calibración cruzada y realicen auditorías regulares de sus instrumentos para asegurar la máxima consistencia en los resultados.

En conclusión, aunque los avances tecnológicos han mejorado considerablemente la precisión y la fiabilidad de los análisis NIRS, la variabilidad entre los instrumentos sigue siendo un tema de preocupación importante. Esta variabilidad puede originarse en diferencias en la construcción del equipo, en las calibraciones utilizadas y en las condiciones externas que afectan las mediciones. La clave para mitigar estos problemas reside en la estandarización, la calibración cuidadosa y continua, y la implementación de controles de calidad rigurosos. Con estas medidas, la industria puede seguir confiando en NIRS como una herramienta poderosa y eficiente para el análisis de forrajes, aunque siempre será necesario un enfoque vigilante para minimizar la variabilidad y asegurar la precisión de los resultados.

Y el tercer factor, **Limitaciones en la Detección de Componentes Específicos**: Es fundamental reconocer que la técnica NIRS, ha transformado significativamente el análisis de forrajes, ofreciendo una herramienta rápida y no destructiva para evaluar la calidad nutricional. Sin embargo, es importante considerar las limitaciones inherentes a esta tecnología, particularmente en la detección de ciertos componentes específicos, como la lignina, que pueden afectar la evaluación precisa de la digestibilidad y la calidad del forraje.

Diversos estudios han evidenciado que la NIRS puede no ser tan precisa en la cuantificación de componentes como la lignina, un elemento crucial para la estructura de las plantas debido a su papel en proporcionar rigidez y resistencia a la descomposición. La complejidad de la lignina, caracterizada por su variabilidad química tanto entre diferentes especies vegetales como dentro de distintas partes de la misma planta, dificulta la obtención de espectros consistentes y precisos. Esta variabilidad puede llevar a que las mediciones de lignina mediante NIRS presenten una menor correlación con los métodos de referencia convencionales, lo cual podría inducir a errores en la interpretación de la digestibilidad del forraje.

Además de la lignina, otros componentes fibrosos como la Fibra Detergente Ácida (FDA) y la Fibra Detergente Neutra (FDN) también presentan retos en su análisis a través de NIRS. Estas fracciones fibrosas son determinantes para la calidad del forraje, ya que influyen directamente en la digestibilidad y el valor nutritivo del alimento para rumiantes. La precisión de la NIRS en la predicción de estos componentes puede verse comprometida si las calibraciones aplicadas no logran capturar la diversidad del material vegetal, situación que se agrava en regiones tropicales, donde la variabilidad de los forrajes es mayor debido a factores ambientales como el clima y el tipo de suelo.

El análisis de proteínas mediante NIRS, aunque generalmente más fiable, también enfrenta ciertos desafíos. Si bien la técnica ha demostrado ser efectiva para estimar el contenido de proteína cruda en varios tipos de forraje, su precisión puede verse afectada por la presencia de compuestos que interfieren con las señales espectrales. Por ejemplo, los nitratos y algunos minerales pueden provocar superposiciones en las bandas espectrales utilizadas para cuantificar proteínas, lo que podría dar lugar a estimaciones inexactas.

En síntesis, aunque la NIRS continúa siendo una herramienta valiosa para el análisis de forrajes, es esencial reconocer y comprender sus limitaciones. Esta tecnología, si bien ofrece ventajas significativas en términos de velocidad y no destructividad, no es infalible. La conciencia de las áreas en las que la NIRS puede presentar deficiencias permite a los investigadores y profesionales del sector agropecuario tomar decisiones más informadas y, cuando sea necesario, complementar los análisis de NIRS con métodos tradicionales para garantizar la precisión y fiabilidad de los resultados. Conforme la tecnología evoluciona, es probable que se observen mejoras en las capacidades de la NIRS, pero, por el momento, la cautela y una calibración adecuada son fundamentales para maximizar su potencial en el análisis de forrajes.

### 3.4 Características de la muestra

Para el análisis mediante espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS), es fundamental que las muestras consideradas para el estudio tengan en cuenta todos los factores que puedan influir en la composición química del alimento evaluado. Estos factores son críticos para el desarrollo de modelos de predicción precisos y exactos. En particular, las muestras sólidas destinadas al análisis en equipos de reflectancia deben ser secadas y molidas previamente. Este proceso permite controlar variables que podrían afectar los resultados. Los principales factores que deben ser controlados en las muestras antes de realizar la espectroscopía NIRS incluyen la humedad, el tamaño de partícula y la temperatura. Específicamente, en el caso de la humedad, los enlaces de hidrógeno y oxígeno presentes en el agua absorben intensamente la radiación infrarroja, lo que puede interferir con el análisis; en cuanto al tamaño de la partícula debe ser homogénea, ya que las partículas de mayor tamaño tienden a absorber más radiación. Para controlar este factor, se recomienda el uso de molinos calibrados con cribas de 1 mm, dado que la pulverización también puede generar variaciones en el tamaño de las partículas (Gaspard & Bernhardt, 2020).

En cuanto al número de muestras necesarias para la calibración y validación de modelos de predicción desarrollados mediante (NIRS) no está estandarizado, ya que depende de varios factores. Estos factores incluyen en el objetivo específico del análisis, la diversidad química y la homogeneidad de las muestras, así como la complejidad del modelo que se pretende desarrollar. Se recomienda que las muestras abarquen un rango representativo de las características químicas, para maximizar la precisión y la fiabilidad del modelo, incorporando así todas las posibles fuentes de variación del alimento que se va a analizar, no solo bajo las condiciones actuales, sino también considerando futuros análisis. En el contexto del análisis de la calidad de los forrajes, es importante considerar las siguientes variables: estación del año, localización geográfica, topografía, tipo de suelo, y prácticas de manejo de los pastos.

Por ende, para analizar una muestra, se requiere normalmente de pasto seco y molido, donde posteriormente se pone en una esfera integradora del equipo NIRS y los espectros se recolectan en modo de reflectancia difusa a una temperatura ambiente de 20 °C en una pequeña copa circular de 20 mm de diámetro. (Serrano et al., 2020).

### 3.5 Desarrollo de la Metodología de Calibración

Para garantizar que las calibraciones de la espectroscopia de infrarrojo cercano sean adecuadas y representativas de las muestras analizadas, se siguen varios pasos críticos. Estos pasos son esenciales para asegurar que los modelos de calibración produzcan resultados precisos y fiables en diferentes contextos y para diversas muestras.

