

Relación entre las mediciones del Diámetro Medio de Fibra mediante Airflow y Laserscan para lana uruguaya

The relationship between Mean Fibre Diameter measurements by Airflow and Laserscan for uruguayan wool

Relação entre as medições do Diâmetro Médio da Fibra por Airflow e Laserscan para lã uruguaia

 **KARINA ANDREA DEMARÍA PÉREZ** (1)

 **SANTIAGO NICOLÁS MORALES YELPO** (1)

 **PAMELA STEFANI RAMOS OLIVERA** (1)

 **PATRICIA RAFAELA ZEBALLOS TRINIDAD** (1)

(1) Departamento de Textiles, Lana Bruta, Tops y Cueros, Laboratorio Tecnológico del Uruguay, LATU, Montevideo, Uruguay.

RECIBIDO: 17/7/2025 → APROBADO: 14/10/2025 ✉ paramos@latu.org.uy

RESUMEN

Uruguay es reconocido por su producción de lana de alta calidad, combinando prácticas tradicionales con tecnología moderna. Aunque la producción de lana cayó un 3,5 % el año pasado, las exportaciones aumentaron un 62,7 %. Sin embargo, su competitividad estaba limitada por una regulación de la International Wool Textile Organisation (IWTO) que exigía la certificación del Diámetro Medio de Fibra (DMF) con el método Airflow (AF, IWTO-28) (International Wool Textile Organisation, 2013), a pesar de que los mercados líderes utilizan el Laserscan (LSN, IWTO-12) (International Wool Textile Organisation, 2012). Este estudio analizó 161 muestras de lotes comerciales de lana uruguaya (finuras de 16 μm a 33 μm) para evaluar la equivalencia entre AF y LSN. Se encontró una elevada correlación estadística, ausencia de sesgo sistemático e independencia del nivel al aplicar el protocolo IWTO-0 (International Wool Textile Organization, 2020). Esto confirma que la matriz de lana uruguaya es compatible con ambos métodos, permitiendo su intercambiabilidad dentro de los límites de incertidumbre. La evidencia obtenida respaldó la modificación de las regulaciones de la IWTO. En el Congreso de Lille en 2025, se aprobó la enmienda que exime a la lana uruguaya de la medición complementaria por AF. Esta decisión permite al país certificar el DMF exclusivamente mediante LSN, lo que optimiza costos y alinea sus estándares con los mercados globales, potenciando la comercialización de la lana a nivel mundial.

Palabras clave: evaluación tecnológica, certificación, IWTO, calidad.

ABSTRACT

Uruguay is recognized for its production of high-quality wool, combining traditional practices with modern technology. Although wool production fell by 3.5 % last year, exports increased by 62.7 %. However, its competitiveness was limited by an International Wool Textile Organisation (IWTO) regulation that required the certification of Mean Fibre Diameter (MFD) using the Airflow method (AF, IWTO-28) (International Wool Textile Organisation, 2013), despite the fact that leading markets utilize the Laserscan (LSN, IWTO-12) (International Wool Textile Organisation, 2012). This study analysed 161 samples of commercial lots of Uruguayan wool (fineness ranging from 16 μm to 33 μm) to evaluate the equivalence between AF and LSN. A high statistical correlation was found, along with a lack of systematic and level-dependent bias when applying the IWTO-0 protocol (International Wool Textile Organization, 2020). This confirms that the Uruguayan wool matrix is compatible with both methods, allowing for their interchangeability within the limits of uncertainty. The evidence obtained supported a modification of the IWTO regulations. At the Lille Congress in 2025, an amendment was approved that exempts Uruguayan wool from the complementary AF measurement. This decision allows the country to certify MFD exclusively using LSN, which optimizes costs and aligns its standards with global markets, boosting the worldwide commercialization of wool.

Keywords: technological assessment, certification, IWTO, quality.

RESUMO

O Uruguai é reconhecido pela sua produção de lã de alta qualidade, combinando práticas tradicionais com tecnologia moderna. Embora a produção de lã tenha caído 3,5 % no ano passado, as exportações aumentaram 62,7 %. No entanto, sua competitividade era limitada por uma regulamentação da International Wool Textile Organisation (IWTO) que exigia a certificação do Diâmetro Médio da Fibra (DMF) pelo método Airflow (AF, IWTO-28) (International Wool Textile Organisation, 2013), apesar de os mercados líderes utilizarem o Laserscan (LSN, IWTO-12) (International Wool Textile Organisation, 2012). Este estudo analisou 161 amostras de lotes comerciais de lã uruguaia (com finuras de 16 μm a 33 μm) para avaliar a equivalência entre AF e LSN. Foi encontrada uma elevada correlação estatística e ausência de viés sistemático e dependente do nível ao aplicar o protocolo IWTO-0 (International Wool Textile Organization, 2020). Isso confirma que a matriz de lã uruguaia é compatível com ambos os métodos, permitindo sua intercambialidade dentro dos limites de incerteza. A evidência obtida apoiou a modificação das regulamentações da IWTO. No Congresso de Lille em 2025, foi aprovada a emenda que isenta a lã uruguaia da medição complementar por AF. Esta decisão permite ao país certificar o DMF exclusivamente através do LSN, o que otimiza custos e alinha seus padrões com os mercados globais, potenciando a comercialização da lã a nível mundial.

