

Desarrollo de calibraciones para predecir Finura Media en vellones de llama (Lama glama) con Espectroscopía de Infrarrojo Cercano

Development of calibrations to predict Mean Fineness in llama (Lama glama) fleeces with Near Infrared Spectroscopy

Presentación: 04 y 05 de Octubre de 2022

Doctorando/a: (el que corresponda)

José Amorena

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) – Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)
Estación Experimental Agropecuaria Sumalao, Catamarca, Argentina

Amorena.jose@inta.gob.ar

Director/a:

Elvira Fernández de Ahumada

Codirector/a: (si corresponde)

Dolores María Eugenia Álvarez

Resumen

La fibra de llama tiene el potencial para convertirse en el recurso textil más valioso de la región de la Puna Argentina. Se evaluó la capacidad de la tecnología NIRS para predecir Finura Media de fibra de llama. Se realizaron análisis en 169 muestras cardadas y no cardadas combinadas con técnicas de preprocesamiento espectral en los rangos Vis-NIR. El preprocesamiento espectral consistió en la selección de longitudes de onda, así como en pretratamientos multiplicativos y derivativos. Para los modelos predictivos se utilizó la regresión de mínimos cuadrados parciales modificados. La predictibilidad se evaluó mediante el Coeficiente de Determinación (R^2), Error Estándar de Validación Cruzada (SECV), Error de Validación Externa (SEV) y Valor Predictivo Residual (RPD). El mejor modelo se obtuvo aplicando primera derivada ($R^2=0,67$; $SECV=1,965$; $SEV=2,235$ y $RPD=1,91$). El ANOVA mostró diferencias entre tratamientos. Los modelos obtenidos podrían ser utilizados en programas de selección genética.

Palabras clave: NIRS, infrarrojo cercano, llama, fibras textiles

Abstract

Llama fiber has the potential to become the most valuable textile resource in the Puna region of Argentina. The ability of NIRS technology to predict average fineness of llama fiber was evaluated. Analyses were performed on 169 carded and non-carded samples combined with spectral preprocessing techniques in the Vis-NIR ranges. Spectral preprocessing consisted of wavelength selection, as well as multiplicative and derivative pretreatments. Modified partial least squares regression was used for predictive models. Predictability was evaluated by Coefficient of Determination (R^2), Standard Error of Cross Validation (SECV), Standard Error of External Validation (SEV) and Residual Predictive Value (RPD). The best model was obtained by applying the first derivative ($R^2=0.67$; $SECV=1.965$; $SEV=2.235$ and $RPD=1.91$). ANOVA showed differences between treatments. The models obtained could be used in genetic selection programs.