1. **Selección y Preparación de Muestras Representativas:** La primera etapa crucial es la selección de un conjunto de muestras que representen toda la variabilidad esperada en las condiciones de análisis. Esto incluye variabilidad en la composición química, la humedad, y otros factores relevantes. Las muestras deben prepararse de manera uniforme, asegurándose que factores como el tamaño de las partículas y la humedad se controlen estrictamente, ya que estos pueden afectar la precisión de la lectura NIRS.
2. **Desarrollo del Modelo de Calibración:** Los modelos de calibración NIRS suelen desarrollarse utilizando técnicas de quimiometría, como la regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) y la regresión lineal múltiple (MLR). Estos modelos relacionan los datos espectrales con los parámetros químicos medidos a través de métodos de referencia (como la química húmeda). Se utilizan algoritmos que permiten ajustar los datos espectrales a estos parámetros, logrando que las predicciones sean lo más precisas posible.
3. **Validación del Modelo:** Una vez desarrollado el modelo, es fundamental validarlo para garantizar su fiabilidad. Esto se hace mediante dos tipos de validación: interna y externa. La validación interna generalmente utiliza técnicas como la validación cruzada, donde el conjunto de datos se divide en grupos para probar el modelo de manera iterativa. La validación externa, por otro lado, se realiza con un conjunto de muestras independientes que no se utilizaron para construir el modelo. Esta validación externa es crucial para evaluar la robustez y la capacidad predictiva del modelo en nuevas muestras.
4. **Ajuste y Recalibración:** Los modelos NIRS requieren ajustes periódicos para mantener su precisión a lo largo del tiempo, especialmente cuando se utilizan en diferentes condiciones o con nuevas variedades de muestras. Estos ajustes pueden implicar la actualización de las calibraciones con nuevos datos o la reoptimización del modelo con nuevas técnicas quimiométricas.
5. **Comparación con Métodos Convencionales:** Es común que las calibraciones NIRS se comparen con métodos analíticos convencionales, como la química húmeda, para evaluar su exactitud y precisión. En

muchos casos, los métodos NIRS pueden ofrecer una precisión comparable, pero con la ventaja de ser más rápidos y no destructivos. Sin embargo, algunos estudios indican que la precisión puede variar dependiendo de la complejidad del material analizado y la exactitud del modelo de calibración desarrollado.

Estos pasos aseguran que las calibraciones NIRS sean robustas y puedan ser aplicadas de manera efectiva en la evaluación de la calidad de forrajes y otros materiales, proporcionando resultados rápidos y fiables que son cruciales para la toma de decisiones en tiempo real. (McIntosh, 2022) (Risoluti et al., 2020)

### 3.6 NIRS aplicada al análisis de forrajes

En el estudio realizado por (Giraldo et al., 2023), se realizó el análisis de los valores de proteína cruda (PC), fibra detergente neutra (FDN) y fibra detergente ácida (FDA) la cual determinaron utilizando la técnica del infrarrojo cercano NIRS con el equipo de barrido VIS/NIR modelo 6500 FOSS® en el Laboratorio de Nutrición Animal del Centro de Investigación (C.I.) Tibaitatá de Agrosavia. Permitiendo así identificar las variables analizadas (PC, FDN, FDA), donde se empleó un análisis de componentes principales (PCA) en el software R y la librería FactorMineR. Evaluando el criterio de información bayesiano (BIC) y el criterio de información de Akaike (AIC) con la librería MASS en el software R, realizando para el análisis de la proteína cruda (PC), el uso del modelo de índice GNDVI (Índice de Vegetación Diferencial Normalizado Verde) con una función de suavizado, demostrando un efecto significativo sobre la variable dependiente, con un  $R^2$  de 0.764 y una desviación de 0.77. por otro lado, la estimación de la fibra detergente neutra (FDN), el uso del índice RDVI (Índice de Vegetación Diferencial Re normalizado) resultó en un  $R^2$  de 0.583 y una desviación explicada de 0.593. Por otro lado, la estimación de la fibra detergente ácida (FDA) presentó un  $R^2$  de 0.378 y una desviación explicada de 0.392. Para la PC, el índice que mejor se correlacionó fue el GNDVI. Los resultados para FDN, FDA y LIG mostraron un  $R^2$  bajo. Leer la conclusión y cerrar

En el estudio realizado por (Posada-Asprilla et al., 2019), se realizó la estimación de la cantidad y calidad del pasto kikuyo en sistemas lecheros ubicados en el norte de Antioquia, Colombia. En la investigación, se calcularon diez diferentes índices de vegetación (IV) utilizando 168 muestras de pasto kikuyo. Las muestras se pesaron para estimar la biomasa verde (BV) y se analizaron mediante NIRS para determinar los contenidos de proteína bruta (PB), fibra detergente neutra (FDN) y fibra detergente ácida (FDA). El estudio se llevó a cabo en la finca La Montaña, perteneciente a la Universidad de Antioquia, situada en las coordenadas  $N6^{\circ}27'09''$ ,  $75^{\circ}3'678''$ , a una altitud de 2.500 metros sobre el nivel del mar. La especie predominante en el sitio de estudio fue *Cenchrus clandestinum*. Los contenidos de PB, FDN y FDA se determinaron mediante un equipo NIRS DS 2500 FOSS® en el laboratorio de nutrición, pastos y forrajes de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Antioquia. Se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para examinar las relaciones entre los índices de vegetación y las variables PB, FDN y FDA, utilizando la librería FactorMineR del software R. Los resultados mostraron que el índice RNDVI, utilizado para la estimación de FDN, presentó una correlación baja con la variable dependiente, con un  $R^2$  de 0,43. De manera similar, para la estimación de FDA, el índice presentó un  $R^2$  de 0,28 y la relación entre la PB y el RNDVI fue un resultado con  $R^2$  de 0,97. Los detalles técnicos del estudio indican lo siguiente:

1. Relación entre el índice RNDVI y la Fibra Detergente Neutra (FDN):
  - El índice RNDVI mostró una correlación baja con la variable FDN, con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,43. Esto sugiere que el índice RNDVI no es un predictor confiable para estimar el contenido de FDN en el pasto kikuyo, ya que solo explica el 43% de la variabilidad en los datos.
2. Relación entre el índice RNDVI y la Fibra Detergente Ácida (FDA):
  - Similarmente, el índice RNDVI también mostró una baja correlación con la variable FDA, con un  $R^2$  de 0,28. Esto indica que el RNDVI explica solo el 28% de la variabilidad en los valores de FDA, lo que significa que no es un buen indicador para esta variable en el pasto kikuyo.
3. Relación entre el índice RNDVI y la Proteína Bruta (PB):

- En contraste con los anteriores, la relación entre el índice RNDVI y la proteína bruta (PB) mostró una alta correlación, con un  $R^2$  de 0,97. Este valor sugiere que el RNDVI es un excelente predictor del contenido de proteína bruta en el pasto kikuyo, explicando el 97% de la variabilidad en los datos.

LOS RESULTADO INDICAN Y PEGAR ESTE PARRAFO... Conclusión de los Resultados: Los resultados indican que el índice RNDVI tiene una alta capacidad predictiva para estimar el contenido de proteína bruta (PB) en el pasto kikuyo, pero es un predictor pobre para los contenidos de fibra detergente neutra (FDN) y fibra detergente ácida (FDA). Esto sugiere que, mientras el RNDVI podría ser útil para evaluar la calidad del pasto en términos de su contenido proteico, no es igualmente efectivo para evaluar la cantidad de fibra, lo que limita su aplicabilidad como un indicador integral de la calidad del forraje en sistemas lecheros.

Por otra parte, en el estudio llevado a cabo por (Pullanagari et al., 2018) se investigó la precisión de la proteína cruda (PC) en la región de Limestone Downs, ubicada en Port Waikato ( $37^{\circ}28.665'S$ ,  $174^{\circ}45.540'E$ ) en el noroeste de Nueva Zelanda. Esta área está dedicada al cultivo de pastos mixtos, predominando especies como el ballico perenne (*Lolium perenne* L.) y el trébol blanco (*Trifolium repens* L.), con una menor presencia de pasto kikuyo (*Cenchrus clandestinus*), diente de león (*Taraxacum officinale*) y oreja de gato (*Hypochaeris radicata*). Las muestras de pasto recolectadas fueron, selladas y almacenadas en una caja refrigerante para su transporte a un laboratorio analítico (Analytical Research Laboratories Ltd., Napier, Nueva Zelanda), donde se realizó la determinación de PC de manera inmediata. Para el análisis, se utilizó un sistema de imágenes hiperespectrales Aisa FENIX de espectro completo (Specim Ltd., Oulu, Finlandia). Los resultados del estudio demostraron que la PC podía predecirse con alta precisión a partir de los datos hiperespectrales mediante la técnica de Random Forest (RF), con un coeficiente de determinación de validación cruzada ( $R^2CV$ ) de 0.66, un error cuadrático medio de validación cruzada (RMSECV) de 2.24 y una relación de desempeño de predicción de validación cruzada (RPDCV) de 1.68. La precisión mejoró ligeramente ( $R^2CV = 0.70$ , RMSECV = 2.06, RPDCV = 1.82) al incorporar variables ambientales como la elevación, el ángulo de pendiente, la orientación de la pendiente y el tipo de suelo.

