

Determinación por FTIR de los componentes bromatológicos de *Lolium perenne* bajo esquemas de fertilización y corte en invierno y primavera

José Agustín Pacheco-Ortiz ^{1,*}, Rigoberto Castro-Rivera ¹, Gisela Aguilar-Benítez ², Brenda Yanin Azcárraga-Salinas ¹, Andres Castro-Sierra ¹, Javier Ruiz-Romero ¹

¹ Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, Instituto Politécnico Nacional, Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, México

² Instituto de Investigación de Zonas Desérticas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, San Luis Potosí, México

* Autor de correspondencia: jpacheco1902@alumno.ipn.mx

Desarrollo Sustentable (Agricultura sustentable)

Recibido: 12 de junio de 2025 Aceptado: 13 de julio de 2025 Publicado: 23 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.499>

Resumen: La composición de la pared celular en forrajes como *Lolium perenne* es determinante en su calidad nutricional, y está relacionada con la digestibilidad de la biomasa. No obstante, son escasos los estudios que analizan el efecto de la estacionalidad, la fertilización y la frecuencia de corte sobre estos componentes desde un enfoque sustentable. Este estudio se realizó en condiciones de invernadero durante invierno y primavera, utilizando un diseño en bloques completamente al azar. Se evaluaron cuatro tratamientos: Control (C), Fertilización Orgánica (FO), Mezcla orgánico-mineral (M) y Fertilización Mineral (FM), con cortes a las 4, 6 y 12 semanas. Las muestras foliares se analizaron mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para cuantificar celulosa, hemicelulosa y lignina. En invierno, FM registró 21% de lignina a las 4 semanas, mientras que la celulosa fue mayor en C (75%) a las 12 semanas. En primavera, la celulosa alcanzó 76% en FM a las 4 semanas, y la lignina se mantuvo baja (15–17%). La hemicelulosa osciló entre 9 y 12% en ambas estaciones. FTIR demostró ser una herramienta rápida y no destructiva para este análisis. Se concluye que estación, fertilización y corte influyen en la composición de la pared celular, con implicaciones para el manejo forrajero sustentable.

Palabras clave: *Lolium perenne*, Fertilización sustentable, Frecuencia de corte, Pared celular vegetal, FTIR

Determination of the FTIR-Based determination of the bromatological components of *Lolium perenne* under fertilization and harvest schemes during winter and spring

Abstract: The composition of the cell wall in forages such as *Lolium perenne* is a key factor in their nutritional quality and is closely related to biomass digestibility. However, few studies have analyzed the effects of seasonality, fertilization, and harvest frequency on these components from a sustainability-focused perspective. This study was conducted under greenhouse conditions during winter and spring, using a completely randomized block design. Four treatments were evaluated: Control (C), Organic Fertilization (FO), Organic-Mineral Mix (M), and Mineral Fertilization (FM), with harvest intervals at 4, 6, and 12 weeks. Leaf samples were analyzed using Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) to quantify cellulose, hemicellulose, and lignin. In winter, FM recorded 21% lignin at 4 weeks, while cellulose was highest in C (75%) at 12 weeks. In spring, cellulose reached 76% in FM at 4 weeks, and lignin remained low (15–17%). Hemicellulose ranged from 9 to 12% in both seasons. FTIR proved to be a fast and non-destructive tool for this analysis. It is concluded that season, fertilization, and harvest frequency influence cell wall composition, with implications for sustainable forage management.

Keywords: *Lolium perenne*, Sustainable fertilization, Harvest frequency, Plant cell wall, FTIR

Introducción

La creciente demanda de forrajes de alta calidad nutricional en sistemas ganaderos sustentables ha incrementado el interés por evaluar el impacto de las prácticas agronómicas sobre los componentes estructurales de los cultivos forrajeros. En particular, la composición de la pared celular vegetal es un factor clave que influye directamente en la digestibilidad y el valor alimenticio del forraje, ya que determina la disponibilidad de energía para los rumiantes (Castro-Hernández *et al.*, 2017). La celulosa, hemicelulosa y lignina conforman los principales constituyentes de dicha estructura, y su proporción está sujeta a variaciones estacionales, de manejo y fertilización (Cosgrove, 2018; Byrt *et al.*, 2011). *Lolium perenne* L. es una gramínea perenne de uso extensivo en regiones templadas debido a su rápida recuperación tras el corte con un elevado rendimiento que puede llegar a superar las 10-12 toneladas por hectárea de materia seca. No obstante, su composición química fluctúa en función de la estación del año y la frecuencia de aprovechamiento (Wróbel *et al.*, 2022), lo cual puede afectar la eficiencia del sistema productivo si no se considera

