

Efecto de la carbonización de lanas Corriedale y Criolla, sobre la estabilidad térmica y la degradación molecular, evaluadas mediante FTIR

Luana F. Hohemberger¹, Pamela C. Ladwig², Raisi N. L. Baldez², Carlomagno Gonzalez², Rafael Scheer², and Luis E. G. Armas¹

¹ Universidade Federal do Pampa-Campus Alegrete, Av. Tiarajú 810 Bairro Ibirapuitã, Alegrete- RS, Brazil

² Research Group in Logistics, Technology and Sustainability (LOTES), Northern Regional Technological Institute, Universidad Tecnológica del Uruguay, Rivera, Rivera, Uruguay

Recibido el 13 de junio de 2026. Aprobado el 11 de julio de 2026. Publicado el 11 de julio de 2026.

Resumen

La lana ovina representa un recurso abundante en Brasil, especialmente en el estado de Rio Grande do Sul, donde coexisten distintas razas con características estructurales capaces de influir en su comportamiento térmico. Considerando la relevancia tecnológica de esta biomasa y el creciente interés por comprender su estabilidad molecular, este estudio investigó los efectos de la raza y del tratamiento térmico sobre la degradación estructural de fibras de lana Corriedale y Criolla. Las muestras fueron sometidas a procesos controlados de carbonización a 300, 400 y 500 °C durante 60 minutos bajo condiciones experimentales estandarizadas. La caracterización molecular se realizó mediante Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR), con el objetivo de evaluar las modificaciones en las bandas características de la queratina y en los grupos funcionales sensibles al calor. Los resultados evidenciaron que el incremento de la temperatura intensificó las transformaciones químicas de la estructura proteica. Estas transformaciones se reflejaron en la disminución progresiva de las bandas asociadas a los grupos O–H y N–H. Asimismo, se observó una reducción en la intensidad de la amida II, indicando una degradación avanzada de la queratina. Aunque ambas razas siguieron el patrón típico de degradación térmica de materiales queratinosos, se identificaron diferencias en su comportamiento. La lana Criolla presentó una respuesta diferenciada a 500 °C. En esta condición, se generó un residuo más compacto. Dicho residuo presentó brillo superficial característico. También se observó un aspecto vítreo en comparación con la lana Corriedale. Estas características dificultaron significativamente su tamizado en malla 200. Los resultados sugieren que las diferencias estructurales intrínsecas entre razas influyen en la evolución térmica del material. En particular, estas diferencias afectan tanto la evolución química como la morfológica durante la carbonización. Esto evidencia la importancia del componente genético en el comportamiento termoquímico de la lana ovina.

Descriptores: Lana ovina; Estabilidad térmica; Espectroscopía FTIR; Degradación molecular; Biomateriales sostenibles

Abstract

Sheep wool represents an abundant resource in Brazil, especially in the state of Rio Grande do Sul, where different breeds coexist with structural characteristics capable of influencing their thermal behavior. Considering the technological relevance of this biomass and the growing interest in understanding its molecular stability, this study investigated the effects of breed and thermal treatment on the structural degradation of Corriedale and Criolla wool fibers. The samples were subjected to controlled carbonization processes at 300, 400, and 500 °C for 60 minutes under standardized experimental conditions. Molecular characterization was performed using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), with the aim of evaluating changes in the characteristic bands of keratin and in heat-sensitive functional groups. The results showed that increasing temperature intensified the chemical transformations of the protein structure. These transformations were reflected in the progressive decrease of bands associated with O–H/N–H groups. Likewise, a reduction in the intensity of amide II was observed, indicating advanced keratin degradation. Although both breeds followed the typical thermal

degradation pattern of keratinous materials, differences in their behavior were identified. Criolla wool exhibited a distinct response at 500 °C. Under this condition, a more compact residue was formed. This residue displayed a characteristic surface gloss. A glassy appearance was also observed compared to Corriedale wool. These characteristics significantly hindered its sieving through a 200-mesh screen. The results suggest that intrinsic structural differences between breeds influence the thermal evolution of the material. In particular, these differences affect both the chemical and morphological evolution during carbonization. This highlights the importance of genetic factors in the thermo-chemical behavior of sheep wool.