En el estudio realizado por (Enríquez-Quiróz Javier F & Gutierrez Ricardo Basurto, n.d.), se llevó a cabo en el Campo Experimental "La Posta" del INIFAP, ubicado en Paso del Toro, municipio de Medellín de Bravo, Veracruz. El propósito de esta investigación fue desarrollar modelos de calibración NIRS para estimar el contenido de fracciones proteicas en pastos del género *Urochloa* en la zona tropical de México. Se recolectaron un total de 189 muestras de tres especies del género *Urochloa*: *Dictyoneura* (*Urochloa humidicola*), *Insurgente* (*Urochloa brizantha*) y *Mulato I* (*Urochloa ruziziensis* x *U. brizantha*). Las muestras fueron analizadas utilizando el equipo Thermo Scientific Nicolet™ 6700 FT-Near Infrared Analyzer (Thermo Electron Corp, Madison WI, USA), en un rango de longitudes de onda de 1,000 a 2,500 nm de reflectancia. Para obtener los espectros, se empleó el software OMNIC versión 2008. Se aplicó la variable normal estándar (VNS) a todos los espectros para eliminar los efectos de dispersión y limitar la región utilizada en caso de presencia de ruido significativo. También se utilizaron tratamientos matemáticos basados en derivadas de primer orden para optimizar la extracción de información útil de los espectros. Para la calibración de los espectros, se aplicó el modelo de regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) utilizando el software de quimiometría TQ Analyst V8. En cuanto a las ecuaciones para PC, relacionadas con la absorción de N-H, el coeficiente de determinación ( $R^2v$ ) y el error de predicción residual (DRPv) fueron de 0.95 y 4.0, respectivamente, lo que indica una precisión sobresaliente en la predicción.

En la investigación realizada por (Monrroy et al., 2017), se desarrollaron modelos basados en espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) y regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) para estimar los contenidos de fibra detergente neutra (NDF), fibra detergente ácida (ADF), celulosa y proteína cruda (PC) en muestras de forraje de *Brachiaria* spp. El modelo de calibración fue validado internamente mediante validación cruzada, obteniendo errores de validación comparables a los métodos convencionales. El Laboratorio de Bromatología del Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá proporcionó un total de 153 muestras de forraje de *Brachiaria* spp. Los espectros de estas muestras se registraron en modo de reflectancia difusa, con intervalos de 2 nm, abarcando un rango de 570 a 1850 nm, utilizando el instrumento InfraXact™ Lab (FOSS, MA, USA) y 32 escaneos por muestra. Para cada muestra, se registraron y promediaron dos espectros. Los datos de reflectancia sin procesar se convirtieron en absorbancia, y se realizó la corrección de la línea base utilizando el software Essential FTIR (Essential FTIR, USA). Además, los datos espectrales se preprocesaron aplicando la variación estándar normal (SNV) y métodos de derivadas de primer y segundo orden. En cuanto al contenido de PC, los resultados mostraron una diferencia entre los valores experimentales y los estimados ( $R^2 = 0.53$ ), posiblemente debido al estrecho rango de concentraciones de muestra utilizado en el procedimiento de calibración. No obstante, los modelos NIRS-PLS

demonstraron ser eficaces para estimar los contenidos de FDN ( $R^2 = 0.86$ ) y FDA ( $R^2 = 0.90$ ). Los resultados de la investigación realizada son los siguientes: El modelo desarrollado para estimar el contenido de proteína cruda (PC) mostró un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.53. Este valor indica que el modelo tiene una capacidad predictiva limitada para la PC, lo cual podría deberse al estrecho rango de concentraciones de las muestras utilizadas en la calibración. Esto sugiere que el modelo NIRS-PLS para PC no fue tan preciso, sin embargo, el modelo mostró un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.86 para la FDN, lo que indica que el modelo es bastante eficaz para predecir el contenido de FDN en las muestras de forraje. Un  $R^2$  de 0.86 sugiere una buena correlación entre los valores estándar medidos y por último la FDA fue aún más preciso, con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.90. Este valor sugiere que el modelo tiene una alta capacidad predictiva para la FDA, proporcionando estimaciones cercanas a los valores estándar.

En resumen, los modelos NIRS-PLS desarrollados en este estudio fueron eficaces para estimar los contenidos de fibra detergente neutra (FDN) y fibra detergente ácida (FDA) en muestras de forraje de *Brachiaria* spp., con altos coeficientes de determinación ( $R^2 = 0.86$  para FDN y  $R^2 = 0.90$  para FDA). Sin embargo, el modelo para estimar la proteína cruda (PC) mostró una capacidad analítica limitada, posiblemente debido a un rango de concentraciones demasiado estrecho en las muestras utilizadas para la calibración.

El propósito de la investigación llevada a cabo por (Crovetti & Bozzi, 2018), fue evaluar el potencial de la espectroscopia de infrarrojo cercano por transformada de Fourier (FT-NIRS) para predecir la composición química y el valor nutricional (unidades de forraje para leche y carne) de diferentes pastos, sugiriendo su utilidad práctica como una herramienta poderosa. El estudio se basó en 105 muestras recolectadas durante 2013-2014 en pastizales naturales y naturalizados de la región de Toscana, Italia. Las especies herbáceas predominantes incluyeron *Avena fatua* L., *Capsella bursa pastoris* L., Para el análisis químico, se siguió el protocolo CEE-ASPA. De cada muestra, se tomaron tres alícuotas de 4 a 6 gramos de muestra seca y molida, las cuales fueron sometidas a escaneo en modo de absorbancia utilizando un equipo FT-NIRS Antaris II (Thermo Fisher Scientific). Se aplicó la corrección multiplicativa de dispersión (MSC) a todo el espectro para eliminar interferencias ópticas y efectos físicos como el tamaño de las partículas y el brillo superficial en las longitudes de onda que no transmiten información química relevante. Además, se identificaron y eliminaron espectros de valores atípicos cuando fue necesario. Para el pretratamiento matemático de los espectros, se utilizaron derivadas de primer orden y se evaluaron los valores atípicos con el software de quimiometría TQ Analyst 8.6.12. La regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) se empleó tanto en la calibración como en los modelos de validación. La estimación de la materia seca se benefició de la fuerte absorción de los grupos  $-OH$ . Los modelos obtenidos mostraron un alto coeficiente de determinación tanto para CAm ( $R^2$ : 0.997; RMSE: 0.937) como para CPm ( $R^2$ : 0.993; RMSE: 0.973). Los altos coeficientes de determinación para CAm probablemente se deban al estrecho rango de valores considerados, aunque los RPD obtenidos fueron consistentemente altos. La fibra cruda y las fracciones fibrosas fueron detectables en los espectros NIRS debido a las adsorciones de los grupos  $-CH$  y  $-OH$ . La fibra detergente ácida (FDA) mostró un buen ajuste con coeficientes de determinación y errores cuadráticos medios de la raíz para los modelos de calibración ( $R^2$ : 0.991, RMSE: 1.120) y de validación ( $R^2$ : 0.960, RMSEP: 1.960;  $R^2$ CV: 0.948, RMSECV: 1.140). La fibra detergente neutra (FDN), una fracción no soluble de la pared celular del pasto compuesta por diversos carbohidratos estructurales presentó coeficientes de determinación de 0.994 y 0.990 en calibración y validación independiente, con errores de 1.150 y 1.330, respectivamente. Los valores presentados en la investigación indican la efectividad y precisión de la espectroscopia de infrarrojo cercano por transformada de Fourier (FT-NIRS) para predecir la composición química y el valor nutricional de diferentes pastos. A continuación, se desglosan los principales indicadores y su significado:

