

**UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC FACULTAD
DE INGENIERÍA**

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



Informe de Investigación

Efecto del teñido con colorantes naturales y mordientes de la fibra de alpaca (*Vicugna pacos*) sobre las propiedades físico-mecánicas, parámetros de colorimetría e hidrofobicidad

Presentado por:

P.hD. Fulgencio Vilcanqui Pérez
Dra. Guadalupe Chaquilla Quilca
M.Sc. Víctor Hugo Sarmiento Casavilca
M.Sc. Luis Fernando Pérez Falcón
M.Sc. Alfredo Fernández Ayma
Mg. Arturo Quispe Quispe
Dr. Anderson Núñez Fernández
Mtro. Franklin Lozano Cusi
Bach. Shirley Coraima Allca Salas

Abancay, Perú

2026



"Año de la Esperanza y el fortalecimiento de la Democracia"

Tamburco, 21 de septiembre del 2026

CARTA N° 0863-2026-VRIN-UNAMBA

Señor
PhD. Fulgencio Vilcanqui Perez
DOCENTE -UNAMBA

Presente. -

ASUNTO: Remito dictamen favorable al trabajo de investigación

REF.: Carta N° 019-2026-FMVZ-UNAMBA-ABANCAY

Reg.1921-2026

De mi mayor consideración;

Previo un cordial saludo, me dirijo a usted, con la finalidad de remitir el informe del dictamen favorable, de la Comisión evaluadora del informe final de trabajo de investigación titulado: **"Efecto del teñido con colorantes naturales y mordientes de la fibra de alpaca (Vicugna pacos) sobre las propiedades físico-mecánico, parámetros de colorimetría e hidrofobicidad"**, a su cargo, para su conocimiento y trámite corresponde.

Sin otro en particular, me despido de usted.

Atentamente;


UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS
DE APURIMAC
Dr. Wilson J. Mollocondo Flores
VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN

Recibido
28/09/26
Jnd

C.c.:
Archivo
WJMF/VRIN
Cleofe A.

vrin@unamba.edu.pe

Sede Principal: Ciudad Universitaria Av. Inca Garcilazo de la Vega S/N



Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional

CONSTANCIA N°285-2026-D.UIFI-UNAMBA

EL DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL
MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC

HACE CONSTAR:

Que el recurrente, **PhD. Fulgencio Vilcanqui Pérez**, en su calidad de coordinador del grupo de investigación "**Investigación e Innovación para el Desarrollo Agroindustrial de Apurímac (IDEA)**", presentó el trabajo de investigación titulado:

Efecto del teñido con colorantes naturales y mordientes de la fibra de alpaca (*Vicugna pacos*) sobre las propiedades físico-mecánicas, parámetros de colorimetría e hidrofobicidad

con la finalidad de someterlo al **filtro de similitud**, de conformidad con lo establecido en los artículos 30 y 31 del Reglamento de Investigación vigente.

Para la verificación de la originalidad del documento, se empleó el software **Turnitin**, aplicándose los siguientes criterios metodológicos de configuración del análisis:

- *Excluir citas*
- *Excluir bibliografía*
- *Excluir fuentes 18 palabras*

Como resultado del proceso de verificación, el trabajo de investigación presentó un **índice de similitud del 14 %**, de acuerdo con los resultados consignados en el reporte de similitud correspondiente, que se adjunta a la presente constancia.

Se expide la presente **Constancia de similitud** a solicitud del interesado, a los **veintinueve (29) días del mes de setiembre del año dos mil veintiséis**, para los fines académicos y administrativos que estime pertinentes.

C. c:
Archivo/
WHC/D-UIFI
YOVANA /SEC
REG. N° 1009

Atentamente

Dr. Wolquir Calsin
DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA



Agradecimiento

El Grupo de Investigación e Innovación para el Desarrollo Agroindustrial de Apurímac (IDEA) expresa su sincero agradecimiento a la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac por el soporte financiero otorgado para la realización de la presente investigación, aprobada mediante Resolución N.º 011-2024-(2)-CU-UNAMBA.



Dedicatoria

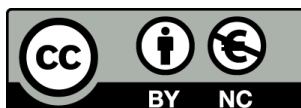
A nuestros estudiantes, por analizar, evaluar y cuestionar nuestros conocimientos.



Efecto del teñido con colorantes naturales y mordientes de la fibra de alpaca (*Vicugna pacos*) sobre las propiedades físico-mecánicas, parámetros de colorimetría e hidrofobicidad.

Línea de investigación: Gestión de la Inocuidad alimentaria y Bioprocesos para el Desarrollo de la Cadena Agroindustrial.

Esta publicación está bajo una Licencia Creative Commons



ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
CAPÍTULO I	5
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.1 Descripción del problema	5
1.2 Enunciado del Problema	6
1.2.1 Problema general	6
1.2.2 Problemas específicos	6
1.2.3 Justificación de la investigación	6
CAPÍTULO II	6
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	8
2.1 Objetivos de la investigación	8
2.2.1 Objetivo general	8
2.2.2 Objetivos específicos	8
2.2 Hipótesis de la investigación	8
2.2.3 Hipótesis general	8
2.2.4 Hipótesis específicas	9
2.3 Operacionalización de variables	10
CAPÍTULO III	11
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	11
3.1 Antecedentes	11
3.2 Marco teórico	12
3.2.1 Fibra de alpaca	12
3.2.2 Colorantes naturales	13
3.2.3 Antraquinonas de origen animal (cochinilla)	14
3.2.4 Mordientes	15
3.2.5 Propiedades físico-mecánicas de las fibras de alpaca	16
3.2.6 Mordientes utilizados en el teñido de fibras de alpaca	16
3.2.7 Tipos de mordientes para el teñido de fibras de alpaca	17
3.2.8 La hidrofobicidad	18
3.3 Marco conceptual	18



CAPÍTULO IV	20
METODOLOGÍA	20
4.1 Tipo y nivel de investigación	20
4.2 Diseño de la investigación	20
4.3 Descripción ética de la investigación	20
4.4 Población y muestra (si corresponde)	20
4.5 Procedimiento	21
4.5.1 Extracción de colorantes	21
4.5.2 Teñido de hilos de Vicugna pacos	21
4.6 Técnica e instrumento	22
4.6.1 Evaluación de las propiedades físico-mecánicas	22
4.6.2 Pruebas de hidrofobicidad	22
4.6.3 Parámetros de colorimetría	22
4.6.4 Pruebas de solidez del color	23
4.7 Análisis estadístico	23
CAPÍTULO V	25
RESULTADOS Y DISCUSIONES	25
5.1 Análisis de resultados	25
5.1.1 Propiedades Físico-Mecánicas	25
5.1.2 Parámetros de colorimetría	26
5.1.3 Solidez al lavado	28
5.1.4 Solidez al frote	29
5.1.5 Propiedades de hidrofobicidad	30
5.2 Contrastación de hipótesis	31
5.2.1. Propiedades físico-mecánicas	31
5.2.2. Intensidad de color	31
5.2.3 Hidrofobicidad	32
5.3 Discusión	32
CAPÍTULO VI	36
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	36
6.1 Conclusiones	36
6.2 Recomendaciones	37
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
ANEXOS	47