Keywords: *Sheep wool; Thermal stability; FTIR spectroscopy; Molecular degradation; Sustainable biomaterials*

1. Introducción

La lana ovina es considerada una de las fibras naturales de origen proteico más antiguas utilizadas por el ser humano y ha mantenido su relevancia a lo largo de la historia. Aunque el algodón es la fibra natural más consumida a nivel mundial, la lana destaca por sus propiedades físicas y estructurales. Características como el volumen, la elasticidad y el rizado natural favorecen la retención de aire entre las fibras [1]. Actualmente, el desarrollo sostenible ha cobrado creciente importancia en el procesamiento de la lana ovina, promoviendo métodos de limpieza que consumen menos energía, generan menos contaminantes y resultan más respetuosos con el medio ambiente [2]. Las fibras naturales han despertado un interés cada vez mayor en la investigación en ciencia de materiales, incluyendo sectores relacionados con la energía. Comprender la composición química de estas fibras es fundamental, ya que su estructura influye directamente en sus propiedades mecánicas y funcionales [3]. Los estudios demuestran que las características productivas y estructurales de la lana ovina varían significativamente entre diferentes razas, evidenciando que los rasgos asociados a la lana presentan correlaciones genéticas distintas entre grupos raciales [4]. Asimismo, diversos autores destacan que los factores de raza y linaje influyen directamente en el desempeño y las propiedades de la fibra, confirmando que el patrón racial no es uniforme entre las distintas razas ovinas [5]. Estas observaciones son respaldadas por [6-8], quienes demostraron diferencias morfológicas consistentes entre diversas razas ovinas, especialmente en lo referente al diámetro de las fibras. La lana Merino presenta diámetros comprendidos entre 15 y 23 μm , mientras que la raza Texel posee fibras de 27 a 30 μm y la raza Corriedale presenta diámetros entre 26,5 y 29 μm . Por su parte, la raza Criolla se caracteriza por una mayor heterogeneidad en los valores de diámetro. En conjunto, estas referencias evidencian de manera inequívoca la existencia de diferencias morfológicas marcadas entre las razas ovinas,

reforzando la necesidad de considerar dichas variaciones en los análisis comparativos de biomasa. En este contexto, los estudios [9-12] investigaron específicamente el potencial de la lana ovina como medio filtrante, demostrando su eficacia en la captura de contaminantes y reforzando el creciente interés en su utilización en tecnologías ambientales. Estos hallazgos corroboran la versatilidad funcional de la fibra ovina y ponen de manifiesto su valor como material sostenible para aplicaciones de purificación y tratamiento. Por otra parte, los autores [13, 14] investigaron recientemente el potencial de la lana ovina como material aislante térmico, especialmente debido a sus propiedades naturales de baja conductividad térmica, biodegradabilidad y elevado desempeño ambiental. Al realizar una evaluación comparativa de diferentes materiales aislantes, demostraron que la lana ovina presenta un rendimiento altamente competitivo frente a alternativas convencionales y materiales de origen vegetal. En este contexto, la caracterización molecular mediante FTIR constituye una herramienta importante para evaluar los efectos de los tratamientos térmicos sobre la lana ovina de las razas Corriedale y Criolla. Esta técnica permite identificar cambios asociados a la degradación de la queratina y comprender la influencia de las variaciones genéticas en la estabilidad térmica de las fibras, aportando información relevante para el desarrollo de biomateriales y aplicaciones tecnológicas sostenibles.

2. Metodología

Las biomasas utilizadas en este estudio fueron obtenidas a partir de lana ovina de las razas Corriedale y Criolla, recolectadas en el municipio de Alegrete, Rio Grande do Sul, Brasil. Inicialmente, las fibras fueron sometidas a un proceso de triple lavado para la eliminación de impurezas, grasa residual y material particulado presente en la superficie. Posteriormente, las muestras limpias fueron sometidas a procesos controlados de carbonización a temperaturas de 300 °C, 400 °C y 500 °C durante 60 minutos en horno mufla,

obteniéndose las cenizas utilizadas para la caracterización espectroscópica. Los espectros de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) se obtuvieron utilizando un espectrofotómetro JASCO FT/IR-6600. Las muestras de ceniza previamente identificadas fueron analizadas en el intervalo espectral de 400 a 4000 cm^{-1} , con una resolución de 4 cm^{-1} . Antes del procesamiento de los datos, todos los espectros fueron sometidos a corrección de línea base con el fin de mejorar la calidad de las señales obtenidas. La caracterización molecular permitió evaluar las modificaciones estructurales asociadas a la degradación térmica de la queratina, así como los cambios en enlaces peptídicos y grupos funcionales sensibles al calor. Asimismo, los espectros obtenidos fueron comparados entre las diferentes razas con el objetivo de identificar posibles diferencias en la estabilidad térmica y en el comportamiento molecular de las fibras durante el proceso de carbonización.