Keywords: NIRS, near infrared, llama, textile fibers

Introducción

La región Puneña en Argentina se extiende desde Jujuy a Catamarca, y se caracteriza por su altitud, accidentada geografía y condiciones climáticas extremas. En este ambiente hostil, la fibra de llama se perfila como una prometedora alternativa de producción en la industria de fibras especiales por sus características textiles y su producción sostenible (Mueller et al., 2015). Las fibras animales en general presentan un perfil complejo y heterogéneo debido, entre otras cosas, a su composición fisicoquímica, como las estructuras de queratina; morfología; conformación del vellón y la presencia de partículas extrañas como restos vegetales, polvo, arena, etc. La industria textil utiliza numerosos métodos para el acondicionamiento de las fibras y el cardado de las fibras se considera esencial en este proceso, ya que sirve para limpiar, desenredar y homogeneizar los vellones (Brodthmann et al., 2017). En el proceso textil se cuantifican varios parámetros de calidad, entre los cuales el más importante es la Finura Media de la fibra (FM) (Adot & Frank, 2015). Esta característica, normalmente expresada en micrómetros (μm) y es el principal criterio para determinar el precio, rendimiento y uso final en la mayoría de las fibras animales (Canaza-Cayo et al., 2013). El Microscopio de Proyección; Airflow; LaserScan y Optical Fibre Diameter Analyser (OFDA) son los métodos más empleados para medir FM (Sommerville, 2007). Sin embargo, algunos de estos métodos son contaminantes, lentos, destruyen la muestra y requieren una formación previa del usuario (Cottle & Baxter, 2015). A lo largo de los años, la Espectroscopía de Reflectancia en el Infrarrojo Cercano (NIRS) se ha convertido en uno de los métodos más utilizados para la evaluación de la calidad en el sector agrícola. La espectroscopía NIR es una técnica rápida, de bajo coste y sostenible que permite el análisis de múltiples parámetros de forma simultánea con una mínima preparación de la muestra. Su funcionamiento se basa en la interacción de la luz con la muestra a analizar, de la que se obtiene una curva o espectro que representa la composición química del material analizado. Los espectros obtenidos se correlacionan mediante métodos de regresión con sus correspondientes datos obtenidos por métodos de análisis convencional (datos de referencia) en un procedimiento conocido como calibración o desarrollo de modelos de predicción. El desempeño del modelo se evalúa a través de variables estadísticas como el Coeficiente de Determinación (R^2), los Errores de Validación Cruzada y Validación Externa (SECV y SEV) y el Valor Predictivo Residual (RPD), que permiten orientar sobre las posibles aplicaciones prácticas de cualquier modelo dado (Fearn, 2002). Cuando se analiza una muestra de fibra mediante espectroscopía, el efecto de dispersión de la luz o scattering es uno de los problemas más recurrentes, por lo que se obtiene una baja repetibilidad espectral. Esto conlleva inconvenientes a la hora de desarrollar modelos de predicción precisos. Para eliminar la variabilidad causada por la dispersión, se suelen aplicar técnicas de preprocesamiento espectral que implican la selección de longitudes de onda y tratamientos matemáticos. El objetivo de este estudio es evaluar la viabilidad de la espectroscopía NIR para desarrollar modelos predictivos en la FM de muestras de fibra de llama. Para ello, se realizaron análisis usando conjuntos de muestras cardadas y no cardadas en combinación con técnicas de preprocesamiento. El rendimiento de los modelos se evaluó por medio de las variables estadísticas de predicción.

Desarrollo

Se recolectaron 169 muestras de llama en 3 sitios de la Puna de la provincia de Catamarca: Antofagasta de la Sierra, Laguna Blanca y Santa María. Una porción de cada muestra fue enviada al Laboratorio de Fibras Textiles de la Estación Experimental INTA en Bariloche donde fueron analizadas con el instrumento OFDA 2000 para la adquisición de los datos de referencia (Sommerville, 2007). Los parámetros evaluados fueron Finura Media (FM); Desviación Estándar de la FM (DS), ambos valores expresados en μm ; Coeficiente de Variación de la FM (CV), y Factor de Confort (CF), parámetro que indica el porcentaje de fibras menores e iguales a $30 \mu\text{m}$ (Cervantes et al., 2010). Las muestras se colocaron en una cubeta circular y se escanearon con un espectrómetro NIRS DS2500 (FOSS Analytical Systems, Nils Foss Alé 1, Hillerød, Dinamarca) en los rangos espectrales visible (400 nm a 780 nm) e infrarrojo cercano (780 nm a 2500 nm), en un intervalo de 0,5 nm (4200 puntos de datos). Se tomaron tres espectros de cada muestra utilizando el método de reposición de muestra o repack (Gishen & Cozzolino, 2007). Se utilizó un