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 — Operacionalización de variables (teñido con colorante natural rojo)	10
Tabla 2 — Tratamientos con colorantes naturales y mordientes para el teñido	21
Tabla 3 — Propiedades físico-mecánicas de hilos de Vicugna pacos, teñidas con colorantes naturales.	26
Tabla 4 — Parámetros de colorimetría	28
Tabla 5 — Resultados de la evaluación de solidez al lavado	29
Tabla 6 — Resultados de la evaluación de solidez al frote	29
Tabla 7 — Ángulo de contacto de hilos de alpaca teñida	30

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 — Componentes del vellón. McGregor (2018).	13
Figura 2 — Agrupación de colorantes por especie. Marcano (2018).	14
Figura 3 — Composición química de la cochinilla. Gibaja (1998)	15
Figura 4 — Graphical abstract (Resumen): Dyeing process and measurement of physico-mechanical properties of the samples	47

INTRODUCCIÓN

La fibra obtenida de Alpaca (*Vicugna pacos*), ha sido un recurso esencial en la industria textil a lo largo de la historia, destacándose por su suavidad, finura y notable capacidad de aislamiento térmico (Díaz-Garay et al., 2021). Originaria de las regiones andinas, esta fibra no solo goza de ventajas técnicas, como su excepcional finura y resistencia térmica; además, se ha consolidado como un referente en sostenibilidad y responsabilidad social (Jankowska et al., 2021).

En un contexto en que se revalorizan los materiales con menor impacto ambiental, la alpaca impulsa el desarrollo económico en zonas vulnerables al tiempo que preserva prácticas culturales ancestrales (Lieberman, 2021). Además, la creciente demanda de productos textiles da sostenibilidad y desarrollo.

El empleo de colorantes naturales ha adquirido especial interés en este ámbito, ya que permite incorporar técnicas tradicionales al mismo tiempo que se minimiza el impacto ambiental (Pizzicato et al., 2023). En este sentido, colorantes como la cochinilla (*Dactylopius coccus*), rica en ácido carmínico, facilitan la obtención de tonalidades rojas intensas y estables, principalmente cuando se utilizan en conjunto con mordientes como el alumbre ($KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$), que potencian la adherencia y durabilidad del tinte en la fibra (Rodríguez et al., 2005; Gibaja, 1998). De igual forma, el airampo (*Opuntia soehrensii* Britton & Rose), fuente de pigmentos carotenoides como la bixina, ofrece tonos amarillo-anaranjados notables por su estabilidad química frente a variaciones del pH y la temperatura (Caldas-Cueva et al., 2016). Los mordientes, además de asegurar la fijación del color, mejoran las propiedades fisicoquímicas de la fibra, incrementando su tenacidad y elasticidad (Caldas-Cueva et al., 2016; Mathur y Gupta, 2003), lo que refuerza la apuesta por una moda que combine estética y funcionalidad de forma sostenible (Kumar y Agarwal, 2009).

Diversos estudios reportados en la literatura científica han enfatizado la importancia de analizar las propiedades físico-mecánicas como la tenacidad y el módulo de Young que garantizan la integridad estructural de los tejidos elaborados con hilos de fibra de alpaca (Jankowska et al., 2021). Por otro lado, la evaluación de parámetros de colorimetría, tales como la luminosidad y la cromaticidad, es determinante para la aceptación estética de los productos textiles, mostrando que, con una optimización adecuada del proceso de teñido, los colorantes naturales pueden



alcanzar la calidad de los métodos tradicionales (Ferdush et al., 2022). La solidez del color, verificada mediante pruebas de lavado y fricción, se beneficia de la acción estabilizadora de los mordientes, mientras que la hidrofobicidad evaluada a partir del ángulo de contacto ofrece valiosa información sobre la interacción de la fibra con su entorno y su rendimiento a largo plazo (Narayanaswamy et al., 2013 y Sureshkumar et al., 2021).

La investigación se orienta a evaluar el impacto del teñido con colorantes naturales y mordientes en el hilo de la fibra de alpaca, centrándose en sus propiedades físico-mecánicas, los parámetros de colorimetría y la hidrofobicidad. Entre los objetivos se encuentra determinar cómo el proceso de teñido influye en parámetros como la fuerza máxima y la elongación, medir indicadores como la luminosidad y la cromaticidad, y analizar la durabilidad del tinte ante ensayos de lavado. Asimismo, se busca establecer la relación entre la aplicación de estos colorantes y la resistencia química del hilo, lo que contribuye a la optimización de procesos sostenibles en la industria textil mediante la fusión de la tradición con la innovación para satisfacer exigencias contemporáneas en términos de calidad y responsabilidad ambiental (Cruz et al., 2021).

Finalmente, los hallazgos derivados de este estudio tienen un alcance significativo en la ciencia de materiales y la tecnología textil, ya que pueden impulsar la producción de textiles de lujo con un marcado enfoque en la sostenibilidad. Esta línea de investigación no solo moderniza los procesos productivos y preserva métodos artesanales tradicionales, sino que también refuerza la identidad cultural de las regiones productoras de alpaca, en consonancia con las tendencias globales hacia prácticas más responsables y respetuosas con el medio ambiente (Cruz et al., 2021 y Gardetti, 2016).



RESUMEN

Se investigó el efecto del teñido con colorantes naturales sobre las propiedades físico-mecánicas, parámetros colorimétricos, hidrofobicidad y solidez del color de hilos de alpaca (*Vicugna pacos*). Se evaluaron dos tintes de los Andes: cochinilla (*Dactylopius coccus*) y Airampo (*Opuntia soehrensii*), utilizando un método de post-mordentado con sulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{SO}_4(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), ácido oxálico ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$). El análisis de los resultados mostró que los tratamientos de teñido no afectaron significativamente la elongación (51–65%), la resistencia máxima (1.64–1.94 N), o la tenacidad (0.93–1.10 MPa) de los hilos. Con respecto a la colorimetría, la cochinilla produjo tonos rojos intensos ($a^* = 34.95$) y la saturación más alta (C^*) de hasta 40.29. Mientras tanto, el Airampo generó tonos amarillos cálidos y brillantes (L^*) de hasta 70,19. Un hallazgo crítico fue la baja solidez al lavado, con puntuaciones de 1 a 2 en la escala de grises. Sin embargo, la solidez al frote varió de moderada a buena (de 2 a 4-5). El teñido con cochinilla pura aumentó la hidrofobicidad del hilo, alcanzando un ángulo de contacto de $97,22^\circ$. Estos resultados indican que, si bien los tintes ofrecen una rica gama de colores sin comprometer la fibra, es esencial optimizar el proceso para mejorar la fijación del color antes de su comercialización.