dentro del manejo técnico. Además, el uso exclusivo de fertilizantes químicos ha sido asociado a efectos negativos en la calidad del suelo a largo plazo, lo que ha motivado la búsqueda de estrategias integradas que incluyan fuentes orgánicas, en línea con los principios de la agricultura sustentable (Pacheco-Ortiz *et al.*, 2021).

La espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) ha emergido como una alternativa no destructiva y rápida para analizar la composición de materiales vegetales, permitiendo detectar compuestos estructurales mediante sus señales moleculares características (Casassa-Padrón *et al.*, 2022; Javier-Astete *et al.*, 2021). Aunque su uso ha sido más común en especies leñosas o granos, investigaciones recientes han demostrado su aplicabilidad en forrajes para identificar bandas espectrales específicas de celulosa, hemicelulosa y lignina (Javier-Astete *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2016).

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de distintas estrategias de fertilización (orgánica, mineral y combinada) y frecuencias de corte sobre la composición de la pared celular en *Lolium perenne*, durante las estaciones de invierno y primavera, mediante el uso de FTIR. Esta investigación aporta evidencia sobre la influencia de las prácticas de manejo sobre la calidad estructural del forraje, bajo condiciones climáticas contrastantes, contribuyendo al diseño de esquemas productivos más eficientes y sustentables. Los resultados obtenidos muestran variaciones significativas en la proporción relativa de celulosa, hemicelulosa y lignina entre estaciones, frecuencias de corte y tratamientos de fertilización, lo que permite proponer ajustes agronómicos en función de la época del año para mejorar la calidad bromatológica del forraje.

Materiales y Métodos

El presente estudio se realizó en condiciones controladas dentro de un invernadero tipo túnel, utilizando macetas con capacidad de 3 kg llenadas con suelo recolectado del Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada del Instituto Politécnico Nacional (Tlaxcala, México; coordenadas: 19°16'50" N, 98°21'58" O). El experimento se desarrolló durante las estaciones de invierno y primavera. Se empleó un diseño experimental de bloques completamente al azar con cuatro repeticiones por tratamiento, con el objetivo de evaluar el efecto de la fertilización combinada y la frecuencia de corte sobre la composición de la pared celular de *Lolium perenne* (Pacheco-Ortiz *et al.*, 2021).

Se establecieron cuatro tratamientos de fertilización: Fertilizante Orgánico (FO) aplicación de lixiviado orgánico (dilución al 25%) proporcionado por GreenForest, Mezcla (M) combinación de lixiviado (25%) con urea (50 kg/ha), Fertilización Mineral (FM) aplicación de urea (50 kg/ha), y Control (C) un tratamiento sin fertilizante se empleó solo agua. Las frecuencias de corte consideradas fueron de 4, 6 y 12 semanas, lo que permitió estudiar la dinámica estacional del crecimiento forrajero bajo diferentes estrategias de manejo agronómico. Las hojas recolectadas en cada tratamiento fueron secadas en una estufa modelo H-102 (RIOSSA) a 70 °C durante 24 horas hasta alcanzar peso constante. Posteriormente, se conservaron en un desecador por una hora para evitar la reabsorción de humedad ambiental dado por la modificación a la metodología propuesta por (Pacheco-Ortiz *et al.*, 2021).

El análisis de la composición de la pared celular se realizó mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), utilizando un espectrómetro Bruker VERTEX 70 con accesorio de reflectancia total atenuada (ATR, PIKE MIRacle), que permite análisis directo del material sin necesidad de tratamientos previos extensivos. Las mediciones espectrales se efectuaron en el rango de 4000 a 400 cm^{-1} , con una resolución de 4 cm^{-1} . Para minimizar el ruido ambiental, se adquirieron 60 espectros de fondo previos al análisis de las muestras, las cuales fueron sometidas a 120 escaneos consecutivos para obtener un espectro representativo del material forrajero (Javier-Astete *et al.*, 2021). La identificación de los componentes estructurales de la pared celular se basó en la localización de bandas infrarrojas específicas: la celulosa fue detectada en el intervalo de 1350–890 cm^{-1} , con un pico prominente en 1031 cm^{-1} correspondiente a los enlaces C–O y C–C del esqueleto de β -D-glucosa; la hemicelulosa mostró una señal característica en 1730 cm^{-1} , atribuida a los grupos carbonilo (C=O); y la lignina presentó señales entre 1580 y 1380 cm^{-1} , destacando un pico en 1375 cm^{-1} relacionado con vibraciones C–H y C–C en anillos aromáticos fenólicos (Casassa-Padrón *et al.*, 2022; Javier-Astete *et al.*, 2021).