espectro promedio de las tres mediciones para su posterior procesamiento espectral. Los espectros se recogieron mediante el software ISIScan Nova y Mosaic (FOSS A/S, Nils Foss Alé 1, Hillerød, Dinamarca) y se almacenaron como unidades de absorbancia ($A=\log_1/R$), donde R corresponde a la energía reflejada (Alarcón Buhofer, 2012). El proceso de cardado se realizó con un cepillo especial para desenredar, paralelizar y homogeneizar las fibras. En el mismo proceso también se retiró el polvo, arena, restos vegetales y otros contaminantes que pudiera tener el vellón (E. Frank et al., 2012). Se conformaron dos conjuntos: el de Control, compuesto por los espectros de las muestras sin cardar y el de Cardado cuyos espectros correspondían a las mismas muestras bajo el tratamiento de cardado. Un espectro está compuesto por una serie de puntos que se correlacionan con la absorción de los enlaces moleculares a lo largo de todo el rango de longitudes de onda. En algunos casos, no todos los puntos son igual de importantes para el modelado por lo que la selección de uno o más segmentos de estos datos permite un mejor desempeño del modelo predictivo. Por ello se utilizaron tres conjuntos de datos con diferentes rangos espectrales:

- Rango completo Vis-NIR: de 400nm a 2500nm (4200 puntos de datos).
- Rango NIR: de 1100nm a 2500nm (2800 puntos de datos). La región visible y una sección del NIR de los espectros se descartaron debido a la gran variabilidad originada por las fibras pigmentadas.
- Rango Discreto: contiene un conjunto de bandas de absorción que corresponde a los enlaces moleculares de compuestos específicos en fibras animales (2300 puntos de datos) (Canaza-Cayo et al., 2013).

Los pretratamientos matemáticos se utilizan para eliminar o corregir el scattering y pueden ser de tipo derivativo o multiplicativo. Previo al desarrollo de los modelos de predicción se realizaron una serie de combinaciones entre dichos pretratamientos con los distintos rangos espectrales. Los pretratamientos derivativos empleados en este trabajo fueron: 0-0-1-1, 1-5-3-1 y 2-5-3-1. Donde el primer dígito indica el orden de la derivada; el segundo la cantidad de términos de la ecuación de derivación y los últimos dos, el número de términos usados para suavizar la curva. Los de tipo multiplicativo fueron Weighted Multiplicative Scatter Correction (WMSC) y Standard Normal Variate y Detrend (SNVD). En ambos se emplea la regresión por mínimos cuadrados para comparar el valor de cada espectro individual, ya sea contra el valor medio del total de espectros (WMSC), o contra el valor medio de sí mismo (SNVD). Entre las combinaciones se incluyeron espectros sin tratamiento multiplicativo (NONE).

Para el desarrollo de los modelos se utilizó el método de regresión conocido como Mínimos Cuadrados Parciales Modificados (M-PLS) (Alomar et al., 2015). El colectivo muestral fue separado en dos grupos de 127 y 42 muestras. El primero se empleó como conjunto de calibración para desarrollar los modelos, mientras que el segundo se utilizó como conjunto de validación de los modelos. La selección de muestras para validación se hizo en función de la distancia de H Mahalanobis. También se utilizó la técnica de validación cruzada en grupos para comprobar la precisión de la calibración en cada paso (Canaza-Cayo et al., 2012). El rendimiento predictivo de cada modelo se evaluó en función de las variables Coeficiente de Determinación (R^2); Error Estándar de Validación Cruzada (SECV); Error Estándar de Validación Externa (SEV) y el Valor Predictivo Residual (RPD) (Lupton et al., 2006). En la selección de modelos se considera que aquellos con valores de RPD superiores a 3 son adecuados para fines analíticos, mientras que modelos con valores inferiores a 3 indican menor precisión (Canaza-Cayo et al., 2013; Gishen & Cozzolino, 2007). También se tuvo en cuenta el valor máximo de R^2 y los errores mínimos de validación (SECV y SEV). Finalmente, dichas variables se compararon mediante un análisis ANOVA para determinar si existen diferencias significativas entre los tratamientos de Control y Cardado. Las manipulaciones y procesamientos de los espectros se realizaron con el software WinISI ver. 4.10 (Infrasoft International, Port Matilda, PA).