3. Resultados

Las biomásas utilizadas en este estudio procedieron del proceso de esquila de ovinos de las razas Corriedale y Criolla, recolectadas en el municipio de Alegrete, Rio Grande do Sul, Brasil. Previamente a los tratamientos térmicos, las fibras fueron sometidas a un proceso de acondicionamiento que incluyó limpieza manual, separación de impurezas y lavado por triplicado con agua caliente y detergente líquido, con el fin de eliminar residuos superficiales que pudieran interferir en las etapas posteriores de caracterización. Posteriormente, las muestras fueron secadas al aire libre hasta alcanzar un estado completamente seco y sometidas al proceso de cardado. Una vez acondicionadas, las lanas fueron carbonizadas a 300, 400 y 500 $^{\circ}\text{C}$, con el objetivo de evaluar el efecto del tratamiento térmico sobre la estabilidad térmica y la degradación molecular de las fibras mediante espectroscopía FTIR. Las fibras brutas en estado natural pueden observarse en la Figura 1.



Figura 1: Biomásas estudiadas: a) lana de la raza Criolla, b) lana de la raza Corriedale

Se optó por presentar únicamente las micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) de la raza Criolla Figura 2, debido a que esta mostró las características más distintivas y científicamente relevantes del presente estudio. Las fibras presentaron diámetros comprendidos entre 28 y 29 μm y la típica morfología escamosa de la cutícula de la lana. Mientras que la lana Corriedale presentó diámetros acordes con los reportados previamente en la literatura, la raza Criolla evidenció particularidades morfológicas asociadas a un comportamiento térmico diferenciado durante la carbonización, justificando así una caracterización microestructural más detallada.



Figura 2: Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da fibra de lã in natura da raça Crioula, utilizada para avaliação do diâmetro da fibra.

Las biomásas de lana Corriedale y Criolla presentaron comportamientos morfológicos distintos después de la carbonización. En la raza Corriedale se obtuvo una ceniza más compacta, aunque sin evidencias visibles de sinterización, independientemente de la temperatura aplicada. El comportamiento más destacado se registró en la muestra Criolla. Mientras que a 300 $^{\circ}\text{C}$ y 400 $^{\circ}\text{C}$ la morfología observada fue similar a la de la lana Corriedale, a 500 $^{\circ}\text{C}$ se obtuvo un residuo con mayor brillo superficial, apariencia más compacta y una marcada dificultad de tamizado en malla 200. Este fenómeno, claramente observable en las imágenes presentadas en la Figura 3, sugiere una reorganización estructural más intensa durante el proceso de degradación térmica. Resultados semejantes fueron descritos por [15], quienes señalaron que el incremento de la temperatura durante la pirólisis de materiales queratinosos

favorece transformaciones progresivas en la estructura del residuo sólido. Los hallazgos del presente estudio sugieren, además, que características intrínsecas asociadas a la raza pueden influir en la respuesta morfológica de la biomasa frente al tratamiento térmico. Significativas en residuos de lana sometidos a diferentes condiciones térmicas. Estos hallazgos son consistentes con el comportamiento observado en la lana Criolla y refuerzan la interpretación de que el aumento de la temperatura intensifica progresivamente los procesos de degradación y transformación estructural de la biomasa analizada.

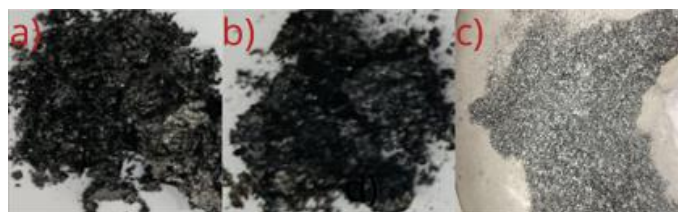


Figura 3: Ceniza de biomasa de lana Criolla obtenida tras tratamientos térmicos a: a) 300 °C, b) 400 °C y c) 500 °C.