Palavras-chave: avaliação tecnológica, certificação, IWTO, qualidade.

INTRODUCCIÓN

Uruguay y su producción lanera

Uruguay ha sido reconocido históricamente por la solidez de su sector agropecuario, con la producción de lana como un pilar fundamental de su economía rural. Esta aseveración se sustenta en la información estadística del Secretariado Uruguayo de la Lana (SUL) y en análisis técnicos del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP), a través de su Oficina de Planeamiento y Políticas Agropecuarias (OPYPA) (Abella y Piegas, 2024; Uruguay. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, 2023; Piegas, 2024; Secretariado Uruguayo de la Lana, s.d.). Adicionalmente, esta agroindustria genera un impacto socioeconómico significativo en la macroeconomía nacional.

Las características agroecológicas singulares del país, que incluyen la extensión de sus pastizales naturales y un clima templado, constituyen un ambiente óptimo para el desarrollo de la ovinocultura, una práctica intrínseca a las tradiciones productivas (Abella y Piegas, 2024; Piegas, 2024; Secretariado Uruguayo de la Lana, s.d.).

El sector lanero uruguayo se caracteriza por la alta calidad de su producción, destacándose particularmente la lana Merino fina, la cual posee una elevada demanda en los mercados internacionales (Secretariado Uruguayo de la Lana, s.d.). A pesar de enfrentar desafíos estructurales como la volatilidad de los precios globales y las adversidades climáticas (sequías o eventos extremos), la agroindustria ha exhibido una notable resiliencia y capacidad de adaptación. Las tendencias recientes señalan una transición progresiva hacia la implementación de prácticas de producción sostenibles y éticas, lo que converge con las exigencias globales por productos ambientalmente amigables y socialmente responsables (Secretariado Uruguayo de la Lana, s.d.).

Estadísticas y contexto de la producción lanera uruguaya

La producción de lana en Uruguay ha manifestado fluctuaciones interanuales, reflejando las dinámicas del mercado global y doméstico (Abella y Piegas, 2024; Uruguay. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, 2023; Piegas, 2024; Secretariado Uruguayo de la Lana, s.d.).

Actualmente, el stock ovino nacional asciende a 5,3 millones de cabezas, con una producción anual estimada de aproximadamente 24.000 toneladas de lana (Uruguay. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, 2023). En el ejercicio 2023/2024, el país exportó 44,2 millones de kilogramos de lana, lo que supuso un incremento significativo del 62,7 % respecto a períodos precedentes (Abella y Piegas, 2024).

China se posiciona como el principal destino de la lana uruguaya, seguido por Alemania, Italia y otros países de la Unión Europea. La calidad, la sustentabilidad y la capacidad de adaptación a las condiciones del mercado son factores clave en el éxito de la industria (Abella y Piegas, 2024; Uruguay. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, 2023; Piegas, 2024).

La mayor proporción de la producción uruguaya corresponde a lanas de micras medias (*mid-micron wool*), aunque se registra un interés creciente en las lanas Merino finas y superfinas (Secretariado Uruguayo de la Lana, s.d.).

El Secretariado Uruguayo de la Lana (SUL) identifica las siguientes razas ovinas predominantes en la producción nacional: Corriedale (lana de micras medias), Merino (lana fina y superfina), Ideal (lana medio-fina), Merilin (lana y carne, considerada doble propósito) y Romney Marsh (lana gruesa).

Estas razas exhiben una distribución geográfica diferenciada en el territorio, abarcando áreas como la basáltica Norte, las sierras del Este y las llanuras centrales, cuyas características edafoclimáticas específicas influyen en la calidad intrínseca de la fibra producida (Secretariado Uruguayo de la Lana, s.d.).

Certificación, comercialización y metrología de la lana uruguaya

El Secretariado Uruguayo de la Lana (SUL) juega un rol instrumental en la promoción de la ovinocultura sostenible y en el mejoramiento de la calidad de la fibra a través de programas de desarrollo. La lana uruguaya se destina predominantemente a la exportación hacia mercados como Europa, Asia y América del Norte, comercializándose en múltiples fases de procesamiento, incluyendo lana sucia (greasy wool), lana lavada (scoured wool) y tops de lana peinada (combed wool tops) (Abella y Piegas, 2024; Uruguay. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, 2023; Secretariado Uruguayo de la Lana, s.d.). La certificación es crucial, ya que garantiza que los compradores seleccionan fibras que satisfagan sus requisitos técnicos, facilitando transacciones y potenciando el valor de la lana.