Resultados

La Tabla 1 muestra los parámetros estadísticos obtenidos en el análisis de referencia de las 169 muestras de llamas. Se observó una amplia variabilidad entre los valores mínimos y máximos en todos los parámetros. Esta característica es propia de los camélidos domésticos como la llama (F. ´D. M. Laime Huarcaya et al., 2016) y alpaca (E. C. Quispe Peña et al., 2014). El valor medio de FM mostrado en la Tabla 1 (25,16 μm) fue similar a los reportados

por Frank y Hick (2017) pero mejor que los 23,9 μm obtenidos por Mueller et al. (2015) en Catamarca. En mediciones realizadas en las regiones Sur y Centro de Argentina, los valores fueron 25 μm (Mueller et al., 2015), 26,2 μm (E. N. Frank et al., 2011) y 28,7 μm (Brodthmann et al., 2017). Los valores mínimos (17,82 μm) y máximos (37,71 μm) fueron ligeramente diferentes a los valores reportados por Laime Huarcaya et al. (2016) para llamas peruanas (16,18 μm y 41,42 μm) y 16,4 μm y 34,2 μm reportados por Canaza-Cayo et al. (2013) en fibras de alpaca. Los datos obtenidos se sitúan por encima de los 23 μm informados para fibras de llama argentina (E. N. Frank et al., 2011; F. D. M. Laime Huarcaya et al., 2016; Mueller et al., 2015). Valores similares fueron reportados en Bolivia y Perú (F. D. M. Laime Huarcaya et al., 2016). En este trabajo, el CV indica la uniformidad de la distribución de la FM. El CV obtenido (33,4%) supera el valor estimado para el rendimiento textil de 24% (E. Quispe Peña et al., 2013). Mueller et al. (2015) reportaron valores de CV de 29,2% en Catamarca, y 26,5% en el Sur y Centro de Argentina. Wurzinger et al. (2006) obtuvieron valores de 33,1% en Bolivia, y Laime Huarcaya reportó un CV de 22,1% para llamas peruanas (F. D. M. Laime Huarcaya et al., 2016). Además, en análisis realizados en fibras de alpaca, Canaza-Cayo y Gishen y Cozzolino reportaron CV de 23,5% y 24,9% respectivamente (Canaza-Cayo et al., 2012; Gishen & Cozzolino, 2007). El FC es un parámetro muy importante ya que define el factor de picor en los tejidos y prendas (Mengüç et al., 2015). El valor medio de FC (79%), fue inferior al 83,9% observado en Catamarca y similar al 80,8% reportado en el Sur y Centro de Argentina por Mueller et al. (2015). Wurzinger et al. (2006) y Laime Huarcaya et al. (2016), reportaron valores de FC de 89% en llamas bolivianas y peruanas. Cervantes et al. (2010) obtuvieron un 84,32% en alpacas peruanas.

Variabes de Referencia	Promedio \pm Desviación	Mínimo	Máximo	Coficiente de Variación
FM (μm)	25,16 \pm 3,75	17,82	37,71	14,93
SD (μm)	8,43 \pm 1,83	5,12	13,62	21,76
CV (%)	33,46 \pm 4,03	22,7	45,7	12,05
FC (%)	79,03 \pm 13,21	24,4	97,3	16,71

Tabla 1. Análisis de referencia de 169 muestras de llama. FM: finura media; SD: desviación estándar de FM; CV: coeficiente de variación de FM; FC: factor de confort

Se desarrollaron 54 modelos de calibración combinando los preprocesamientos espectrales y el tratamiento de la muestra. La Tabla 2 muestra los mejores modelos seleccionados a partir del mayor valor de R^2 y RPD, y los mínimos errores de validación. Los mejores modelos del grupo de Control (1, 10 y 19) se obtuvieron sin aplicar pretratamientos multiplicativos ni derivativos (NONE 0011). Por otro lado, los modelos 29, 37 y 46 del grupo Cardado, se obtuvieron de forma similar a los de Control, excepto el modelo 29 que se obtuvo aplicando primera derivada (1-5-3-1). El Análisis de la Varianza de las variables estadísticas (R^2 , RPD, SECV y SEV) mostró diferencias significativas entre los conjuntos Control y Cardado.