Palabras clave: *Vicugna pacos*, *teñido sostenible*, *cochinilla*, *airampo*, *solidez del color*, *propiedades mecánicas*.



ABSTRACT

The effect of dyeing with natural colorants on the physico-mechanical properties, colorimetric parameters, hydrophobicity, and color fastness of alpaca threads (*Vicugna pacos*) was investigated. Two dyes from the Andes were evaluated: cochineal (*Dactylopius coccus*) and Airampo (*Opuntia soehrensii*), using a post-mordanting method with sodium sulfate (Na_2SO_4 (SO_4) $_2$ ·12H $_2$ O), oxalic acid (C $_2$ H $_2$ O $_4$). The analysis of the results showed that the dyeing treatments did not significantly affect the elongation (51–65%), maximum strength (1.64–1.94 N), or tenacity (0.93–1.10 MPa) of the threads. Regarding colorimetry, cochineal produced intense red shades ($a^* = 34.95$) and the highest saturation (C^*) of up to 40.29. Meanwhile, Airampo generated warm, bright yellow tones (L^*) up to 70.19. A critical finding was the low wash fastness, with ratings of 1 to 2 on the grayscale. However, the rub fastness ranged from moderate to good (2 to 4–5). Dyeing with pure cochineal increased the hydrophobicity of the thread, reaching a contact angle of 97.22°. These results indicate that, although the dyes offer a rich color range without compromising the fiber, it is essential to optimize the process to improve color fixation before commercialization.

Keywords: *Vicugna pacos*, sustainable dyeing, cochineal, airampo, color fastness, mechanical properties



CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

En los últimos años, hubo un incremento en el interés del uso de tecnologías verdes en la industria textil, debido a que los colorantes sintéticos a base de productos químicos procesados son perjudiciales para el medio ambiente y para los organismos vivos (Mia et al., 2019). Específicamente, los colorantes sintéticos tienen en su contenido grupos funcionales tóxicos en las moléculas de tinte, como metino, azo, nitro, antraquinona, aril metano, carbonilo y otros; sin embargo, lamentablemente los seres vivos son puestos en peligro debido principalmente a la contaminación del suministro de agua y los efluentes (Rahman et al., 2021).

El proceso de teñido de fibras de alpaca utilizando colorantes naturales se ve afectado por diversos factores, como el uso de mordientes, los cuales pueden tener un impacto en las propiedades físico-mecánicas y la hidrofobicidad de las fibras teñidas. Estas propiedades incluyen la resistencia a la tracción, el módulo de tracción, el alargamiento a la rotura y la hidrofobicidad (McGregor, 2018). Además, la baja difusión del colorante, la baja solubilidad en agua del tinte y los procesos que requieren de mucho tiempo, acentúan los problemas del teñido con colorantes naturales de la fibra de alpaca (Jara-Morante, et al., 2023). Por lo que es importante identificar los mordientes en el proceso de teñido a fin de mejorar la adherencia del colorante a las fibras, así como para generar tonos y matices en el proceso de teñido (Yi & Cho, 2007).

En el Perú, específicamente en la región Apurímac, no se otorga un valor agregado a la fibra de alpaca y en la actualidad es comercializada solo como materia prima y a precios bajos, muy a pesar de que en el mercado exterior, productos a base de la fibra de alpaca son muy apreciadas y por ende los precios son bastante favorables para el intermediario; sin embargo, no benefician a los comuneros productores de la fibra, quienes apenas sobreviven en la pobreza por sus bajos niveles de ingreso económico.



En este sentido, hasta el momento, no se ha realizado una investigación profunda sobre cómo el proceso de teñido con colorantes naturales (cochinilla, Airampo y otras fuentes) y la adición de mordientes, afectan las propiedades físico-mecánicas y la hidrofobicidad de las fibras teñidas con colorantes naturales (Gürkan Ünal et al., 2019). Por lo tanto, fue necesario llevar a cabo un estudio que analice la influencia del colorante y el mordiente en estas propiedades físico-mecánicas.

1.2 Enunciado del Problema

1.2.1 Problema general

¿Cuál es el efecto del teñido con colorantes naturales (cochinilla y airampo) y mordientes sobre las propiedades físico-mecánicas, la intensidad de color y la hidrofobicidad de la fibra de alpaca?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuál será el efecto del teñido con diferentes fuentes naturales de coloración roja (cochinilla y airampo) y el uso de diversos mordientes sobre las propiedades físico-mecánicas de la fibra de alpaca?
- ¿Cómo influye el teñido con fuentes naturales de coloración roja (cochinilla y airampo) y diferentes mordientes sobre las propiedades de colorimetría e hidrofobicidad de la fibra de alpaca?
- ¿Cuál será el impacto de las fuentes naturales de coloración roja (cochinilla y airampo) y mordientes sobre la solidez del color de la fibra de alpaca teñida?

1.2.3 Justificación de la investigación

Apurímac es una de las regiones de mayor producción nacional de los camélidos sudamericanos, específicamente la alpaca ocupando el quinto lugar con 219,113 cabezas. Las dos provincias de mayor importancia son Antabamba y de Aymaraes. Las comunidades del distrito de Cotaruse, consideradas en el estudio, son las más importantes en esta última provincia. A pesar de su importancia socioeconómica, poco se conoce sobre la calidad de la fibra producida en estas áreas, aunque se han hecho esfuerzos para mejorar la calidad de la fibra con la

introducción de reproductores de las poblaciones de Puno y Cusco (Machaca et al., 2017).