El proceso de certificación implica pruebas rigurosas ejecutadas conforme a las regulaciones de la IWTO. El Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU) muestrea y analiza los lotes, certificando parámetros críticos como la base de lana (wool base), el diámetro de la fibra (DMF), la base de materia vegetal y el color, entre otros. Estos parámetros son esenciales para sostener la reputación de la lana en los mercados globales (International Wool Textile Organisation (IWTO), 2006, 2020, 2023; Sommerville, 2007). Sin embargo, un desafío regulatorio persiste: las normas actuales de la IWTO exigen que cualquier ensayo de DMF realizado mediante Laserscan (LSN) en lana uruguaya debe ser acompañado por una medición certificada obtenida por Airflow (AF). Esta duplicación genera sobrecostos y potenciales distorsiones en la comercialización, especialmente porque los principales exportadores utilizan el LSN como método predeterminado (Dawes et al., 2018; Heath et al., 2006).

Los desafíos metrologógicos se centran en obtener mediciones objetivas, precisas y representativas de las propiedades de la fibra. El DMF es la característica más importante, controlando hasta el 80 % del valor de la lana y su hilabilidad (International Wool Textile Organization, 2020), lo que convierte la elección instrumental en un problema central. Adicionalmente, la heterogeneidad intrínseca de la fibra es un factor clave: la variabilidad en el diámetro (CV) es crucial, ya que una mayor dispersión afecta negativamente el rendimiento del hilado. Finalmente, la metrología debe asegurar la cuantificación precisa del rendimiento y la estandarización rigurosa de los protocolos de muestreo y ensayo para garantizar la confiabilidad e intercambiabilidad global de los resultados.

En consecuencia, el sector lanero uruguayo busca eliminar el requisito de medición complementaria por AF para negociar su producto bajo la misma base técnica que sus competidores (Baxter, 1998). Aunque el AF y el LSN están altamente correlacionados, las diferencias físicas inherentes en la determinación del DMF (indirecta o directa) pueden

generar sesgos dependientes del nivel específico de la matriz de la lana uruguaya (Dawes et al., 2018). El presente informe examina precisamente la relación metrológica entre las mediciones de DMF obtenidas por AF y LSN a través de una muestra representativa, buscando demostrar la analogía de la matriz uruguaya con la de los principales competidores y evaluar las implicaciones comerciales de una eventual transición al uso exclusivo del LSN (Baxter, 1998; Heath et al., 2006).

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo y diseño experimental

Se seleccionaron 161 lotes comerciales de lana sucia (greasy wool) ensayados durante la zafra 2024-2025, siendo procesados en el año 2024 aproximadamente 2600 lotes. Este tamaño muestral se determinó con base en la consistencia estadística y la comparabilidad internacional, tomando como referencia estudios metrológicos previos en países productores de lana fina (Dawes et al., 2018; Heath et al., 2006).

El diseño de muestreo fue intencional y estratificado, asegurando la representatividad de la lana uruguaya al abarcar el rango típico de razas, tipologías de fibra (vellón y no-vellón), y la distribución de finuras procesadas a nivel nacional, a través de la producción proveniente del procesamiento en fábrica. Este procedimiento garantizó que la muestra cubriera un amplio espectro de DMF (desde 16,5 μm hasta 33,1 μm). La toma de muestra inicial se realizó en las fábricas por inspectores del LATU capacitados bajo las normas de la IWTO. Posteriormente, la muestra total fue enviada al LATU para la preparación de las submuestras.

Determinación del Diámetro Medio de Fibra

La determinación del DMF se llevó a cabo utilizando dos metodologías en paralelo: Airflow (AF) y Laserscan (LSN). El método AF (IWTO-28) (International Wool Textile Organisation, 2013) se fundamenta en el principio físico de la permeabilidad al aire de una muestra compactada, infiriendo la finura a partir de la resistencia aerodinámica que ofrece la lana. El resultado es una estimación indirecta de la superficie total de las fibras. Las muestras para AF fueron sometidas a un proceso de cardado utilizando Analizadores Shirley para asegurar la desalineación uniforme, esencial para la técnica de porosidad.

El método LSN (IWTO-12) (International Wool Textile Organisation, 2012) emplea óptica y electrónica para obtener una medida directa y objetiva mediante difracción láser. Mide el diámetro real de miles de segmentos de fibra (snippets) a gran velocidad, proporcionando no solo el DMF sino también el Coeficiente de Variación (CV). Las muestras para LSN se obtuvieron por minicoreo (minicoring) de material lavado y secado (scoured/dried). Los equipos utilizados para el ensayo AF se ilustran en la Figura 1A, mientras que los equipos para el ensayo LSN se ilustran en la Figura 1B.