Model ID	Sample treatment1	Spectral Range	Pre-treatments		Loadings	R^2	SECV3	SEV4	RPD5
			Multiplicative	Derivative					
01	Control A	Vis-NIR	NONE	0-0-1-1	5	0.53	2.372	2.672	1.58
10		NIR	NONE	0-0-1-1	5	0.59	2.236	2.547	1.68
19		Discrete	NONE	0-0-1-1	5	0.57	2.286	2.504	1.64
29	Carded B	Vis-NIR	NONE	1-5-3-1	5	0.67	1.965	2.235	1.91
37		NIR	NONE	0-0-1-1	8	0.68	2.088	2.067	1.80
46		Discrete	NONE	0-0-1-1	7	0.64	2.210	2.007	1.70

Tabla 2. Variables estadísticas de los mejores modelos predictivos para el parámetro FM. ¹ ANOVA: diferentes letras indican diferencias significativas en los tratamientos ($p < 0.05$). ² R^2 : coeficiente de determinación. ³ SECV: error estándar

Los mejores modelos de calibración se obtuvieron sin pretratamiento multiplicativo (NONE) y sin pretratamiento derivativo o con primera derivada (0-0-1-1 o 1-5-3-1). Publicaciones sobre predicción de FM en lana y alpaca informaron que los mejores modelos se obtuvieron sin tratamientos multiplicativos (Alomar et al., 2015; Canaza-Cayo et al., 2012; Cozzolino et al., 2005; Gishen & Cozzolino, 2007). El modelo con mayor coeficiente de determinación ($R^2=0,68$) fue mejor que los obtenidos en calibraciones realizadas con lana de oveja sucia ($R^2=0,42$) (Cozzolino et al.,

2005). Sin embargo, fueron inferiores a los obtenidos en fibra de alpaca por Canaza-Cayo et al. (2012) y Gishen y Cozzolino (2007) con $R^2= 0,86$ y $0,88$ respectivamente. Alomar et al. (2015) y Cozzolino et al. (2005), también obtuvieron mejores resultados en lana cruda ($R^2= 0,94$) y lana limpia, ($R^2= 0,90$). El $SECV=1,96 \mu m$ obtenido, fue inferior al $SECV=2,62 \mu m$ reportado en alpaca por Gishen y Cozzolino (2007) y por Cozzolino et al. (2005) en lana sucia ($SECV=11,2 \mu m$). Sin embargo, Alomar et al. (2015) y Canaza-Cayo et al. (2012) obtuvieron valores de $SECV=1,24 \mu m$ y $1,01 \mu m$, respectivamente. El valor de $RPD=1,91$, cercano a 2, indica que los modelos obtenidos podrían ser implementados con fines de clasificación o selección genética (Gishen & Cozzolino, 2007). Según el análisis ANOVA, el cardado de las muestras mejora la precisión de la predicción de los modelos de calibración. Esto puede correlacionarse con trabajos anteriores sobre la influencia del tratamiento de cardado en la repetibilidad espectral reportados por Amorena et al. (2018). Además, Cozzolino et al. (2005), obtuvieron modelos más precisos cuando utilizaron muestras de lana limpia. Se sugiere que la dispersión causada por la luz reflejada en la superficie de la muestra es uno de los principales factores que restringen la precisión de la calibración. Dicho efecto, considerado desafortunado e indeseable en la mayoría de los casos, se convierte en una característica útil para dar una estimación de la FM, ya que este comportamiento puede estar relacionado con el grosor y la morfología de la fibra (McGregor & Quispe Peña, 2018).