Respecto al teñido de la fibra de alpaca con colorantes naturales, es una práctica ancestral; sin embargo, no existen información científica a esta tecnología y los procedimientos estudios sistematizados. A pesar de existir algunos estudios sobre el teñido de fibras de alpaca con colorantes naturales, hasta el momento no se ha realizado una investigación exhaustiva sobre el efecto del uso de colorantes y mordientes, en las propiedades físico-mecánicas y la hidrofobicidad de las fibras teñidas con colorantes naturales (Wang et al., 2005). Por lo tanto, esta investigación es importante ya que el proceso de teñido de las fibras de alpaca con colorantes naturales se ve afectado por el uso de mordientes, lo cual puede influir en propiedades físico-mecánicas importantes como la resistencia a la tracción, el módulo de tracción, el alargamiento a la rotura y la hidrofobicidad (absorción de agua) (Gürkan Ünal et al., 2019). Al realizar este estudio, se espera optimizar el proceso de teñido y mejorar la calidad de los productos textiles artesanales teñidos con colorantes naturales, lo cual beneficiaría tanto a los productores de alpaca como a los consumidores de productos textiles naturales. Por lo tanto, esta investigación es justificada y necesaria para avanzar en el conocimiento sobre el teñido de fibras de alpaca con colorantes naturales.

Finalmente se debe indicar que es Escuela Académico Profesional de Ingeniería Agroindustrial (EAPIA) cuenta con una línea de investigación consolidada: Caracterización, desarrollo de procesos e innovación en la agroindustria. Además, el grupo de investigación Innovación para el Desarrollo Agroindustrial de Apurímac (IDEA) cuenta con profesores investigadores RENACYC.



CAPÍTULO II

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivos de la investigación

2.2.1 Objetivo general

Evaluar el efecto del teñido con colorantes naturales y mordientes de la fibra de alpaca sobre las propiedades físico-mecánicas, intensidad de color e hidrofobicidad.

2.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de diferentes fuentes naturales de coloración roja, tales como la cochinilla, el Airampo y el uso de diferentes mordientes en el teñido de fibras de alpaca sobre las propiedades físico-mecánicas.
- Evaluar las propiedades de colorimetría, hidrofobicidad de fibras de alpaca teñidas con fuentes naturales rojas, como la cochinilla, el Airampo y diferentes mordientes.
- Evaluar el impacto de varias fuentes naturales de coloración roja, como la cochinilla, el Airampo y mordientes en la solidez del color de fibras de alpaca teñidas.

2.2 Hipótesis de la investigación

2.2.3 Hipótesis general

El teñido con colorantes naturales y mordientes de la fibra de alpaca influirá favorablemente en las propiedades físico-mecánicas, intensidad de color e hidrofobicidad.



2.2.4 Hipótesis específicas

- El uso de diferentes fuentes naturales de coloración roja, como la cochinilla, el airampo y mordientes, tiene un efecto positivo en las propiedades físico-mecánicas de las fibras, como la resistencia a la tracción, el módulo de tracción.
- Las fibras de alpaca teñidas con fuentes naturales rojas, como la cochinilla, el airampo y mordientes presenta diferencias en sus características de intensidad de color (luminosidad, croma, fuerza de color, entre otras).
- La utilización de diversas fuentes naturales de coloración roja, como la cochinilla, el airampo y distintos mordientes influye en las propiedades de hidrofobicidad de las fibras de alpaca.



2.3 Operacionalización de variables

En la Table 1, se encuentra la operacionalización de variables.

Tabla 1 — Operacionalización de variables (teñido con colorante natural rojo)

VARIABLES	INDICADOR	ÍNDICE
INDEPENDIENTE		
Fuentes naturales de color rojo y mordientes	Patrón (sin colorante)	Adimensional
	Cochinilla	
	Cochinilla+mordiente A	
	Cochinilla+mordiente B	
	Cochinilla+mordiente C	
	Ayrampu	
	Ayrampu+mordiente A	
	Ayrampu+mordiente B	
	Ayrampu+mordiente C	
DEPENDIENTES		
Propiedades físico-mecánicas	Resistencia a la tracción	Kpa
	Módulo de tracción	GPa
	Alargamiento a la rotura.	%
Parámetros de colorimetría	L*	Adimensional
	a*	
	b*	
	K/S	
Hidrofobicidad	Área	cm²
	Masa de la muestra	g
	Volumen del agua absorbido	ml
	Angulo de contacto	°(grados)
Solidez del color de la fibra teñida	Solidez al frote	Escalas definidas por ISO 105 B02 2014.
	Solidez al lavado	
	Resistencia a la luz	

Airampo: Opuntia Soehrensii Britt & Rose

Cochinilla: Coccidae Dactylopius

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1 Antecedentes

- a) Según Arju et al. (2021), realizaron estudios sobre las propiedades físico-mecánicas y térmicas de los compuestos de matriz de propileno (PP). Los estudios se realizaron con el objetivo de mejorar las propiedades de los compuestos de yute y matriz de propileno mediante la adición de tintes reactivos y productos químicos. Estos estudios han demostrado que la adición de tintes reactivos y productos químicos puede mejorar significativamente las propiedades físico-mecánicas y térmicas de los compuestos de yute y matriz de propileno. Se han investigado diferentes tipos de tintes reactivos y productos químicos, y se ha encontrado que su adición puede mejorar la resistencia a la tracción, la resistencia al impacto, la resistencia al calor y la estabilidad dimensional de los compuestos. Además, la adición de tintes reactivos y productos químicos también puede mejorar la capacidad de los compuestos para resistir la degradación causada por la radiación ultravioleta y mejorar su resistencia al envejecimiento (Arju & Afsar, 2021).

- b) Ranhaman et al. (2019), reportaron sobre la utilización de tintes en los compuestos a base de yute/ polipropileno y yute/ polietileno lineal de baja densidad, con impacto significativo en las propiedades físicas y mecánicas de estos materiales compuestos. El tinte afecta la interacción entre las fibras de yute y la matriz polimérica, lo que a su vez podría influir en la resistencia mecánica, la rigidez, la absorción de agua y otros aspectos relacionados. Además, la temperatura es un parámetro crítico que afecta las propiedades de los compuestos. Las altas temperaturas pueden provocar cambios estructurales y químicos en los materiales poliméricos, lo que a su vez podría alterar sus propiedades físicas y mecánicas. Por lo tanto, es importante investigar cómo el tinte y la temperatura pueden influir en las propiedades físico-mecánicas de los compuestos a base de yute/polipropileno y yute/ polietileno lineal de baja densidad. Este conocimiento podría ser útil para optimizar la formulación de estos materiales y mejorar su rendimiento en aplicaciones específicas (Niloy Rahaman et al., 2017).