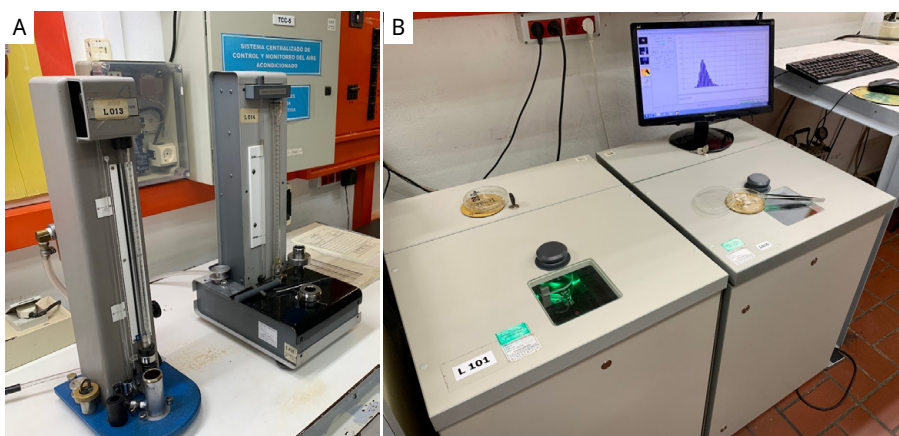


FIGURA 1. A) Equipos Airflow y B) Equipos Laserscan.

Metodología de ensayo, acondicionamiento y calibración

Previo a la medición, todas las submuestras fueron acondicionadas en una atmósfera estándar (típicamente 20 ± 2 °C y 65 ± 3 % de humedad relativa) conforme al estándar IWTO-52 (International Wool Textile Organization, 2006) para neutralizar el efecto de la humedad ambiental. La determinación del DMF se realizó tomando un mínimo de cuatro lecturas por lote distribuidas entre dos instrumentos AF, y analizando cuatro especímenes por lote (cada uno compuesto por 1000 segmentos de fibra) distribuidos entre dos instrumentos LSN.

Para asegurar la trazabilidad metrológica y la confiabilidad de los datos, todos los equipos AF y LSN fueron calibrados antes de la medición conforme a sus respectivos Métodos de Ensayo IWTO, empleando la serie IH de Interwoollabs como Material de Referencia certificado.

Análisis estadístico (metodología IWTO-0)

El análisis de los datos se llevó a cabo conforme a los procedimientos estadísticos establecidos en el Apéndice B de la norma IWTO-0 (International Wool Textile Organisation, 2020). Esta metodología proporciona el marco para la comparación de mediciones de finura y tiene como propósito principal cuantificar la existencia y magnitud de cualquier sesgo (bias) entre el método de referencia (AF) y el método a comparar (LSN). Específicamente, el análisis incluyó la evaluación de la diferencia media para determinar el sesgo sistemático promedio y el cálculo del sesgo dependiente del nivel, que se obtiene mediante la regresión de la diferencia contra el promedio de los dos resultados, indicando si la discrepancia varía en función del DMF.

RESULTADOS

Comparación de las mediciones Airflow y Laserscan: análisis IWTO-0

Los datos obtenidos de las mediciones de DMF por los métodos AF y LSN fueron sometidos a un análisis estadístico en conformidad con el Apéndice B de la normativa IWTO-0 (International Wool Textile Organisation, 2020).

Estos procedimientos son cruciales, ya que la aceptación comercial del LSN como método de certificación primario para la lana uruguaya depende de la demostración de que la matriz local presenta una correlación y un sesgo consistentes con los patrones de lanas ya aceptadas globalmente.

El coeficiente de correlación obtenido, cuyo valor es altamente significativo (próximo a la unidad, $r = 0,99$), es un indicio de la fuerte relación lineal positiva que existe entre las metodologías AF y LSN. Esto implica que las variaciones en el DMF son proporcionales y exhiben una concordancia direccional entre ambos instrumentos de ensayo.

Asimismo, no se identificó un sesgo (bias) general significativo entre los resultados arrojados por los métodos AF y LSN. Esta ausencia de sesgo estadístico sugiere que ambas técnicas producen mediciones de DMF promedio que son equivalentes (Tabla 1).

TABLA 1. Sesgo relativo global y Prueba *t* de Student Pareada.

Parámetro estadístico	Sesgo general		Prueba <i>t</i> Pareada
	AF	LSN	
N	161	161	161
Promedio	23,91	23,92	0,01
Desvío estándar	4,27	4,24	0,30
Error estándar	0,34	0,33	0,02
Valor <i>t</i>			0,42
Valor <i>p</i>			0,67
Significancia			NS

Los datos obtenidos fueron representados gráficamente en las Figuras 2 y 3, donde se visualiza la diferencia absoluta o relativa entre las mediciones LSN y AF a lo largo de diámetros de fibra analizados. Estas representaciones ilustran la consistencia entre las dos metodologías de ensayo.