#### 1. Coeficientes de determinación ( $R^2$ ):

- CAm (materia seca):  $R^2$  de 0.997 en la calibración, lo que indica una excelente precisión en la predicción del contenido de materia seca. Esto significa que el modelo explica el 99.7% de la variabilidad en la materia seca basada en los espectros NIRS.
- CPm (proteína cruda):  $R^2$  de 0.993, lo que también refleja una alta precisión en la predicción de la proteína cruda.
- FDA (fibra detergente ácida):  $R^2$  de 0.991 en la calibración y 0.960 en la validación independiente, lo que sugiere que los modelos tienen un ajuste excelente tanto en la fase de calibración como en la validación externa.
- FDN (fibra detergente neutra):  $R^2$  de 0.994 en calibración y 0.990 en validación independiente, lo que indica que el modelo predice muy bien el contenido de FDN en las muestras.

## 2. Errores Cuadráticos Medios de la Raíz (RMSE y RMSEP):

- Estos valores representan la desviación estándar de las diferencias entre los valores predichos por el modelo y los valores reales medidos en las muestras.
- CAm: RMSE de 0.937, lo que sugiere que el error en la predicción de la materia seca es muy bajo.
- CPm: RMSE de 0.973, indicando igualmente un bajo error en la predicción de la proteína cruda.
- FDA: RMSE de 1.120 en calibración y RMSEP (error en la validación) de 1.960, lo que muestra que, aunque hay un ligero aumento en el error durante la validación, sigue siendo razonablemente bajo.
- FDN: RMSE de 1.150 en calibración y RMSEP de 1.330 en validación, lo que indica una buena precisión con errores relativamente bajos.

## 3. RPD (Ratio de Desempeño de Predicción):

- Aunque no se menciona explícitamente en los valores dados, se indica que los RPD obtenidos fueron consistentemente altos, lo que sugiere que los modelos tienen una capacidad predictiva robusta. Un RPD alto generalmente indica que el modelo es adecuado para la predicción de nuevas muestras.

En resumen, los valores altos de los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y los bajos errores cuadráticos medios de la raíz (RMSE) indican que la FT-NIRS es una herramienta altamente precisa y confiable para predecir la composición química y el valor nutricional de los pastos, incluyendo componentes como la materia seca, la proteína cruda, la fibra detergente ácido (FDA) y la fibra detergente neutro (FDN). Estos resultados refuerzan la utilidad práctica de NIRS en el análisis de forrajes, permitiendo una gestión más eficiente de la nutrición animal.

El estudio realizado por (Navas-Panadero et al., 2021) tuvo como objetivo evaluar la producción y la calidad nutricional del forraje de *S. nigra* en un sistema silvopastoril con cercas vivas. La investigación se llevó a cabo en la finca San Joaquín, dedicada a la lechería especializada, ubicada en el municipio de Paipa (5°44'10" N, 73°04'43" O), Boyacá, Colombia. Para determinar la calidad nutricional, se recolectaron muestras de 500 g de forraje verde (FV) de la planta completa (hojas y tallos comestibles) y se tomaron muestras por separado de hojas y tallos. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio utilizando espectrofotometría de infrarrojo cercano (NIRS) para determinar el contenido de materia seca (MS), proteína cruda (PC), fibra en detergente neutro (FDN) y fibra en detergente ácido (FDA). El análisis de los datos se realizó con el software Infostat®. Los resultados mostraron que *S. nigra* tiene un elevado contenido de proteína cruda (PC) de 23,7±2%, lo que sugiere su alto potencial para ser utilizado en sistemas de lechería especializada. Además, se observó que los contenidos de fibra en detergente neutro (FDN) y fibra en detergente ácido (FDA) fueron bajos, con valores de 35,6±3% y 18,7±3%, respectivamente. Estas características favorecen el aprovechamiento de los nutrientes a nivel ruminal y el consumo voluntario de los animales.

El propósito de la investigación realizada por (Guatusmal-Gelpud et al., 2020) fue evaluar el efecto de dos edades y dos alturas de corte sobre las variables morfológicas, la producción y la calidad nutricional de *Tithonia diversifolia* y *Sambucus nigra* establecidas en un sistema silvopastoril. Este estudio se llevó a cabo en el Centro de Investigación Obonuco de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), ubicado en Pasto, Colombia, en las coordenadas 1°11'41,3" N y 77°19'19" W. Se realizaron análisis de composición nutricional para ambas especies arbustivas utilizando la metodología de espectrofotometría por infrarrojo cercano (NIRS), con el fin de determinar el porcentaje de proteína cruda (PC). Posteriormente, los datos obtenidos fueron analizados en términos de su varianza y distribución normal. Para identificar diferencias significativas entre los tratamientos, se empleó el paquete CAR en el software estadístico R v3.5.1. Los datos de producción por arbusto, rendimiento en toneladas por hectárea por año y composición fueron analizados mediante análisis de varianza (ANOVA), complementado con la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). En aquellos casos en los que los niveles de los factores fueron cualitativos, se llevó a cabo un análisis de contrastes ortogonales ( $\alpha = 0,05$ ) para determinar el efecto de los factores por separado. Los cálculos estadísticos se realizaron utilizando el paquete agrícola en el software R. Los resultados del estudio indicaron que, a una altitud de 2750 msnm, la etapa de prefloración mostró el mayor valor de PC (26,73 %) en *Tithonia diversifolia*. Este valor elevado de proteína se atribuye a una floración más lenta a mayores altitudes. En *Sambucus nigra*, el nivel más alto de proteína se encontró a los 60 días, con un 26,25 %.

El estudio realizado por la (Lic. Ortiz Daniela Alejandra, 2021) analiza el contenido de fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA) y proteína bruta (PB) en los materiales evaluados utilizando la tecnología NIRS con calibraciones específicas para este propósito. El Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus

siglas en inglés) fue el método empleado para un análisis exploratorio de datos espectrales. El software WINISI (Infrasoft International, Port Matilda, PA, EE. UU.) fue utilizado para procesar los datos obtenidos. Los pretratamientos aplicados incluyeron el promedio de espectros, suavizado espectral, y la primera derivada para la eliminación de desplazamientos constantes de la línea base, mientras que la segunda derivada eliminó los desplazamientos que varían linealmente con la longitud de onda. Para la calibración cuantitativa, se emplearon los métodos de Mínimos Cuadrados Parciales (PLS), cuyo objetivo es establecer un vínculo lineal entre las matrices de datos espectrales (X) y los valores de referencia (Y), mediante el cálculo con algoritmos de mínimos cuadrados aplicados a 512 muestras de residuos. La estimación más precisa de la concentración de FDN y FDA se obtuvo al aplicar los pretratamientos matemáticos 1,4,4,1 y SVN+D, resultando en valores de  $R^2_{cv}$  de 0,91 y 0,76, y RPD de 3,27 y 2,61 para FDN y FDA, respectivamente. La relación entre los datos de FDN obtenidos en laboratorio y la predicción por NIRS para el conjunto de calibración de residuos de forraje de pasto llorón (PLL) mostró una buena distribución de los valores, cercanos a la línea de igual respuesta  $X=Y$ . En el caso de FDA, la distribución de muestras se concentró en la primera mitad del rango y no fue tan homogénea cerca de la línea de tendencia, reflejando un  $R^2$  entre el método de referencia y NIRS de 0,76, menor que el alcanzado por FDN (0,91). Para PB, la ecuación con mejor predicción se obtuvo al aplicar los pretratamientos 1,4,4,1 y SVN+D sobre los espectros, resultando en un RPD de 3,71, un  $R^2_{cv}$  de 0,93 y una RER de 18,81, lo que representó la calibración más adecuada. En términos generales, se encontró una mejor precisión predictiva para PB que para los parámetros de fibra FDN y FDA. Esto podría deberse a que la proteína es un compuesto químico más definido en comparación con FDN y FDA, los cuales comprenden combinaciones de diferentes entidades químicas, lo que puede afectar las absorciones de energía NIR y alterar las relaciones entre el método de referencia y los datos espectrales obtenidos.

El estudio realizado por (Oscar Ospina et al., 2021), se enfocó en las gramíneas de los valles interandinos y la Cordillera de los Andes en Colombia. Para el análisis de fibra detergente neutro (FDN) mediante espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS), se recolectaron y analizaron 42 muestras, las cuales fueron enviadas al laboratorio de Corpoica Tibaitatá, Colombia. En este laboratorio, se llevó a cabo una calibración del NIRS específica para el cálculo del FDN en gramíneas tropicales, logrando un coeficiente de correlación superior a 0.90 ( $r > 0.90$ ) con un tamaño muestral de 156. Adicionalmente, se calibraron ecuaciones comparativas entre el FDN medido con NIRS y los análisis químicos convencionales en el laboratorio de Corpoica Tibaitatá. Este esfuerzo de calibración involucró 194 muestras de gramíneas colombianas y resultó en un coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0.95, lo que indica una alta precisión y confiabilidad de la técnica NIRS para la determinación de FDN. Estos resultados confirman que la calibración del NIRS para medir FDN es altamente precisa y confiable. Para la determinación de FDN en gramíneas, se pueden emplear métodos como la química húmeda tradicional de Van Soest, los análisis NIRS o algoritmos de análisis de imágenes RGB, obteniendo resultados comparables en términos de precisión.

El estudio realizado por (Sandra et al., 2017), tuvo como objetivo desarrollar ecuaciones de calibración para predecir la composición químico nutricional del rye grass italiano (RG) (*Lolium multiflorum* Lam) mediante la técnica de espectroscopía de reflectancia en infrarrojo cercano (NIRS). Para ello, se recolectaron 75 muestras de RG de diferentes semanas de corte en los campos experimentales del Centro de Investigación IVITA-EI Mantaro, ubicado en Huancayo, Perú. Cada muestra fue analizada utilizando el equipo NIRS, Antaris II FT-NIR Analyzer THERMO™, que opera en un rango de longitud de onda de 400 a 2500 nm y es capaz de analizar tanto materias primas líquidas como sólidas. El equipo está equipado con una computadora y cápsulas de cuarzo de 8 cm de diámetro para el escaneo de muestras secas y molidas. La gestión de la base de datos de espectros se realizó mediante el software TQ Analyst™. Posteriormente, se llevó a cabo el análisis químico de referencia para determinar los contenidos de proteína cruda (PC) y fibra detergente neutro (FDN). El tratamiento matemático para la calibración y validación de los modelos se realizó utilizando la técnica de mínimos cuadrados parciales (PLS) y la primera derivada. En el conjunto de calibración, el contenido de PC presentó un valor promedio de 19.02%, mientras que en el conjunto de validación externa fue de 19.72%. Los modelos NIRS mostraron un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.98 para la PC. En cuanto a la FDN, los valores promedio fueron de 60.98% y 60.34% en los conjuntos de calibración y validación, respectivamente, con un  $R^2$  de 0.94. Los resultados del modelo de validación externa revelaron altos coeficientes de correlación (R) de 0.97 y 0.93, y coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de 0.94 y 0.86 para los componentes PC y FDN, respectivamente. La conclusión que se puede obtener del estudio realizado es que la técnica de espectroscopía de reflectancia en infrarrojo cercano (NIRS) es altamente efectiva para predecir la composición químico-nutricional del rye grass italiano (*Lolium multiflorum* Lam). Los modelos de calibración desarrollados para la predicción de la proteína cruda (PC) y la fibra detergente neutra (FDN) mostraron altos coeficientes de determinación ( $R^2$ ), 0.98 para PC y 0.94 para FDN, lo que indica una fuerte

correlación entre los valores predichos por NIRS y los resultados obtenidos a través del análisis químico de referencia. Además, los altos coeficientes de correlación en la validación externa (0.97 para PC y 0.93 para FDN) sugieren que NIRS es una herramienta precisa y fiable para la evaluación de estos componentes en el forraje, lo que la convierte en una alternativa viable y eficiente a los métodos convencionales de análisis nutricional

El estudio realizado por (Molano et al., 2017), se llevó a cabo en el Laboratorio de Calidad de Forrajes del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), situado en el municipio de Palmira, Valle del Cauca, Colombia. Las muestras fueron analizadas utilizando un equipo monocromador FOSS-NIRSystem II, modelo 6500, que opera en un rango de longitudes de onda de 400 a 2,500 nm de reflectancia. Cada muestra fue escaneada por duplicado con el software ISIScan, versión 2.71. Una vez recolectados los espectros, se generó un archivo .nir. El objetivo del estudio fue desarrollar y evaluar ecuaciones de calibración para predecir parámetros de calidad nutritiva de especies forrajeras tropicales mediante espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS). La calibración se llevó a cabo tras obtener los análisis de referencia en laboratorio para los parámetros de proteína cruda (PC), fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA), digestibilidad in vitro de la materia seca (DIVMS) y digestibilidad de la fibra detergente neutro (DFDN). Estos datos se almacenaron en un archivo Excel con extensión .txt para formar un colectivo por cada parámetro. Utilizando los archivos generados (.txt y .nir), se creó un archivo .cal con el software WinISI III (IS-1485) versión 1.6, el cual se sometió a un análisis estadístico RMS (Root Mean Square) para evaluar la repetibilidad espectral de los datos. Dependiendo de la complejidad del parámetro, se establecieron diferentes límites de selección: un RMS de 6,000 para PC, FDA y DIVMS, y un RMS de 3,000 para FDN y DFDN. En total, se analizaron 1,991 muestras de tejido de gramíneas y leguminosas con diferentes edades de rebrote, estados fenológicos y partes de las plantas recolectadas. Se realizaron análisis químicos de referencia para proteína cruda (n=315), fibra detergente neutro (FDN) (n=243) y fibra detergente ácido (FDA) (n=156). Las curvas de calibración se calcularon utilizando errores estándar de calibración, validación cruzada (SEVC) y predicción. La precisión de cada ecuación se evaluó mediante el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el índice RPD (relación entre la desviación estándar y el SEVC). La validación externa mostró coeficientes de correlación (r) superiores a 0.90 para todos los parámetros, excepto para FDA, que presentó un r de 0.72. Los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) para los modelos fueron superiores a 0.90, indicando un buen ajuste. El índice RPD fue mayor a 3, lo cual indica un alto poder predictivo de las ecuaciones seleccionadas. Hubo una alta correlación entre las predicciones por NIRS y los datos de referencia de laboratorio, exceptuando FDA, que mostró una correlación  $r = 0.72$ .