La evolución térmica observada en los espectros FTIR de las cenizas derivadas de las lanas Corriedale y Criolla se presenta en la Figura 4. La Figura 4a muestra los espectros correspondientes a la lana Criolla sometida a tratamientos térmicos de 300, 400 y 500 °C, mientras que la Figura 4b presenta los espectros obtenidos para la lana Corriedale bajo las mismas condiciones experimentales. El análisis comparativo de estos espectros permitió evaluar las modificaciones estructurales asociadas al incremento de la temperatura y las diferencias en el comportamiento térmico entre ambas razas. Mostró una fuerte concordancia con los mecanismos de degradación de la queratina descritos en la literatura. Según [15], la pirólisis de residuos queratinosos promueve la ruptura progresiva de las cadenas proteicas y la formación de estructuras carbonosas más estables. De manera similar, en el presente estudio se observó una disminución de las bandas asociadas a los grupos O–H y N–H ($\sim 3200\text{--}3235\text{ cm}^{-1}$) y de la región correspondiente a la amida II ($\sim 1584\text{--}1590\text{ cm}^{-1}$), evidenciando la ruptura de enlaces peptídicos y la pérdida gradual de grupos nitrogenados estructurales de la queratina. Estas asignaciones son consistentes con las características estructurales descritas para fibras de lana por Li et al. [16], Sun et al. [17] y Jiang et al. [18]. La elevada intensidad de la banda situada alrededor de $3200\text{--}3235\text{ cm}^{-1}$ en las muestras tratadas a 300 °C indica una preservación parcial de la estructura proteica y la presencia residual de

agua estructural. A medida que la temperatura aumentó a 400 °C y 500 °C, se observó una reducción progresiva de dicha banda, sugiriendo la deshidratación de la matriz proteica y la degradación de las cadenas polipeptídicas. La disminución de las bandas C–H alifáticas ($\sim 2938\text{ cm}^{-1}$), observada principalmente en la lana Corriedale, refuerza la influencia del tratamiento térmico sobre la descomposición de las cadenas laterales orgánicas, en concordancia con los hallazgos reportados por [15]. La banda localizada alrededor de 2355 cm^{-1} , más evidente en la muestra Criolla, podría estar asociada a la liberación de CO_2 durante la degradación térmica [15]. Por otra parte, las señales detectadas en $\sim 1930\text{ cm}^{-1}$ y $\sim 2116\text{--}2120\text{ cm}^{-1}$ podrían corresponder a especies intermedias generadas durante la carbonización de la queratina. Las bandas observadas en $\sim 1230\text{ cm}^{-1}$ (Criolla) y $\sim 1112\text{ cm}^{-1}$ (Corriedale) pueden asociarse a vibraciones C–N y C–O remanentes de la matriz proteica, mientras que la señal en $\sim 748\text{ cm}^{-1}$ podría estar relacionada con deformaciones fuera del plano de estructuras aromáticas formadas durante el proceso de carbonización. Además, la lana Criolla carbonizada a 500 °C presentó un residuo más compacto, con brillo superficial y aspecto vítreo, lo que dificultó significativamente su tamizado en malla 200. Este comportamiento sugiere una reorganización estructural más intensa durante la carbonización y pone de manifiesto que características intrínsecas asociadas a la raza pueden influir en la respuesta térmica de la biomasa. En conjunto, estos resultados confirman los patrones típicos de descomposición de proteínas fibrosas y contribuyen a cubrir la escasez de estudios comparativos sobre la carbonización de lanas ovinas de diferentes orígenes.

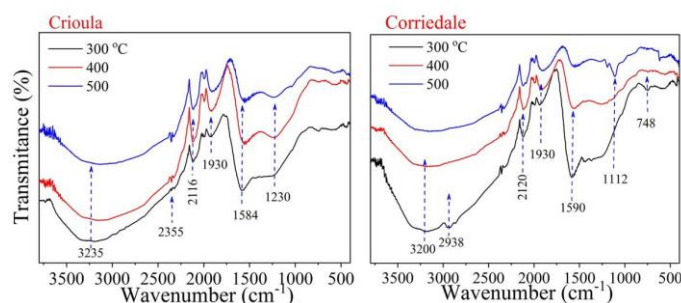


Figura 4: Comparación entre los espectros FTIR de: (a) lana ovina Criolla y (b) lana ovina Corriedale carbonizadas a 300, 400 y 500 °C;