En la Figura 2, que representa el análisis Diferencias Versus Promedios (DVP), se visualizan los resultados de la concordancia entre ambos métodos. Las dos líneas ubicadas simétricamente a cada lado de la ordenada 0 representan los Límites de Confianza del 95 % para los datos. La línea discontinua central es la regresión de Mínimos

Cuadrados Ordinarios (OLS) aplicada a la diferencia contra el promedio, cuya pendiente es clave para detectar la existencia de un sesgo dependiente del nivel.

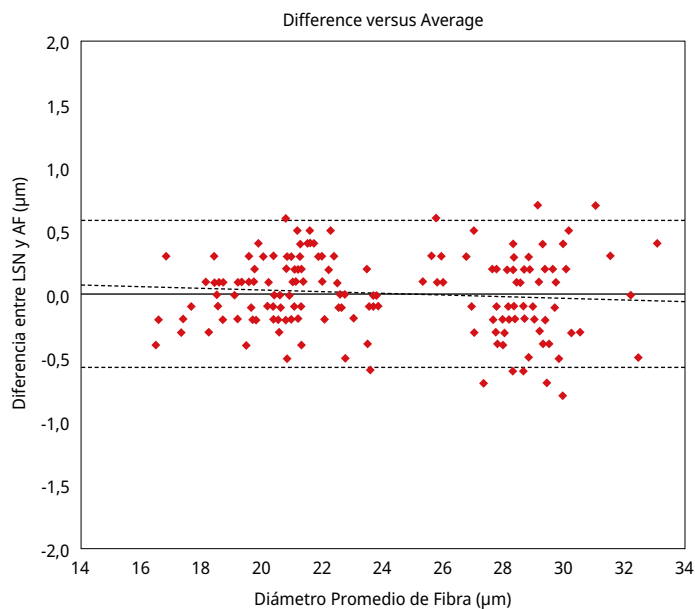


FIGURA 2. Diferencias en el Diámetro Medio de Fibra entre AF y LSN.

La Figura 3 ilustra la relación de concordancia entre los dos instrumentos. En ella se observa la correlación directa entre los resultados obtenidos por el LSN y el AF, donde la línea de identidad 1:1 y el modelo de Regresión de Mínimos Cuadrados Geométricos (GM) se superponen de manera virtualmente indistinguible, confirmando gráficamente la cercanía de la relación funcional.

Se observa una concordancia entre la línea de GM, que modela la relación empírica observada. La similitud en el comportamiento es un indicador de la alta correlación y la mínima dispersión entre las mediciones producidas por ambos métodos. Este hecho se confirma por el elevado coeficiente de determinación (R^2) obtenido del análisis de regresión, cuyo valor fue de 0,99.

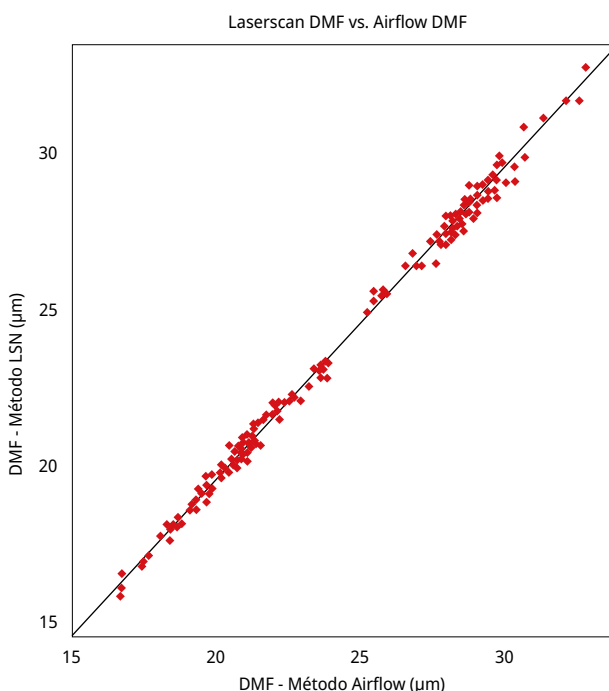


FIGURA 3. Relación entre las mediciones del Diámetro de Fibra por AF y LSN.

Las diferencias puntuales entre las mediciones generalmente se ubican dentro de un rango, reforzando la hipótesis de la intercambiabilidad entre AF y LSN para la certificación del DMF en la lana uruguaya. La coherencia visual de los datos es la confirmación gráfica de que el sesgo es constante y no dependiente del nivel.

El análisis de regresión, ejecutado conforme a la metodología del Apéndice B de la norma IWTO-0 (International Wool Textile Organisation, 2020), fue aplicado para determinar la existencia de un sesgo significativo dependiente del nivel entre los métodos AF y LSN (Tabla 2).