El estudio llevado a cabo por (Ibáñez & Alomar, 2018) investigó la capacidad de la espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS) para predecir la composición química y los parámetros fermentativos de muestras de ensilaje. Se analizaron un total de 920 muestras, de las cuales 464 no contenían aditivos y 456 incluían diversos aditivos. Los análisis se realizaron por duplicado en el Laboratorio de Nutrición Animal de la Universidad Austral de Chile, en Valdivia. Para determinar el contenido de proteína cruda (PC), se utilizó el método Kjeldahl, calculando el contenido de nitrógeno como  $N \times 6,25$ , con selenio como catalizador. La fibra detergente neutro (FDN) y la fibra detergente ácido (FDA) se evaluaron según el procedimiento de Van Soest y los métodos de la AOAC. Los espectros de reflectancia se obtuvieron mediante un monocromador de barrido (Foss-NIR Systems, Modelo 6500, Silver Spring, Maryland, EE.UU.) equipado con un módulo giratorio. Las muestras se colocaron en una celda circular de aluminio anodizado con una ventana de cuarzo de 35 mm de diámetro y 10 mm de profundidad. El software WINISI 1.04 se utilizó para procesar los datos en una computadora personal. Cada espectro de muestra se obtuvo promediando 16 lecturas sucesivas, exponiendo las muestras a radiación electromagnética en el rango visible-NIR, entre 400 y 2500 nm, a intervalos de 2 nm, resultando en un espectro de 1050 puntos de datos por muestra. Las ecuaciones de calibración se desarrollaron mediante regresión de mínimos cuadrados parciales modificados (MPLS), utilizando validación cruzada al dividir el conjunto de calibración en cuatro grupos. Se determinó el error estándar de validación cruzada (SECV) y la proporción de varianza explicada (1-VR). Los resultados mostraron que los modelos predictivos para cenizas totales (CT), proteína cruda (PC), fibra cruda (FC), FDN y FDA tenían altos valores predictivos, con 1-VR > 0.89 y valores de RPD > 3. Los parámetros de proteína cruda presentaron un alto coeficiente de determinación ( $R^2 > 0.93$ ), indicando una fuerte correlación entre las bandas de absorción NIR y los datos de referencia. En el caso de las fracciones de fibra obtenidas mediante técnicas de detergentes (FDN y FDA), los valores de RPD superaron 4.46 y 1-VR fue superior a 0.96, lo que refuerza la robustez de los modelos debido al gran número de muestras utilizadas en la calibración y validación. Los espectros NIRS mostraron una alta precisión en respuesta a los cambios en la composición química de las fracciones de fibra, permitiendo el desarrollo de modelos predictivos confiables. Esto

sugiere que NIRS es una herramienta eficaz para evaluar la calidad del ensilaje en términos de su composición química y parámetros fermentativos.

El estudio realizado por (Yang et al., 2017) tuvo como principal objetivo la construcción de modelos de espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS) para predecir la calidad química del forraje de ballico italiano, centrándose en las concentraciones de proteína cruda (PC), fibra detergente ácido (FDA) y fibra detergente neutro (FDN). Se recolectaron 403 muestras de ballico italiano en diversas etapas de desarrollo y localidades diferentes. Para el análisis, se utilizó un espectrofotómetro de infrarrojo cercano por transformada de Fourier (FT-NIR) modelo Bruker MPA (Bruker, Bremen, Alemania), que estaba equipado con un haz de cuarzo, un detector de PbS, una esfera integradora de macrosample y una copa giratoria para muestras. Esto permitió escanear grandes áreas de las muestras y generar espectros con 2,203 puntos de datos por muestra. Para la calibración y validación de los modelos, se seleccionaron 123 muestras. La construcción de los modelos NIRS se realizó utilizando el software OPUS (Bruker, versión 5.5) mediante regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS). Antes de la calibración, se aplicaron varias técnicas de preprocesamiento de datos, incluyendo variación normal estándar (SNV), corrección estándar de dispersión múltiple (MSC), normalización mínimo-máximo (MMN), primera derivada (FD), segunda derivada (SED), sustracción de línea recta (SLS), eliminación de offset constante (COE) y combinaciones de FD con MSC, SLS y SNV para eliminar imperfecciones en los datos. Los métodos estadísticos utilizados en el estudio incluyeron el coeficiente de determinación en la validación cruzada ( $R^2CV$ ) y la validación externa ( $R^2V$ ), el error cuadrático medio de calibración (RMSEC), el error cuadrático medio de validación cruzada (RMSECV) y el error cuadrático medio de predicción (RMSEP). Los resultados obtenidos mostraron que el modelo de PC tenía un coeficiente de determinación ( $R^2V$ ) de 0.99 y un valor de RPD de 9.37, lo que según las pautas sugeridas por (Craig A. Roberts & Jerry Workman, 2017) indica que el modelo es excelente para la selección ( $R^2V > 0.95$  y  $RPD > 4$ ). En cuanto a los modelos para FDN y FDA, los resultados también fueron satisfactorios, con  $R^2V$  de 0.91 y 0.95, y RPD de 3.44 y 4.40, respectivamente. Estos resultados son consistentes con estudios previos, aunque la precisión del modelo para FDN fue menor en comparación con el de FDA. Cabe destacar que el coeficiente de determinación en el proceso de calibración para FDN ( $R^2CV = 0.94$ ) fue mayor que en la validación ( $R^2V = 0.91$ ), lo cual podría atribuirse a la distribución no uniforme de la composición en el conjunto completo de muestras empleadas.

El estudio realizado por (Carlos Estupiñán et al., 2021) se enfocó en la valoración nutritiva de dos especies forrajeras importantes en Perú: la alfalfa (*Medicago sativa* L.) y el trébol rojo (*Trifolium pratense* L.). Se empleó el análisis proximal para determinar el contenido de proteína cruda (PC), extracto etéreo (EE), fibra cruda (FC), cenizas totales (CZ) y fibra detergente neutra (FDN). Además, se capturó el espectro de las muestras utilizando un equipo NIRS. Se trabajaron con 75 muestras de variedades de alfalfa (SW 8210, WL 625HQ) y 75 muestras de variedades de trébol rojo (Quiñequeli, Kendland), recolectadas de los campos de la Estación Experimental IVITA El Mantaro, en la región Junín, Perú. Para la obtención de los espectros, se utilizó un espectrómetro Antaris-FT NIR Analyzer (ThermoFischer), y el procesamiento de los datos espectrales se realizó con el software TQ Analyst™ para la generación de ecuaciones de calibración y validación mediante la técnica de Cuadrados Mínimos Parciales (PLS). Los parámetros de exactitud utilizados para evaluar la calibración y estimar la capacidad predictiva incluyeron la desviación estándar de los valores referenciales (SD) y el error estándar de la predicción (RMSEP). Las ecuaciones de calibración fueron seleccionadas con el objetivo de minimizar el error estándar de la calibración (SEC). Los resultados mostraron un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.98 para la proteína cruda (PC) y de 0.95 para la fibra detergente neutra (FDN), indicando una buena capacidad predictiva. En términos de los estadísticos de validación y calibración, tanto para la alfalfa como para el trébol rojo, se logró una calibración eficaz, demostrando la utilidad de la técnica NIRS para la valoración nutritiva de estas especies forrajeras.