Para asegurar la precisión y repetibilidad de los resultados, se realizaron tres mediciones por muestra, evaluando dos regiones por hoja (zona apical y basal) en tres hojas diferentes por tratamiento. Los datos espectrales obtenidos fueron procesados utilizando el software OriginPro 2024 para análisis descriptivo, comparando los efectos de la estación

(invierno y primavera), los niveles de corte (4, 6 y 12 semanas) y los tratamientos de fertilización aplicados. Los gráficos representativos se generaron con Microsoft Excel para Microsoft 365 MSO (Pacheco-Ortiz *et al.*, 2021).

Resultados y Discusión

Los análisis realizados mediante espectroscopía FTIR revelaron diferencias marcadas en la composición de la pared celular de *Lolium perenne* en función de la estación del año, el tipo de fertilización y la frecuencia de corte. Estos resultados reflejan la plasticidad de la especie ante condiciones ambientales contrastantes y prácticas de manejo agronómico diferenciadas.

Durante el invierno, se observó que FM promovió una mayor acumulación de lignina en etapas tempranas. A las 4 semanas, FM alcanzó 21% de lignina, mientras que C, FO y M se mantuvieron en 17%. Este incremento podría reflejar una respuesta adaptativa, favoreciendo la lignificación como mecanismo de protección estructural (Vanholme *et al.*, 2019). La celulosa presentó sus valores más altos 72% en C, FO y M, mientras que FM disminuyó a 68%. La hemicelulosa se mantuvo estable ~12% en todos los tratamientos. A las 6 semanas, la lignina disminuyó levemente, manteniéndose en 18% en C, FO y FM, y aumentando ligeramente a 20% en M. La celulosa se incrementó en C y FM en 74%, y fue ligeramente menor en FO en 72% y M en 70%. La hemicelulosa se estabilizó en 10% en todos los casos, sin diferencias relevantes. En el corte de 12 semanas, FO, M y FM mantuvieron la lignina en 19%, mientras que C descendió a 15%. En contraste, la celulosa alcanzó su valor máximo en C en 75%, superando a los demás tratamientos, que se mantuvieron en 71%. La hemicelulosa continuó estable en 10% en todos los tratamientos, ver Figura 1.

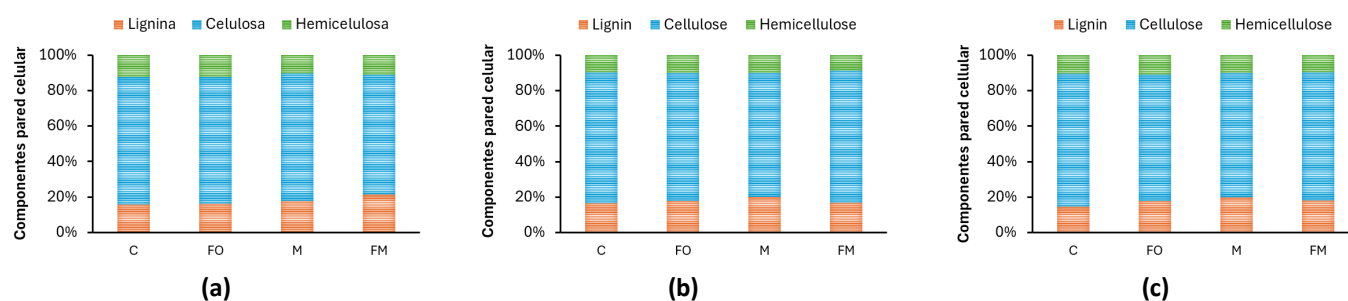


Figura 1. Composición bromatológica de la pared celular (celulosa, hemicelulosa y lignina) en la estación invierno: (a) corte 4 semanas, (b) corte 6 semanas y (c) corte 12 semanas.