El análisis comparativo de instrumentos de medición de lana AF y LSN es bivariado, porque ambas variables (las mediciones de cada instrumento) incluyen un componente de varianza significativa debido a errores de muestreo y de medición. Utilizar el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS) resulta en una subestimación sistemática de la relación real entre los instrumentos (sesgo de atenuación). Por esta razón, se emplea el Modelo de Regresión de Errores en Ambas Variables (GM) (Buonaccorsi, 1996). Este modelo corrige el sesgo inherente al OLS, proporcionando una estimación más precisa de la relación funcional entre los instrumentos, esencial para validar la intercambiabilidad de los métodos de certificación.

El protocolo de la International Wool Textile Organisation (IWTO) para la comparación de métodos exige la evaluación a través de dos modelos de regresión complementarios para asegurar la solidez del análisis. El primer modelo es la Regresión de Mínimos Cuadrados Geométricos (GM), el cual compara directamente el DMF obtenido por LSN contra el DMF de AF. Un coeficiente de pendiente ideal de 1 indicaría una relación perfecta de 1:1 sin sesgo dependiente del nivel. En este estudio, la pendiente obtenida fue de 0,99, un valor próximo a la unidad, lo que sugiere una equivalencia lineal cercana.

Además del uso de la Regresión GM para estimar la relación funcional real, la comparación de instrumentos requiere la aplicación del método de Diferencias Versus Promedios (DVP), conocido como el gráfico de Bland-Altman. Este segundo modelo, sugerido inicialmente para la comparación de métodos en medicina que implican modelos bivariados con varianza significativa (Altman y Bland, 1983), sirve como el estándar para la detección del sesgo dependiente del nivel, evaluando directamente el acuerdo o concordancia.

En el análisis DVP, la regresión se realiza utilizando la diferencia entre los dos métodos en función del promedio de sus resultados. La gráfica DVP, al trazar la diferencia de las mediciones contra su promedio, permite identificar el sesgo sistemático y si la diferencia entre los métodos varía proporcionalmente a la finura de la fibra. Una pendiente ideal de 0 en este modelo indicaría que el sesgo es completamente constante a lo largo de todo el espectro de finuras, es decir, que la diferencia entre LSN y AF no varía sistemáticamente con el DMF. El objetivo es que las diferencias se mantengan dentro de los Límites de Confianza del 95 % para considerar los métodos como intercambiables funcionalmente.

El análisis reveló que las pendientes de los modelos no son estadísticamente significativas ($p > 0,05$), lo que demuestra de manera concluyente que no existe un sesgo dependiente del nivel significativo entre las mediciones de DMF obtenidas por AF y LSN. El sesgo entre las metodologías es constante a lo largo de todo el rango de micras de la lana uruguaya ensayada, aunque se registra una diferencia mínima promedio. Este resultado respalda directamente la hipótesis de que el LSN puede ser utilizado como un sustituto directo y equivalente del AF para la certificación del DMF de la lana uruguaya.

TABLA 2. Análisis de regresión para el sesgo dependiente del nivel (IWTO-0).

Regresión	Pendiente	Significación	Error estándar	Valor t	Valor p	R2
Media Geométrica	0,99	NS	0,01	1,22	0,22	0,99
Diferencia vs Promedio	-0,01	NS	0,01	1,22	0,22	
Punto de corte (Media Geométrica)	0,17					
Punto de corte (Diferencia vs Promedio)	0,17					
Error Estándar de la Estimación	0,30					

Existen trabajos técnicos que establecen que pueden generar sesgos sistemáticos entre el AF y el LSN en función del DMF (Baxter, 1999). Heath et al. (2006) indican que uno de los instrumentos podría arrojar valores consistentemente mayores que el otro en rangos diametrales específicos. Además, estos sesgos pueden estar modulados por el origen geoclimático de la lana, un factor que influye en las características de la fibra. No obstante, en el contexto de Uruguay, esta variabilidad se considera menos determinante debido a la homogeneidad de las zonas agroclimáticas y la similitud de los sistemas de producción. No hubo sesgo estadísticamente significativo, por lo que tal vez los resultados no mostraron un sesgo estadísticamente significativo sobre el rango de micras en el clip uruguayo.

Existen trabajos técnicos que establecen que pueden generar sesgos sistemáticos entre el método Airflow (AF) y el Laserscan (LSN) en función del DMF (DMF) (Baxter, 1999). Autores como Heath et al. (2006) indican que esta diferencia no es aleatoria, sino que uno de los instrumentos podría arrojar valores consistentemente mayores que el otro en rangos diametrales específicos.

Adicionalmente, estos sesgos pueden estar modulados por factores geoclimáticos que influyen en las características físicas de la fibra (como su curvatura o contenido de grasa). No obstante, en el contexto de la producción de lana de Uruguay, esta variabilidad se considera menos determinante debido a la alta homogeneidad de las zonas agroclimáticas y la similitud de los sistemas de producción.

Este factor resultó ser clave: el análisis estadístico realizado en la lana uruguaya no mostró un sesgo estadísticamente significativo sobre el rango de micras estudiado, lo cual soporta la hipótesis de que la homogeneidad de la fibra minimiza los problemas de concordancia entre instrumentos.