Conclusiones

En este estudio se evaluó la viabilidad de la espectroscopia NIR para predecir el parámetro de Finura Media en fibras de llama. Los modelos con mayor rendimiento predictivo se obtuvieron sin pretratamientos o con un pretratamiento derivativo. Según estos resultados, los modelos podrían utilizarse en programas de selección mejoramiento en rebaños de llamas como método sostenible, rápido y de bajo coste para mejorar la calidad de las fibras. Sin embargo, esta técnica sigue siendo difícil de alcanzar y requiere mayor investigación para alcanzar modelos con mejor precisión. Los datos presentados en este trabajo son alentadores ya que contribuyen a la valorización de la fibra de llama y al desarrollo sostenible de la industria textil en el territorio de la Puna de Argentina.

Referencias

- Adot, O. G., & Frank, E. N. (2015). Industrialization and Commercialisation of the fibre of South American camelids in Argentina. *International Journal of Scientific Research and Innovative Technology*, 2(1), 52–59.
- Alarcón Buhofer, M. M. I. (2012). Predicción de la calidad de lana mediante Espectroscopía de Reflectancia en el Infrarrojo Cercano (NIRS). Universidad Austral de Chile.
- Alomar, D., Alarcón, M., & Kusanovic, A. (2015). Predicción de la calidad de lana mediante Espectroscopia de Reflectancia en el Infrarrojo Cercano (NIRS). *Agro Sur*, 43(1), 19–24. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2015.v43n1-03>
- Amorena, J. I., Fernández de Ahumada, E., Álvarez, D. M. E., & Rigalt, F. (2018). Desarrollo preliminar de metodología NIRS para la evaluación cuantitativa y cualitativa de fibra de llama (*Lama glama*). In P. Delgado Callisaya, L. Gutiérrez Ramirez, & N. Bustos Fernández (Eds.), 8vo Congreso Mundial sobre Camélidos.
- Brodthmann, L. I., Hick, M. H., Castillo, M. F., & Frank, E. N. (2017). Conceptual description of the llama fleece structure and the potential of classing and dehairing. *Textile Research Journal*, 0(00), 1–18. <https://doi.org/10.1177/0040517517700199>
- Canaza-Cayo, A. W., Alomar, D., & Quispe, E. (2013). Prediction of alpaca fibre quality by near-infrared reflectance spectroscopy. *Animal*, 7(7), 1–7. <https://doi.org/10.1017/S1751731113000505>
- Canaza-Cayo, A. W., Cozzolino, D., Alomar, D., & Quispe, E. (2012). A feasibility study of the classification of Alpaca (*Lama pacos*) wool samples from different ages, sex and color by means of visible and near infrared reflectance spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture*, 88, 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.07.013>