En primavera, se observó una tendencia opuesta a la de invierno en los primeros cortes. A las 4 semanas, los contenidos de lignina fueron menores: 17% en C, 16% en FO y M, y 15% en FM. La celulosa, en cambio, alcanzó su máximo en FM en 76%, seguida de FO y M en 75% y C en 74%. La hemicelulosa se mantuvo en 10% en todos los tratamientos, salvo en FO, donde disminuyó a 9%. A las 6 semanas, FM presentó el valor más alto de lignina en 19%, mientras que los demás tratamientos se mantuvieron en 17%. La celulosa fue mayor en FO y M en 75%, y menor en FM y C en 72%. La hemicelulosa se mantuvo en ~10%. En el corte de 12 semanas, FO mostró el mayor contenido de lignina en 19%, seguido de M y FM en 18% y C en 17%. La celulosa fue más alta en C en 73% y descendió ligeramente en FO y M en 70%, y en FM en 71%. La hemicelulosa alcanzó su máximo en M en 12% y se mantuvo en 11% en los demás tratamientos, ver Figura 2.

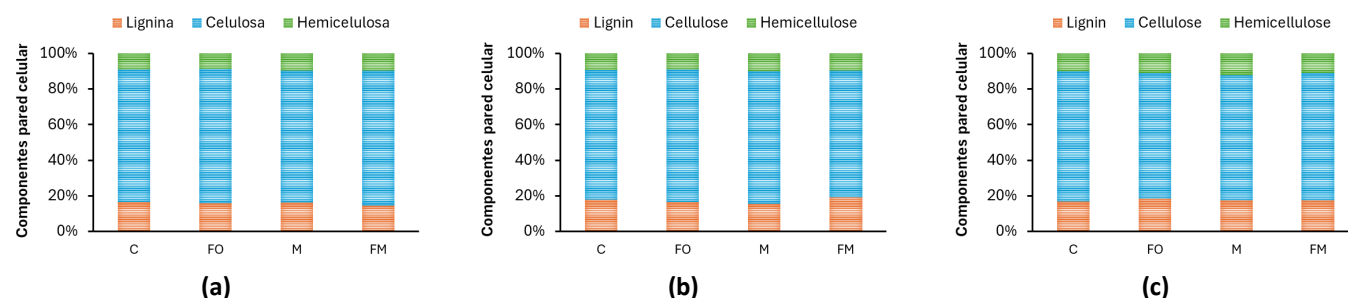


Figura 2. Composición bromatológica de la pared celular (celulosa, hemicelulosa y lignina) en la estación primavera: (a) corte 4 semanas, (b) corte 6 semanas y (c) corte 12 semanas.

Comparando ambas estaciones, los niveles de lignina fueron similares en cortes de 4 y 6 semanas en 17%, pero aumentaron a 18–19% en los cortes de 12 semanas en FO, M y FM. La celulosa fue más alta en FM durante invierno en 75% a las 6 semanas y primavera en 76% a las 4 semanas. C y FO se mantuvieron consistentes en 74% en ambas estaciones, mientras que M presentó reducciones notables alcanzando valores de alrededor del 70% en invierno y primavera. La hemicelulosa mostró poca variabilidad en 9–12%, siendo más estable que los otros componentes (Pauly *et al.*, 2019). Se incrementó ligeramente en primavera, alcanzando su valor máximo en M en 12%, lo cual podría estar relacionado con un equilibrio estructural frente a cambios estacionales. Estos resultados concuerdan con trabajos de Hernández-Álvarez *et al.*, (2024) que señalan que la lignina se incrementa con la madurez del forraje, Undersander y Sharpe (2025) señaló mientras que la celulosa es más abundante en fases activas de crecimiento. Además, el tipo de fertilización influye en la dinámica de crecimiento y en la composición bromatológica del tejido vegetal.