Por otra parte, la alta correlación observada en el presente estudio entre AF y LSN sugiere un comportamiento de concordancia que difiere de algunos trabajos. Por ejemplo, Downes (1992) señala que el AF, al estimar el DMF a partir del área superficial de las fibras, puede verse afectado por la variabilidad geométrica natural (elipticidad y heterogeneidad diametral), lo que podría alterar el flujo de aire y, sesgar el valor de DMF en comparación con la medición directa del LSN. Richards (1954) subraya la sensibilidad del AF a la presencia de contaminantes residuales (materia vegetal o grasa), los cuales alteran la porosidad de fibras, resultando en una estimación errónea del DMF y generando divergencias con los resultados de LSN.

La minimización de estas fuentes de variabilidad exige el estricto cumplimiento de los estándares internacionales. Las normas IWTO-28 (para AF) e IWTO-12 (para LSN) (International Wool Textile Organisation, 2012) establecen los procedimientos obligatorios de estandarización y calibración. El incumplimiento en el mantenimiento o la calibración inadecuada de estos equipos puede invalidar los resultados, generando diferencias entre laboratorios que comprometen la exactitud de las estimaciones del DMF (International Wool Textile Organization, 2025).

Debido a lo anterior, adquiere importancia el mantenimiento riguroso de las calibraciones, el cuidado del equipamiento y el entrenamiento especializado del personal. Las diferencias en la estimación del DMF no se deben únicamente a las variaciones inherentes de la fibra natural, sino también a la variabilidad operacional (factor humano) y la condición instrumental (International Wool Textile Organization, 2025). La implementación de un Sistema de Gestión de Calidad (SGC) que mantenga la trazabilidad de los entrenamientos y el control periódico de los procesos rutinarios es esencial.

Si bien el LSN, al automatizar la medición, reduce el potencial error atribuible al operador en el proceso de medición, la competencia técnica del personal sigue siendo crítica para la preparación de la muestra, la calibración, y el chequeo periódico del correcto funcionamiento. Este rigor es indispensable para la certificación del DMF a nivel global y para asegurar la confianza comercial en los mercados internacionales de lana que emplean el LSN como método de referencia.

CONCLUSIONES

La transición hacia el uso del método LSN para la certificación del DMF, sin la obligación de reportar concomitantemente los resultados de AF, sitúa a Uruguay en alineación estratégica con los principales países productores de lana fina (como Australia, Sudáfrica y Nueva Zelanda), que emplean el LSN como método de certificación predeterminado (default) (Dawes et al., 2018; Heath et al., 2006; Sommerville, 2007). Esta homologación de estándares tiene el potencial de simplificar las transacciones en el comercio internacional y minimizar la confusión para los compradores a nivel global.

La eliminación del requisito de una medición adjunta por AF generaría una reducción directa en los costos operativos de ensayo para los productores laneros uruguayos.

Adicionalmente, el método LSN proporciona datos paramétricos suplementarios, como el CV, que constituye información de alto valor predictivo para los procesadores, permitiéndoles anticipar el comportamiento de la lana en las etapas industriales subsiguientes. Esta información de valor agregado puede contribuir a incrementar la valorización y la comercialización de la lana de origen uruguayo.

Este informe ha sintetizado la relación metrológica entre las mediciones del DMF obtenidas por los métodos AF y LSN en un espectro representativo de la lana uruguaya. Se ha demostrado fehacientemente que ambos procedimientos para la medición del DMF exhiben una elevada correlación estadística y producen resultados consistentes con un sesgo mínimo. Los análisis estadísticos confirman que ambas metodologías son confiables y pueden ser utilizadas de forma intercambiable en los ensayos de calidad de la fibra.

Los resultados empíricos observados son análogos a los reportados en otros países clave productores de lana fina que han culminado la transición tecnológica del Airflow al Laserscan para la certificación del DMF. Esta progresión tecnológica ha permitido que tanto los productores como los procesadores se beneficien de los datos adicionales proporcionados por la nueva tecnología.

En función de estos hallazgos, se recomendó la modificación de las Regulaciones de Ensayo Central (Core Test Regulations) de la IWTO con el objetivo de permitir que la lana de origen uruguayo sea certificada para el DMF basándose exclusivamente en el método Laserscan (IWTO-12) (International Wool Textile Organisation, 2012), sin la necesidad de la medición complementaria por Airflow (IWTO-28) (International Wool Textile Organisation, 2013).

La enmienda propuesta a la Nota 2 de la Cláusula 4.2.2 fue la siguiente:

“La lana en bruto procedente de Australia, Sudáfrica y las Islas Malvinas, Uruguay y la lana en bruto Merino de Nueva Zelanda, a menos que se especifique lo contrario en un contrato, no requerirá una medición complementaria del Diámetro Medio de Fibra por IWTO-28 (‘Airflow’)” (International Wool Textile Organisation, 2013).