- Cervantes, I., Pérez-Cabal, M. A., Morante, R., Burgos, A., Salgado, C., Nieto, B., Goyache, F., & Gutiérrez, J. P. (2010). Genetic parameters and relationships between fibre and type traits in two breeds of Peruvian alpacas. *Small Ruminant Research*, 88(1), 6–11. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2009.10.016>
- Cottle, D. J., & Baxter, B. P. (2015). Wool metrology research and development to date. *Textile Progress*, 47(3), 163–315. <https://doi.org/10.1080/00405167.2015.1108543>
- Cozzolino, D., Montossi, F., & San Julian, R. (2005). The use of visible (VIS) and near infrared (NIR) reflectance spectroscopy to predict fibre diameter in both clean and greasy wool samples. *Animal Science*, 80(3), 333–337. <https://doi.org/10.1079/ASC41760333>
- Fearn, T. (2002). Assessing calibrations: SEP, RPD, RER, R2. *NIR News*, 13(6), 3.
- Frank, E., Hick, M. V. H., & Adot, O. (2012). Determination of dehairing, carding, combing and spinning difference from Lama type of fleeces. *International Journal of Applied Science and Technology*, 2(1), 61–70. <https://www.researchgate.net/publication/233895780>
- Frank, E. N., Hick, M. V. H., Molina, M. G., & Caruso, L. M. (2011). Genetic parameters for fleece weight and fibre attributes in Argentinean Llamas reared outside the Altiplano. *Small Ruminant Research*, 99(1), 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2011.03.048>
- Frank, E. N., Hick, M. H. V., & Riva de Neyra, L. A. (2017). The Problem of Prickling on Fabrics of South American Camelids Fibers: Possible Approaches for Mechanical Solutions. *Asian Research Journal of Agriculture*, 5(2), 1–9. <https://doi.org/10.9734/ARJA/2017/34692>
- Gishen, M., & Cozzolino, D. (2007). Feasibility study on the potential of visible and near infrared reflectance spectroscopy to measure alpaca fibre characteristics. *Animal*, 1(6), 899–904. <https://doi.org/10.1017/S1751731107000146>
- Laime Huarcaya, F. D. M., Huamaní, R. P., Ocsa, V. P., Machaca, V. M., & Peña, E. C. Q. (2016). Características tecnológicas de la fibra de llama (Lama glama) Chaku antes y después de descender. *Revista de Investigaciones Veterinarias Del Peru*, 27(2), 209–217. <https://doi.org/10.15381/rivep.v27i2.11643>
- Laime Huarcaya, F. de M., Pinares Huamaní, R., Paucara Ocsa, V., Machaca Machaca, V., & Quispe Peña, E. C. (2016). Características Tecnológicas de la Fibra de Llama (Lama glama) Chaku antes y después de Descender. *Revista de Investigaciones Veterinarias Del Perú*, 27(2), 209–217. <https://doi.org/10.15381/rivep.v27i2.11643>
- Lupton, C. J., McColl, A., & Stobart, R. H. (2006). Fiber characteristics of the Huacaya Alpaca. *Small Ruminant Research*, 64(3), 211–224. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2005.04.023>
- McGregor, B. A., & Quispe Peña, E. C. (2018). Cuticle and cortical cell morphology of alpaca and other rare animal fibres. *Journal of the Textile Institute*, 109(6), 767–774. <https://doi.org/10.1080/00405000.2017.1368112>
- Mengüç, G. S., Özdil, N., & Hes, L. (2015). Prickle and handle properties of fabrics produced from specialty animal fibers. *Textile Research Journal*, 85(20), 2155–2167. <https://doi.org/10.1177/0040517515578327>
- Mueller, J., Rigalt, F., Lamas, H., Sacchero, D. M., Cancino, A. K., & Wurzinger, M. (2015). Fibre Quality of South American Camelids in Argentina: a Review. *Animal Genetic Resources*, 56, 97–109.
- Quispe Peña, E. C., Poma Gutiérrez, A., McGregor, B., & Bartolomé Filella, J. (2014). Effect of genotype and sex on fiber growth rate of alpacas for their first year of fleece production. *Archivos Médicos Veterinarios*, 46(2014), 151.
- Quispe Peña, E., Poma Gutiérrez, A., & Purroy Unanua, A. (2013). Características productivas y textiles de la fibra de alpacas de raza huacaya. *Revista Complutense de Ciencias Veterinarias*, 7(1), 1–29. https://doi.org/10.5209/rev_rccv.2013.v7.n1.41413
- Sommerville, P. (2007). Fundamental Principles of Fibre Fineness Measurement. In AWTA Ltd. Newsletter. Australian Wool Testing Authority Ltd.
- Wurzinger, M., Delgado, J., Valle, A. Z., Stemmer, A., & Ugarte, G. (2006). Genetic and non-genetic factors influencing fibre quality of Bolivian llamas. 61, 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2005.07.004>