En el estudio realizado por (Hart et al., 2020), se evaluaron los parámetros de masa y calidad del forraje en 18 parcelas de pastizales, distribuidas en seis granjas comerciales en Suiza. El instrumento NIRS portátil (HarvestLab TM 3000, Deere & Company, Moline, IL, EE. UU.) se utilizó como un laboratorio móvil, capaz de operar tanto en las oficinas de la granja como en el maletero de un automóvil, o incluso montado en maquinaria de cosecha para analizar la calidad del alimento en campo y casi en tiempo real. Este dispositivo estaba compuesto por un cuerpo sensor con un espectrómetro de matriz de diodos y una unidad de muestreo que incluía un plato de muestreo giratorio sobre una fuente de luz halógena. El sistema utilizaba referencias internas de blanco y negro y realizaba mediciones en longitudes de onda entre 950 nm y 1530 nm, con una resolución espectral de 3-2 nm. Las relaciones lineales fueron determinadas mediante el coeficiente de correlación de Pearson ( $r_p$ ). Se aplicó regresión lineal multivariada de mínimos cuadrados ordinarios para explicar los errores del modelo MSI (referencia - modelo MSI).

La significancia de las variables explicativas fue evaluada utilizando la prueba F con sumas de cuadrados de tipo III, considerando significativas aquellas variables agregadas al final. La importancia relativa de estas variables, es decir, sus contribuciones individuales a la varianza explicada del modelo lineal ( $R^2$ ), fue calculada mediante las métricas de Lindemann, Merenda y Gold (LMG), conforme a lo propuesto por Lindemann et al.

El NIRS presentó errores porcentuales absolutos entre 9,3% y 22,2% en la determinación de los parámetros de calidad del pasto (Tabla 4). Este desempeño relativamente bajo se atribuyó principalmente a un error sistemático. Sin embargo, las correlaciones entre los parámetros de calidad y las mediciones de referencia fueron elevadas ( $r \geq 0,71$ ).

#### **4. CONCLUSIONES**

1. Cabe concluir que la implementación de la técnica NIRS en la evaluación de forrajes tropicales ofrece una solución efectiva para la rápida determinación de parámetros nutricionales y la gestión eficiente de recursos. NIRS ha demostrado ser una herramienta precisa y eficiente para la predicción de componentes nutricionales clave como la proteína cruda (PC), la fibra detergente neutra (FDN) y la fibra detergente ácida (FDA). Su capacidad para proporcionar resultados rápidos y precisos facilita la gestión nutricional en regiones tropicales, mejorando tanto la eficiencia alimentaria como el bienestar animal.
2. Sin embargo, la precisión de esta técnica depende en gran medida de la calidad de las calibraciones y la homogeneidad de las muestras. En contextos de alta variabilidad, como los que se encuentran en pastos tropicales, es crucial ajustar los modelos NIRS a las condiciones locales para asegurar resultados precisos y fiables. Aunque NIRS muestra alta precisión en la predicción de ciertos componentes como la proteína cruda, la precisión puede variar para otros componentes como la FDN y la FDA. Algunos estudios han indicado una correlación moderada a baja entre las predicciones de NIRS y los valores de referencia para estos componentes, lo que podría atribuirse a la complejidad de las fracciones fibrosas y la heterogeneidad de las muestras.
3. El uso de pretratamientos espectrales y técnicas estadísticas avanzadas, como la regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) y el análisis de componentes principales (PCA), ha demostrado mejorar significativamente la precisión de las predicciones por NIRS. Estos métodos permiten eliminar efectos de dispersión y optimizar la extracción de información relevante de los espectros, incrementando así la fiabilidad de los resultados.
4. La técnica NIRS ha sido aplicada con éxito en una variedad de contextos geográficos y con diferentes especies de forraje, desde pastos tropicales hasta especies de zonas templadas. Esto demuestra su versatilidad como una herramienta práctica para el control de calidad en la producción de forrajes. Su capacidad para realizar análisis rápidos y no destructivos la hace ideal para su uso en diversos sistemas agrícolas, condiciones ambientales y en entornos de laboratorio, permitiendo a los productores y técnicos tomar decisiones informadas sobre la gestión del forraje y la nutrición del ganado.

En resumen, la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) se ha establecido como una tecnología clave para la evaluación de la calidad de los forrajes. Aunque su efectividad puede depender de la calidad de las muestras y los métodos de análisis empleados, NIRS ofrece un balance óptimo entre precisión y eficiencia, consolidándose como una herramienta esencial en la agricultura moderna. A medida que la tecnología avanza, es probable que NIRS continúe jugando un papel crucial en la optimización de la nutrición animal y la investigación forrajera.

#### **5. DECLARACION DEL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL**

**Los autores declaran que no han usado herramientas de inteligencia artificial (IA) en la creación de este artículo**

#### **6. CONFLICTO DE INTERESES**

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Callejo Ramos A. (2017). *Conservación de forrajes (III): Calidad del forraje y del heno*.
- Carlos Estupiñán, M., Fernando Carcelén, C., Víctor Hidalgo, L., David Rojas, E., Oscar Vera, C., Sofía López, G., & Sandra Bezada, Q. (2021). Application of near infrared spectroscopy - NIRS - To determine the nutritional value of varieties of alfalfa (*Medicago sativa* L) and red clover (*Trifolium pretense* L). *Revista de Investigaciones Veterinarias Del Peru*, 32(1). <https://doi.org/10.15381/RIVEP.V32I1.19491>
- Cayuela, J. A., & García, J. F. (2017). Sorting olive oil based on alpha-tocopherol and total tocopherol content using near-infra-red spectroscopy (NIRS) analysis. *Journal of Food Engineering*, 202, 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.01.015>
- Craig A. Roberts, & Jerry Workman. (2017). *Near-Infrared Spectroscopy in Agriculture Agronomy Monographs* (pp. i–xxiii). <https://doi.org/10.2134/agronmonogr44.frontmatter>
- Crovetti, A., & Bozzi, R. (2018). Use of FT-NIRS for determination of chemical components and nutritional value of natural pasture. *Italian Journal of Animal Science*, 17(1), 87–91. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2017.1345659>
- Ejecutiva, D., & Ejecutiva, S. (2017). *INSTITUTO NACIONAL TECNOLÓGICO*.
- Enríquez-Quiróz Javier F, & Gutierrez Ricardo Basurto. (n.d.). ESPECTROSCOPIA DE REFLECTANCIA EN EL INFRAROJO CERCANO (NIRS) PARA ESTIMAR FRACCIONES PROTÉICAS EN PASTO *Urochloa*. 2021.
- Erika A. Hernandez, Maribel Montero-Lagunes, Javier F. Enríquez-Quiróz, Francisco I. Juárez-Lagunes, Ricardo Basurto-Gutierrez, & Ericka Ramírez-Rodríguez. (2021). *NEAR INFRARED REFLECTANCE SPECTROSCOPY (NIRS) TO ESTIMATE PROTEIN FRACTIONS IN Urochloa GRASS*. 44(4A), 781–787.
- Gaspard, P., & Burghardt, Irene. (2020). *Chemical reactions and their control on the femtosecond time scale : XXth Solvay Conference on Chemistry*. Wiley.
- Giraldo, R. A. D., De León, M. Á., Castillo, Á. R., López, O. P., Rocha, E. C., & Asprilla, W. P. (2023). Estimation of forage availability and parameters associated with the nutritional quality of *Urochloa humidicola* cv Llanero based on multispectral images. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*, 11(1), 61–74. [https://doi.org/10.17138/tgft\(11\)61-74](https://doi.org/10.17138/tgft(11)61-74)
- Guatusmal-Gelpud, C., Escobar-Pachajoa, L. D., Meneses-Buitrago, D. H., Cardona-Iglesias, J. L., & Castro-Rincón, E. (2020). Production and quality of *Tithonia diversifolia* and *Sambucus nigra* high andean colombian tropic. *Agronomía Mesoamericana*, 31(1), 193–208. <https://doi.org/10.15517/AM.V31I1.36677>
- Guimarães, I. C. da S. B., da Silva, T. H., Picchi, C. C., & Fukushima, R. S. (2023). Assessing the Repeatability and Reliability of NIRS to Predict Nutritional Values and to Evaluate Two Lignin Methods in *Urochloa* spp. Grasses. *Grasses*, 2(2), 112–126. <https://doi.org/10.3390/grasses2020010>
- Hart, L., Huguenin-Elie, O., Latsch, R., Simmler, M., Dubois, S., & Umstatter, C. (2020). Comparison of spectral reflectance-based smart farming tools and a conventional approach to determine herbage mass and grass quality on farm. *Remote Sensing*, 12(19), 1–19. <https://doi.org/10.3390/rs12193256>
- Hay and Forage. (2022). *Don't discount the accuracy of NIRS*. <https://hayandforage.com/print-article-2996-permanent.html>