- c) En el estudio realizado por Sahadat et al. (2017), tuvo como objetivo evaluar el efecto de la adición de un disacárido (sacarosa), la radiación gamma y la temperatura en las propiedades físicas y mecánicas de un composite de resina de poliéster insaturado reforzado con tejidos de yute. Se observó que la adición de sacarosa mejoró las propiedades mecánicas del composite y redujo la degradación causada por la radiación gamma. Además, se encontró que el aumento de la temperatura disminuyó la resistencia mecánica del composite. Estos hallazgos son relevantes para el desarrollo de materiales compuestos con propiedades mejoradas para diversas aplicaciones industriales (Sahadat Hossain et al., 2017).
- d) Riccieri et al. (1999), investigó las propiedades interfaciales y el proceso inicial de sorción de agua en compuestos de poliéster insaturado unidireccional/fibra vegetal. Los investigadores examinaron cómo la adición de fibras vegetales afecta la interfaz entre el poliéster y la fibra, así como la capacidad de absorción de agua del compuesto. Se encontró que la incorporación de fibras vegetales mejoró las propiedades mecánicas del compuesto y redujo la capacidad de absorción de agua. Estos resultados sugieren que los compuestos de poliéster insaturado/fibra vegetal podrían ser una opción prometedora para aplicaciones en las que la resistencia al agua es importante (Sahadat Hossain et al., 2017).

3.2 Marco teórico

3.2.1 Fibra de alpaca

Existen dos razas de alpaca, la Huacaya y la Suri, la diferencia está en los risos, la raza suri presenta fibra más lacia y de mayor longitud en cambio la fibra de Huacaya es más risada (ondulada) y de menor longitud (Figura 2). Estos animales habitan en las alturas y es criado por su fibra que sirve como sustento económico después de la venta por parte de la población altoandina. La fibra de alpaca es caracterizada por ser una fibra de alta calidad y a su vez bastante cotizada por sus características de suavidad aparte de ser lujosa existen varias tonalidades y tiene mucha demanda por el mercado extranjero (Obando et al., 2021).



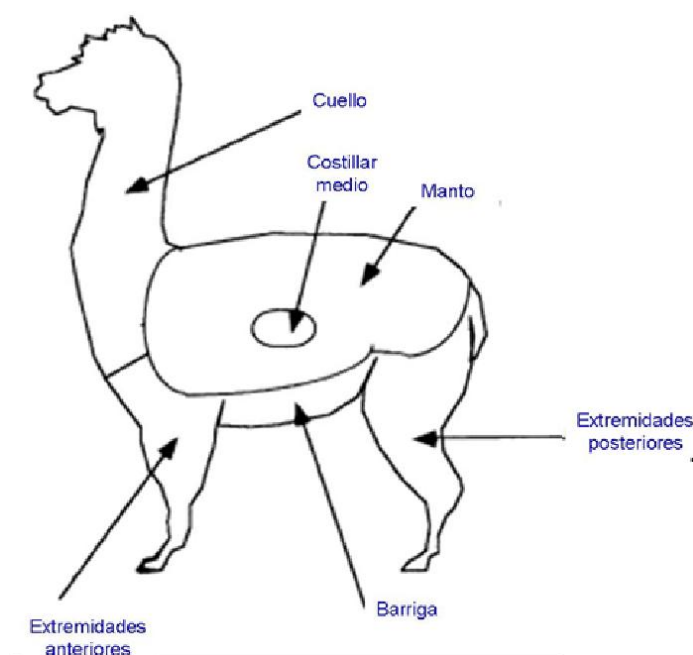


Figura 1 — Componentes del vellón. McGregor (2018).

3.2.2 Colorantes naturales

Los colorantes naturales utilizados en el teñido de fibras son compuestos orgánicos que se extraen de fuentes naturales como plantas, flores, raíces, frutas, insectos y minerales (Figura 3). Estos colorantes ofrecen una alternativa ecológica y sostenible a los colorantes sintéticos, ya que no contienen productos químicos nocivos ni generan efluentes tóxicos. Los colorantes naturales tienen una larga historia de uso y se han empleado desde la antigüedad en diversas culturas y civilizaciones. Sin embargo, con el desarrollo de la industria química y la síntesis de colorantes artificiales, los colorantes naturales fueron perdiendo protagonismo y quedando relegados a un uso marginal o artesanal (Kumar & Agarwal, 2009).

No obstante, en las últimas décadas se ha producido un resurgimiento del interés por los colorantes naturales, debido a varios factores, como la conciencia ecológica, la búsqueda de alternativas más saludables y sostenibles, la valorización del patrimonio cultural y la diversidad biológica, entre otros (Eyupoglu et al., 2023). Los colorantes naturales presentan ventajas frente a los sintéticos, como su menor toxicidad, su mayor biodegradabilidad, su menor impacto ambiental y su potencial valor añadido como fuente de compuestos bioactivos.

Dentro de los usos podemos agrupar las materias colorantes como aquellas destinadas a: Cerámicas y vidrios, Alimentos, drogas y cosméticos, Plásticos, Pinturas y barnices, Textiles y otras fibras, Fotografía y sensibilizadores fotográficos, Tintas tipográficas, Abrillantadores y fluorescentes (Marcano, 2018).