Esta enmienda fue aprobada oficialmente en el Congreso de la IWTO en Lille en 2025. Como resultado directo, la lana uruguaya ahora puede ser certificada directamente mediante la metodología Laserscan. Esto representa un avance significativo para la agroindustria lanera nacional, dado que simplifica el proceso de certificación y agiliza sustancialmente el comercio internacional.

REFERENCIAS

- Abella, I. y Piegas, F., 2024. Situación y perspectivas de la cadena ovina. En: Uruguay. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. *Anuario OPYPA 2024: análisis sectorial y cadenas productivas* [En línea]. Cap. 3. Montevideo: MGAP y OPYPA. [Consulta: 23 de enero de 2025]. Disponible en: <https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/Anuarioopypa2024/CP3/CP3web/CP3-Cadenaovina.pdf>.
- Altman, D. G. y Bland, J. M., 1983. Measurement in medicine: the analysis of method comparison studies. En: *The Statistician*, 32(3), pp. 307-317.
- Baxter, B. P., 1998. Comparison of Laserscan, OFDA and airflow on raw wool samples. En: IWTO. *IWTO Raw Wool Group Conference, Nice, December 1998* [En línea]. Bruselas: IWTO. [Consulta: 01 de febrero de 2025]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/269991416_Comparison_of_Laserscan_OFDA_and_airflow_on_raw_wool_samples.
- Baxter, B. P., 1999. Influences on comparisons between the mean fibre diameter of wools measured by airflow and by projected image methods. En: *Wool Technology and Sheep Breeding*, 47(4), pp. 263-274.
- Buonaccorsi, J. P., 1996. Measurement error in the response in the general linear model. En: *Journal of the American Statistical Association*, 91(436), pp. 1614-1622.
- Dawes, A. L.; Cranswick, P. M. y Knowles, D. G., 2018. The relationship between mean fibre diameter measurements by airflow and Laserscan for Falkland Islands wool. En: IWTO. *87th Annual Congress*. Hong Kong, China, (14-16 de mayo de 2018). Bruselas: IWTO. (Submission No: RMG Sub 01)
- Downes, J. G., 1992. The effect of the ellipticity of fibres on diameter measurement by the airflow method. En: *Journal of the Textile Institute*, 83(2), pp. 245-252.
- Heath, W. A.; Barkhuizen, J. W. y Wright, O. E., 2006. The relationship between mean fibre diameter measurements by airflow and Laserscan for South African Wools. En: International Wool Textile Organization. *IWTO Technology & Standards Committee, Raw Wool Group. Cairo Meeting, Report RWG 03*. Bruselas: IWTO.
- International Wool Textile Organization, 2006. *IWTO-52: Conditioning procedures for testing textiles*. Bruselas: IWTO.
- International Wool Textile Organisation, 2012. *IWTO-12: Measurement of the mean and distribution of fibre diameter using the Sirolan-Laserscan fibre diameter analyser*. Brussels: IWTO.
- International Wool Textile Organisation, 2013. *IWTO-28: Determination by the airflow method of the mean fibre diameter of cores samples of raw wool*. Brussels: IWTO.
- International Wool Textile Organization, 2020. *IWTO-0: Introduction to IWTO Specifications: procedures for the development, review, progression or relegation of IWTO Test Methods and Draft Test Methods*. Bruselas: IWTO.
- International Wool Textile Organization, 2023. *IWTO core test regulations: IWTO core test regulations*. Bruselas: IWTO.
- International Wool Textile Organization, 2025. *IWTO Congress 2025* [En línea]. Bruselas: IWTO. [Consulta: 26 de septiembre de 2025]. Disponible en: <https://iwto.org/congress-2025/>

- Piegas, F., 2024. *Diagnóstico y caracterización de la cadena ovina en Uruguay* [En línea]. Montevideo: MGAP y OPYPA. [Consulta: 13 de enero de 2025]. Disponible en: <https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/Anuarioopypa2024/ESTUDIOS/13/E13web/E13-Diagnosticoycaracterizacion.pdf>
- Richards, N., 1954. *The effect of oil and other changes on the results obtained by the airflow method for measuring wool fibre diameter*. Bruselas: IWTO. (IWTO Technical Report).
- Secretariado Uruguayo de la Lana, SUL, s.d. *Secretariado Uruguayo de la Lana* [En línea]. Montevideo: SUL. [Consulta: 12 de enero de 2025]. Disponible en: <https://www.sul.org.uy/>
- Sommerville, P., 2007. *Fundamental principles of fibre fineness measurement*. Kensington: AWTA Ltd.
- Uruguay. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, 2023. *Anuario Estadístico Agropecuario 2023* [En línea]. Montevideo: MGAP. [Consulta: 12 de enero de 2025]. Disponible en: <https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Anuarios/Anuario2023/ANUARIO2023WEB.pdf>