- Ibáñez, L., & Alomar, D. (2018). *PREDICTION OF THE CHEMICAL COMPOSITION AND FERMENTATION PARAMETERS OF PASTURE SILAGE BY NEAR INFRARED REFLECTANCE SPECTROSCOPY (NIRS)*.
- Lic. Ortiz Daniela Alejandra. (2021). *Efecto del ambiente ruminal y la fuente de fibra sobre la dinámica de desaparición de la materia orgánica y sus componentes en bovinos en confinamiento*.
- McIntosh, D. , B. J. A.-H. R. K.-L. P. G. R. L. T. G. L. B. S. B. G. S. and C. Teutsch. (2022). *Guidelines for Optimal Use of NIRSC Forage and Feed Calibrations in Membership Laboratories ((Second Edition))*.
- Molano, M. L., Cortés, M. L., Ávila, P., Martens, S. D., & Muñoz, L. S. (2017). Ecuaciones de calibración en espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS) para predicción de parámetros nutritivos en forrajes tropicales. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*, 4(3), 139–145. [https://doi.org/10.17138/TGFT\(4\)139-145](https://doi.org/10.17138/TGFT(4)139-145)
- Monrroy, M., Gutiérrez, D., Miranda, M., Hernández, K., & Renán García, J. (2017). Determination of Brachiaria spp. forage quality by near-infrared spectroscopy and partial least squares regression. In *J. Chil. Chem. Soc* (Vol. 62, Issue 2).
- Navas-Panadero, A., Hernández-Larrota, J. D., & Velásquez-Mosquera, J. C. (2021). Production and quality of forage of Sambucus nigra in living fences, high Colombian tropics. *Agronomía Mesoamericana*, 32(2), 523–537. <https://doi.org/10.15517/am.v32i2.42862>
- Oscar Ospina, R., Héctor Anzola, V., Olber Ayala, D., Andrea Baracaldo, M., Juan Arévalo, C., & Pedro Lozada, W. (2021). Comparison between red, green and blue images and near-infrared spectroscopy methods in the neutral detergent fiber (NDF) analysis. *Revista de Investigaciones Veterinarias Del Peru*, 32(1). <https://doi.org/10.15381/RIVEP.V32I1.17498>
- Paixão, L., Carreira, E., Carmona-Cabezas, R., Nogales-Bueno, J., & Rato, A. E. (2020). Near infrared spectroscopy (NIRS) and remote sensing (RS) for estimating pasture quality in Mediterranean montado ecosystem. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(13). <https://doi.org/10.3390/app10134463>
- Parrini, S., Acciaioli, A., Crovetto, A., & Bozzi, R. (2018). Use of FT-NIRS for determination of chemical components and nutritional value of natural pasture. *Italian Journal of Animal Science*, 17(1), 87–91. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2017.1345659>
- Paz, C. C. da, Maciel e Silva, A. G., & Rêgo, A. C. do. (2019). Use of near infrared spectroscopy for the evaluation of forage for ruminants. *Revista de Ciências Agrárias*, 62. <https://doi.org/10.22491/rca.2019.2923>
- Posada-Asprilla, W., Medina-Sierra, M., & Cerón-Muñoz, M. (2019). Estimation of the quality and quantity of Kikuyo grass [*Cenchrus clandestinum* (Hochst. Ex Chiov.) Morrone] using multispectral images. *Revista U.D.C.A Actualidad and Divulgacion Cientifica*, 22(1). <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1195>
- Pullanagari, R. R., Kereszturi, G., & Yule, I. (2018). Integrating airborne hyperspectral, topographic, and soil data for estimating pasture quality using recursive feature elimination with random forest regression. *Remote Sensing*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/rs10071117>
- Risoluti, R., Gullifa, G., & Materazi, S. (2020). Assessing the Quality of Milk Using a Multicomponent Analytical Platform MicroNIR/Chemometric. *Frontiers in Chemistry*, 8. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.614718>
- Rivera, R., Maldonado, A., Rivera Rivera, A., & Manuel Alba Madonado, J. (2017). *DE ALIMENTOS PARA LA NUTRICIÓN ANIMAL NIRS FOR ANALYZING ANIMAL NUTRITION FOOD*.

- Rocateli, A., & Zhang, H. (2017). *Oklahoma Cooperative Extension Service*. <http://osufacts.okstate.edu>
- Sandra, B. Q., Teresa, A. F., Fernando, C. C., Felipe, S. M. H., Christian, L. L., Jean, R. E., Virginia, R., Oscar, E. F., Jorge, G. V., & Víctor, V. M. (2017). Prediction of chemical composition and neutral detergent fibre of Italian ryegrass (*Lolium multiflorum* lam) by near infrared spectroscopy (NIRS). *Revista de Investigaciones Veterinarias Del Peru*, 28(3), 538–548. <https://doi.org/10.15381/rivep.v28i3.13357>
- Serrano, J., Shahidian, S., da Silva, J. M., Paixão, L., Carreira, E., Carmona-Cabezas, R., Nogales-Bueno, J., & Rato, A. E. (2020). Evaluation of near infrared spectroscopy (NIRS) and remote sensing (RS) for estimating pasture quality in Mediterranean montado ecosystem. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(13). <https://doi.org/10.3390/app10134463>
- Teye, E., Amuah, C. L. Y., McGrath, T., & Elliott, C. (2019). Innovative and rapid analysis for rice authenticity using hand-held NIR spectrometry and chemometrics. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 217, 147–154. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2019.03.085>
- Véstia, J., Barroso, J. M., Ferreira, H., Gaspar, L., & Rato, A. E. (2019). Predicting calcium in grape must and base wine by FT-NIR spectroscopy. *Food Chemistry*, 276, 71–76. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.116>
- Yang, Z., Nie, G., Pan, L., Zhang, Y., Huang, L., Ma, X., & Zhang, X. (2017). Development and validation of near-infrared spectroscopy for the prediction of forage quality parameters in *Lolium multiflorum*. *PeerJ*, 2017(10). <https://doi.org/10.7717/peerj.3867>