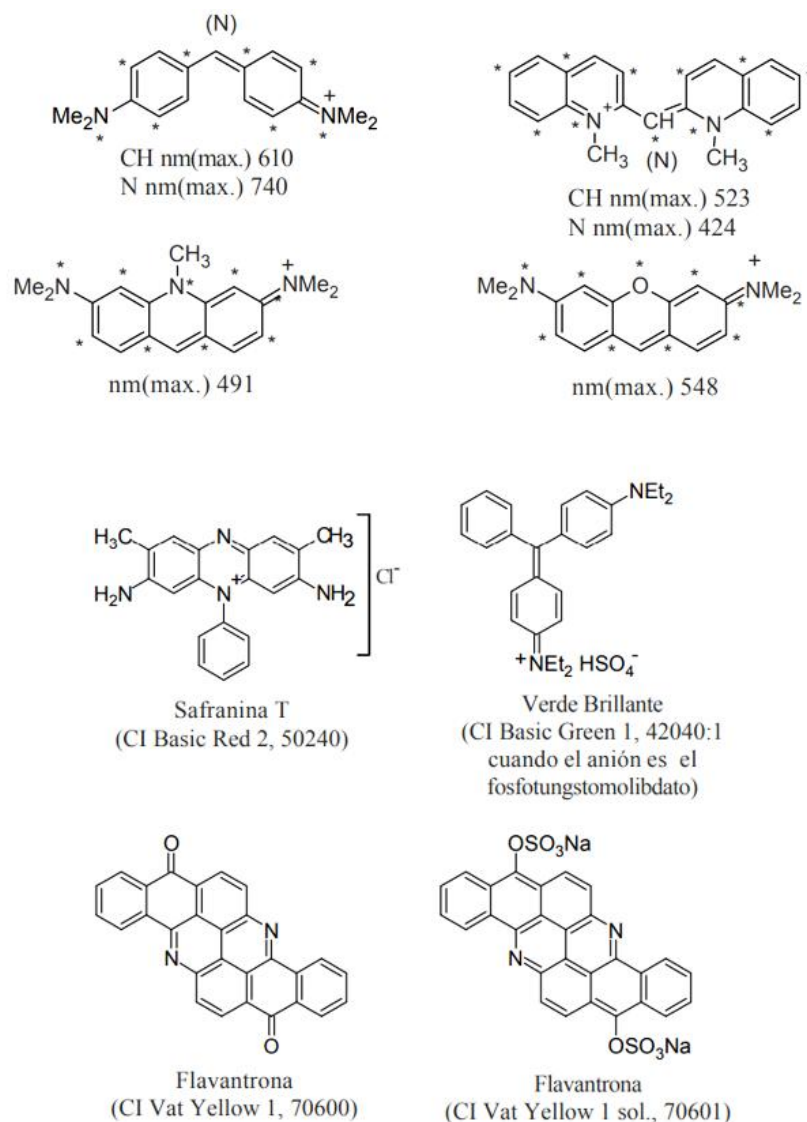


Figura 2 — Agrupación de colorantes por especie. Marcano (2018).

3.2.3 Antraquinonas de origen animal (cochinilla)

El más importante de este grupo es la “cochinilla”, o extracto de cochinilla, cuyo principio colorante es el ácido carmínico (un derivado glucosidado del ácido kermésico) CI Natural Red 4, 75470 (Figura 4). El carmín es la laca de aluminio o de aluminio y calcio, sobre un sustrato de alúmina hidratada. El carmín contiene aproximadamente un 50% de ácido carmínico el cual a su vez representa el 10% del peso del cuerpo seco de la hembra de *Coccus cactis*, (cochinilla) que habita en los nopales mexicanos, en su origen (Gibaja, 1998).

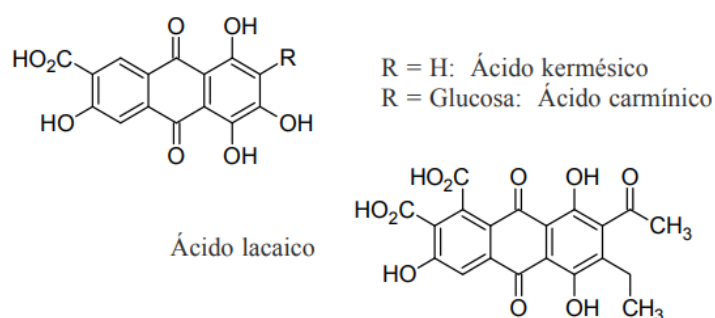


Figura 3 — Composición química de la cochinilla. Gibaja (1998)

3.2.4 Mordientes

Los mordientes utilizados en el teñido de fibras son sustancias químicas que se utilizan para mejorar la adherencia del colorante a las fibras y generar diferentes tonos y matices en el proceso de teñido. Estos mordientes pueden ser sales metálicas, como el sulfato de aluminio, el sulfato de hierro y el cloruro de estaño, o sustancias orgánicas, como el tanino, entre otras (Ding & Freeman, 2017).

El uso de mordientes en el proceso de teñido de fibras se basa en el principio de formación de complejos químicos entre los iones metálicos del mordiente y los grupos funcionales presentes en las fibras. Estos complejos ayudan a que los colorantes se adhieran de manera más eficiente a las fibras, lo que mejora la solidez del color y además permite obtener tonos y matices más intensos. Además, los mordientes también pueden tener un efecto en la resistencia al lavado y a la luz de los colorantes aplicados a las fibras (Manhita et al., 2011). Algunos estudios sugieren que ciertos mordientes pueden aumentar la resistencia de los colorantes al lavado y la luz, mientras que otros pueden disminuirla. Por lo tanto, es importante mencionar que la elección del mordiente adecuado dependerá del tipo de colorante utilizado, el tipo de fibra teñida y el resultado deseado. Por lo tanto, es fundamental realizar investigaciones y pruebas previas para determinar cuál es el mordiente más adecuado para cada caso específico (CuSO_4 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y FeSO_4) (Haque et al., 2022).

3.2.5 Propiedades físico-mecánicas de las fibras de alpaca

Según Espert et al. (2004), señala que las fibras de alpaca poseen diversas propiedades físico-mecánicas que las hacen altamente valoradas en la industria textil. Algunas de estas propiedades son:

- **Finura.** La finura de las fibras de alpaca se refiere a su diámetro y es uno de los factores determinantes de su suavidad y calidad. Las fibras de alpaca poseen una finura menor que las fibras de lana, lo que les confiere una textura más suave y lujosa.
- **Resistencia y elongación.** Según un estudio, las fibras de alpaca (tanto Huacaya como Suri) tienen una resistencia a la tensión y una elongación similar a la lana de oveja. Esto indica que las fibras de alpaca podrían ser igual de duraderas y capaces de soportar fuerzas sin romperse.
- **Aislamiento térmico.** Debido a la estructura única de las fibras de alpaca, estas tienen una excelente capacidad de retención del calor. Esto las convierte en una opción ideal para prendas de abrigo, ya que proporcionan un alto nivel de aislamiento térmico sin agregar volumen.
- **Ligereza.** A pesar de su resistencia y capacidad de aislamiento térmico, las fibras de alpaca son ligeras en comparación con otras fibras naturales como la lana. Esto las hace ideales para prendas livianas y cómodas de usar.

3.2.6 Mordientes utilizados en el teñido de fibras de alpaca

Los mordientes son sustancias que se usan en el proceso de teñido para ayudar a fijar los tintes en los tejidos. Estos agentes pueden mejorar la adherencia del tinte, intensificar o cambiar el color, y mejorar la resistencia al desvanecimiento del tinte en la fibra. Aquí hay una lista de diferentes tipos de mordientes que se han utilizado tradicional y modernamente (Adeel et al., 2019).

3.2.7 Tipos de mordientes para el teñido de fibras de alpaca

- Alumbre (sulfato de potasio y aluminio). Es uno de los mordientes más comunes y se usa especialmente con fibras de proteína como la lana y la seda.
- Sulfato de cobre. Puede dar tonos verdosos o azulados con ciertos tintes.
- Sulfato ferroso. A menudo se utiliza para "ensuciar" o oscurecer los tintes, resultando en tonos grises, negros o marrones.
- Sulfato de cromo. Es eficaz pero menos utilizado debido a preocupaciones medioambientales y de salud.
- Sulfato de estaño. Puede brindar tonos brillantes y ricos, pero también tiene consideraciones de toxicidad.
- Ácido tánico. A menudo se utiliza como mordiente previo en fibras celulósicas como el algodón. También puede usarse en combinación con otros mordientes para mejorar la fijación.
- Ácido oxálico. A menudo se utiliza con tintes que tienen su propio mordiente, como ruibarbo.
- Leche o caseína. La proteína en la leche puede actuar como un mordiente para fibras celulósicas.
- Sal de cocina. Aunque no es un mordiente en sí mismo, la sal puede ayudar a nivelar el tinte y asegurar una distribución uniforme.
- Ceniza de plantas. Tradicionalmente se ha utilizado en algunas culturas para modificar el pH y ayudar en el mordentado.
- Urina. Históricamente se ha utilizado como fuente de amoníaco para mordentar lanas.