4. Conclusiones

Los espectros FTIR evidenciaron que el incremento de la temperatura de carbonización promovió una

reducción progresiva de las bandas características de la queratina, especialmente aquellas asociadas a las vibraciones de estiramiento de los grupos O–H y N–H ($\approx 3200\text{--}3235\text{ cm}^{-1}$), a las bandas de amida II ($\approx 1584\text{--}1590\text{ cm}^{-1}$) y a los grupos C–H alifáticos ($\approx 2938\text{ cm}^{-1}$), confirmando la ruptura de enlaces peptídicos, la deshidratación de la matriz proteica y la pérdida gradual de la organización estructural de la proteína. Aunque ambas razas siguieron el patrón típico de degradación térmica descrito para biomateriales queratinosos, la lana Criolla presentó las transformaciones morfológicas más pronunciadas a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, desarrollando un residuo compacto y de aspecto vítreo que sugiere una reorganización estructural más intensa durante la carbonización. En conjunto, estos resultados indican que las características intrínsecas de cada raza influyen en la evolución química y morfológica del material, evidenciando que la selección de la biomasa constituye un factor relevante para su valorización tecnológica. Asimismo, el presente estudio contribuye a cubrir una laguna existente en la literatura relacionada con la escasez de investigaciones comparativas sobre la respuesta térmica de lanas ovinas de diferentes razas sometidas a condiciones controladas de carbonización, aportando bases científicas para el desarrollo de biomateriales sostenibles y otras aplicaciones tecnológicas basadas en recursos renovables.

Agradecimientos

Los autores agradecen al equipo del Laboratorio de Ciencias e Ingeniería de Materiales de UTEC por el apoyo técnico, la colaboración y la infraestructura que hicieron posible la realización de los ensayos experimentales presentados en este trabajo.

Referencias

- [1] H. Rajabinejad, I. L. Bucișcanu, S. S. Maier. *Environmental Engineering and Management Journal* 18 (2019), 7, 1439–1456.
- [2] F.A. Allafi, M.S. Hossain, M. Shaah, J. Lalung, M.O. Ab Kadir y M.I. Ahmad, *J. Nat. Fibers* 19 (2022) 8669–8687.
- [3] Z. Ali, F.N. Talpur, H.I. Afridi, F. Ahmed, N.A. Brohi y H. Abbasi, *Spectrochim. Acta A* 326 (2025) 125164.
- [4] E. Safari, N.M. Fogarty, A.R. Gilmour, K.D. Atkins, S.I. Mortimer, A.A. Swan, F.D. Brien, J.C. Greeff y J.H.J. Van Der Werf, *J. Anim. Breed. Genet.* 124 (2007) 65–72.
- [5] R. Lewer, R. Woolaston y R. Howe, *Aust. J. Agric. Res.* 43 (1992) 1381–1397.
- [6] D. Sacchero, Informe de Investigación INTA (2012)
- [7] ARCO–Associação Brasileira de Criadores de Ovinos, Padrões Raciais – Corriedale (2016)
- [8] P. Theron, T. Brand, S.W.P. Cloete et al., *Trop. Anim. Health Prod.* 56 (2024) 47.
- [9] B.C. Condurache, C. Cojocaru, A. Bargañ, P. Samoila y V. Harabagiu, *Materials* 17 (2024) 790.
- [10] A. Abbas, A.G. Ciufu, O.C. Parvulescu, T. Dobre y C. Raducanu, *Rev. Chim.* 69 (2018) 2585–2587.
- [11] F. Allafi, M.S. Hossain, J. Lalung, M. Shaah, A. Salehabadi, M.I. Ahmad y A. Shadi, *J. Nat. Fibers* 19 (2022) 497–512.
- [12] L.F. Hohemberger, A. Gindri Salbego, F.A. Reitz Cardoso y L.E.G. Armas, *Sep. Purif. Technol.* 393 (2026) 137129.
- [13] A. Ulutaş, F. Baló y A. Topal, *Polymers* 15 (2023) 1500.
- [14] S. Vaitkus, S. Vėjelis, V. Skulskis, A. Kremensas y A. Kairytė, *Materials* 17 (2024) 3339.
- [15] I. Spiridon Brebu, *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 91 (2011) 288–295.
- [16] B. Li, J. Yao, J. Niu, J. Liu, L. Wang, M. Feng y Y. Sun, *Polymers* 10 (2018) 1318.
- [17] M. Sun, M. Chen, S. Li, C. Dai y Y. Chen, *J. Nat. Fibers* 20 (2023) 2160405.
- [18] Z. Jiang, W. Li, Y. Wang y Q. Wang, *AATCC J. Res.* 9 (2022) 43–48.