Conclusiones

El presente estudio evidenció que la composición de la pared celular de *Lolium perenne* se ve influenciada por la estación del año, la frecuencia de corte y el tipo de fertilización aplicada. En invierno, los tratamientos con fertilización mineral (FM) presentaron los mayores contenidos de lignina, especialmente en etapas tempranas del desarrollo. En contraste, durante la primavera, se observó un incremento en el contenido de celulosa, alcanzando su valor máximo en FM a las 4 semanas de corte, mientras que la lignina se mantuvo en niveles más bajos. La hemicelulosa mostró una variabilidad mínima entre tratamientos y estaciones, oscilando entre 9 y 12%. Estos resultados confirman que el manejo agronómico influye directamente en la calidad estructural del forraje. Además, la espectroscopía FTIR se consolidó como una herramienta eficaz y sustentable para el análisis no destructivo de los componentes de la pared celular, permitiendo generar información valiosa para optimizar el manejo forrajero bajo criterios de sostenibilidad.

Agradecimientos y financiamiento: Se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) de la Ciudad de México por el apoyo otorgado mediante la beca para estudios de posgrado con CVU 1012255. Asimismo, al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo brindado por el proyecto SIP 20250022 “Rendimiento de gramíneas a diferentes estrategias de defoliación y fertilización orgánico-mineral”, al cual se reconoce por el respaldo académico.

Bibliografía

- Byrt, C. S., Grof, C. P., & Furbank, R. T. (2011). C4 plants as biofuel feedstocks: Optimising biomass production and feedstock quality from a lignocellulosic perspective. *Journal of Integrative Plant Biology*, 53(2), 120–13. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2010.01023.x>
- Casassa-Padrón, A., Portillo, E., & González, C. (2022). FTIR-ATR for the identification of *Psidium guajava* plants infested with *Meloidogyne enterolobii*. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 39(3), e223937. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/38555>
- Castro-Hernández, H., Domínguez-Vara, I. A., Morales-Almaráz, E., & Huerta-Bravo, M. (2017). Composición química, contenido mineral y digestibilidad in vitro de raigrás (*Lolium perenne*) según intervalo de corte y época de crecimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 8(2), 201–210. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v8i2.4445>
- Cosgrove, D. J. (2018). Diffuse growth of plant cell walls. *Plant Physiology*, 176(1), 16–27. <https://doi.org/10.1104/pp.17.01541>
- Hernández-Álvarez, U. M., López-Colomba, E., Bollati, G. P., Carloni, E. J., Reutemann, A. G., & Grunberg, K. A. (2024). Effects of leaf and stem maturation on nutritional value in *Megathyrus maximus*. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(5), 2937–2946. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13186>
- Javier-Astete, R., Jimenez-Davalos, J., & Zolla, G. (2021). Determination of hemicellulose, cellulose, holocellulose and lignin content using FTIR in *Calycophyllum spruceanum* (Benth.) K. Schum. and *Guazuma crinita* Lam. *PLOS ONE*, 16(10), e0256559. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256559>
- Li, M., Pu, Y., & Ragauskas, A. J. (2016). Current understanding of the correlation of lignin structure with biomass recalcitrance. *Frontiers in Chemistry*, 4(45), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fchem.2016.00045>
- Pacheco-Ortiz, J. A., Castro-Rivera, R., Solís-Oba, M. M., Juárez-Rangel, A. P., & Romero-Rodríguez, A. (2021). Evaluación de la fertilización orgánica y frecuencias de corte en el rendimiento de ballico perenne. *Mexicana de Agroecosistemas*, 8(1), 100–108. <https://revistaremaeivto.mx/index.php/remae/article/view/189>
- Pauly, M., Gille, S., & Liu, L. (2019). Hemicellulose biosynthesis. *Planta*, 250(2), 395–412. <https://doi.org/10.1007/s00425-013-1921-1>
- Undersander, D. J., & Sharpe, P. (2025). Chapter 1 – Forage plant structure, function, nutrition and growth. En P. H. Sharpe (Ed.), *Horse Pasture Management* (2.ª ed., pp. 1–10). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95084-8.00013-6>
- Vanholme, R., De Meester, B., Ralph, J., & Boerjan, W. (2019). Lignin biosynthesis and its integration into metabolism. *Current Opinion in Biotechnology*, 56, 230–239. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.02.018>
- Wróbel, B., Zielewicz, W., Paszkiewicz-Jasińska, A., Spychalski, B., & Jakubowska, Z. (2022). Effect of harvest date on structural carbohydrates and lignin content in meadow sward in different pluvio-thermal conditions. *Journal of Water and Land Development*, 55, 60–66. <https://www.jwld.pl/files/2022-04-JWLD-07.pdf>