3.2.8 La hidrofobicidad

Se refiere a la propiedad de una fibra de repeler o resistir la absorción de agua. En el contexto de las fibras naturales, como la lana, la hidrofobicidad puede ser afectada por diferentes factores, como la estructura y composición de la fibra. Por ejemplo, la presencia de una capa exterior de lípidos en la lana hace que su superficie sea hidrofóbica, lo que significa que tiene una baja afinidad por el agua. Sin embargo, la hidrofobicidad de la fibra de alpaca puede cambiar con diferentes condiciones ambientales y tratamientos químicos (Rodríguez & Orrego, 2013).

En el caso de las fibras de lana, se ha investigado el uso de técnicas de modificación de superficie, como el tratamiento con plasma APPJ, para mejorar la adhesión y difusión del colorante sobre la fibra de lana. Estas técnicas pueden alterar la hidrofobicidad de la fibra al modificar las propiedades físicas y químicas de su superficie. Además, la absorción y desorción de agua en la lana están influenciadas por la presencia de grupos laterales polares y grupos peptídicos en las cadenas de proteínas de la fibra (Paola et al., 2006)

3.3 Marco conceptual

- a) **Colorantes naturales:** Los colorantes naturales son compuestos químicos que se obtienen directamente de fuentes naturales, como plantas, animales o minerales. Estos colorantes se utilizan para teñir materiales como fibras textiles, alimentos, cosméticos y otros productos. Existen diferentes tipos de colorantes naturales, incluyendo los vegetales, que se obtienen de plantas y contienen compuestos como carotenoides, flavonoides, antocianinas, betalainas y clorofilas. También están los colorantes animales, como el ácido carmínico, que se encuentra en el insecto de la cochinilla. Otro tipo son los colorantes minerales, que se obtienen de minerales específicos. La estructura química de los colorantes naturales puede variar, pero suelen pertenecer al grupo de las antraquinonas, que es el grupo más común de las quinonas naturales (Singh et al., 2020).
- b) **Mordientes metálicos:** Los mordientes metálicos son sustancias químicas que se utilizan en el proceso de teñido de fibras naturales para mejorar la solidez del color. Estos mordientes son sales o compuestos metálicos que actúan como agentes fijadores del color, permitiendo que los tintes se adhieran de manera más efectiva a las fibras textiles. Los metales más comúnmente utilizados como mordientes son el aluminio, el hierro, el cobre y el cromo (Uddin, 2014).



- c) **Teñido:** El proceso de teñido es una técnica utilizada para añadir color a textiles, fibras, hilados y prendas de vestir, así como a otros materiales, mediante la aplicación de colorantes o pigmentos solubles. Estos colorantes o pigmentos tienen la capacidad de unirse química o físicamente al material que se tiñe, resultando en una resistencia al lavado y a la luz (Ke et al., 2021).
- d) **Mordentado:** Es un proceso previo al teñido que implica el tratamiento de textiles con una sustancia conocida como mordiente. Los mordientes son sales metálicas o sustancias orgánicas que se utilizan para ayudar a fijar colorantes en tejidos, mejorando la adherencia del colorante a las fibras y, a menudo, intensificando o modificando el color final (Mendoza Huamani, 2018).
- e) **Post mordentado:** es una técnica utilizada en el proceso de teñido en la que el mordiente se aplica después de que el tejido ha sido teñido, en lugar de antes del teñido (pre-mordentado). El objetivo principal de esta técnica es mejorar la fijación del colorante al tejido y, a menudo, modificar o intensificar el color resultante (Mendoza Huamani, 2018).
- f) **Tinte:** Es la sustancia utilizada para cambiar el color de algo (generalmente fibras textiles, pero también cabello, alimentos, entre otros) como al proceso de aplicar dicha sustancia. Los tintes pueden ser de origen natural o sintético, y tienen la particularidad de que una vez aplicados a un material, tienen una resistencia relativa al lavado y la luz, lo que significa que el color no se desvanecerá fácilmente.



CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1 Tipo y nivel de investigación

El tipo de investigación para el proyecto fue aplicado y el nivel de investigación explicativa.

4.2 Diseño de la investigación

El presente trabajo de investigación, debido a la manipulación del factor en estudio (fuentes de colorantes naturales y mordientes) y medir el efecto (variables de respuesta) fue experimental.

4.3 Descripción ética de la investigación

Para el presente trabajo de investigación, no fue necesario contar con la autorización de las comisiones de ética.

4.4 Población y muestra (si corresponde)

El hilo de alpaca en presentación de cono fue adquirido en la empresa Michel y Cía S.A. Los mordientes utilizados fueron: collpa (sulfato de sodio – Na_2SO_4), alumbre (sulfato de aluminio y potasio dodecahidrato – $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) y sal de limón (ácido oxálico – $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$), los cuales, junto con el colorante en polvo de cochinilla, fueron adquiridos en una tienda de productos textiles en la ciudad del Cusco, Perú. Por otro lado, el colorante de airampo fue obtenido en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, Perú, mediante la separación de la pulpa a partir del fruto y un secado posterior en una estufa a 50 °C durante 24 horas.

4.5 Procedimiento

4.5.1 Extracción de colorantes

Para la extracción del colorante a partir del polvo de cochinilla, se disolvieron 800 mg del mismo en 1000 mL de agua destilada. La mezcla se calentó a 92.2 °C y se agitó constantemente durante 2 horas para favorecer la liberación del colorante. Posteriormente, se realizó un proceso de filtrado con el fin de separar los residuos sólidos y obtener un extracto limpio. En el caso del airampo, la pulpa previamente deshidratada fue sometida a un proceso de extracción sólido-líquido, utilizando agua como disolvente. Se controlaron las condiciones de extracción, con un tiempo de contacto de 15 a 30 minutos, temperatura de 30 °C y agitación constante a 180 rpm, separando al final el colorante de las semillas. Ambas extracciones se llevaron a cabo siguiendo la metodología propuesta por Arroyo et al. (2021) con algunas modificaciones.

4.5.2 Teñido de hilos de Vicugna pacos

El proceso de teñido consistió en sumergir los ovillos de hilo de alpaca en recipientes de vidrio que contenían los extractos colorantes de Airampo y cochinilla. Los hilos fueron sometidos a ebullición durante 30 minutos para facilitar la fijación del colorante. Posteriormente, se distribuyeron en tres recipientes adicionales para aplicar el post-mordentado, utilizando los mordientes específicos detallados en la Tabla 2. El procedimiento de teñido se realizó siguiendo la metodología propuesta por Quispe et al. (2025), con algunas modificaciones adaptadas a las condiciones del presente estudio.

Tabla 2 — Tratamientos con colorantes naturales y mordientes para el teñido

Tratamientos	Nombre
T ₀	Hilo de alpaca
T ₁	Hilo de alpaca + cochinilla
T ₂	Hilo de alpaca + cochinilla + alumbre ($\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)
T ₃	Hilo de alpaca + cochinilla + sal de limón ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$)
T ₄	Hilo de alpaca + cochinilla + collpa (Na_2SO_4)
T ₅	Hilo de alpaca + airampo
T ₆	Hilo de alpaca + airampo + alumbre ($\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)
T ₇	Hilo de alpaca + airampo + sal de limón ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$)
T ₈	Hilo de alpaca + airampo + collpa (Na_2SO_4)

$\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, sulfato de aluminio y potasio dodecahidrato; $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$, ácido oxálico; Na_2SO_4 , sulfato de sodio.



4.6 Técnica e instrumento

4.6.1 Evaluación de las propiedades físico-mecánicas

Las propiedades físico-mecánicas de los hilos teñidos de *Vicugna pacos* se evaluaron utilizando un texturómetro (RapidTA max) conectado a un ordenador con el programa TAdviser y TAdviser+. Se analizaron la fuerza máxima (FMAX (N)) a partir de las curvas fuerza-desplazamiento y la tenacidad (σ (MPa)), calculada como la relación entre la fuerza aplicada y la sección transversal inicial. Además, se determinó la elongación hasta la rotura (ϵ (%)) desde la curva tensión-deformación, representando el cambio porcentual en la longitud hasta el punto de rotura. El módulo de Young (E (MPa)), indicador de rigidez, se obtuvo de la pendiente inicial de la curva en la región elástica. Las pruebas se realizaron a una velocidad constante de 20 mm/min, sujetando los hilos con mordazas tipo mandíbula. Los diámetros iniciales se midieron con un microscopio óptico (Zeiss) a 100x (Jankowska et al., 2021).

4.6.2. Pruebas de hidrofobicidad

El análisis del ángulo de contacto en telas de 5 cm x 5 cm, confeccionadas a partir de los hilos, se realizó utilizando el sistema EMACO-I, desarrollado por el CITBM (Centro de Investigaciones Tecnológicas Biomédicas y Medioambientales) y registrado con la patente N° PE20231604. Este ángulo es un indicador fundamental de la capacidad de hilos para repeler líquidos, ya que ángulos mayores reflejan una mayor resistencia al agua. Las pruebas se efectuaron aplicando gotas de agua controladas de forma meticulosa en cada muestra, repitiéndose los ensayos para garantizar la fiabilidad de los datos. Posteriormente, se promediaron los resultados para minimizar posibles sesgos experimentales, lo que permitió un análisis preciso de la hidrofobicidad y la evaluación de la idoneidad de los hilos en aplicaciones que requieren resistencia al agua (Ali et al., 2018).

4.6.3 Parámetros de colorimetría

Los cambios de color en hilos teñidos, se evaluó empleando el sistema de colores CIELab (L^* , a^* , b^* , c^* y h°) y el parámetro K/S, el cual permite medir las propiedades colorimétricas de las muestras en diversas condiciones. Los parámetros evaluados incluyeron la luminosidad (L^*), que varía entre 100 (claro) y 0 (oscuro); el valor a^* , que oscila entre negativo (verde) y positivo (rojo); el



valor b^* , que se extiende desde positivo (amarillo) a negativo (azul); y el valor c^* , que representa el croma y el ángulo de matiz del color. Para realizar estas mediciones, se utilizó un espectrómetro ULS2048CL-RS-EVO (AVANTES) conectado a una esfera de integración con fuente de luz halógena de 50 mm, configurado con un ángulo de observación de 10° y bajo iluminación D65; este espectrómetro también permitió obtener los espectros de reflectancia R (%) de las muestras. Posteriormente, mediante la ecuación de Kubelka-Munk, se calcularon los valores K/S , utilizados para determinar la concentración de color en los hilos (Lindon, 2019).

$$\frac{K}{S} = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (1)$$

El croma (c^*) se determinaron utilizando la ecuación (2).

$$c^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (2)$$

El ángulo matiz (h°) se calculó utilizando los valores de las componentes cromáticas a^* y b^* , empleando la siguiente fórmula:

$$h^\circ = \arctan (b^*/a^*) \quad (3)$$

4.6.4 Pruebas de solidez del color

La solidez al lavado fue evaluada aplicando la norma ISO 105/C06:2010, para lo cual, se utilizó un launderómetro, un equipo especializado en simular condiciones controladas de lavado. Las muestras fueron sometidas a un lavado a 40°C durante 30 minutos en un recipiente con una concentración de 4 g/L de detergente, y se analizaron los cambios de color en los hilos; así como, la transferencia de color a una multifibra. Para la evaluación de la solidez al frote, se siguió la norma ISO 105-X12:2016 utilizando un frotómetro, donde las muestras se sometieron a fricción en seco y en húmedo bajo una fuerza constante de 9 ± 0.2 N aplicada sobre un testigo blanco. Ambos ensayos permitieron obtener datos fundamentales sobre la resistencia del color de hilos teñidos frente a condiciones de uso, proporcionando una base sólida para evaluar su durabilidad cromática (Islam y Akter, 2020).

4.7 Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó mediante un análisis de varianza (ANOVA), con el objetivo de evaluar las diferencias significativas en las propiedades físico-mecánicas,

los parámetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , c^* y h°), y las características de hidrofobicidad, considerando los diferentes mordientes como factores experimentales. Los resultados se expresaron como media $\pm$ desviación estándar, calculadas a partir de tres réplicas independientes ($n=3$). Para la comparación de medias, se aplicó la prueba de Tukey, considerándose diferencias estadísticamente significativas aquellas con un valor de $p < 0.05$. El procesamiento y análisis de los datos se llevó a cabo utilizando los lenguajes de programación R y Python.



CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Análisis de resultados

5.1.1 Propiedades Físico-Mecánicas

En la Tabla 3, se presenta los resultados referentes a las propiedades físico-mecánicas de los hilos teñidos con colorantes naturales, en los que se observa que el proceso de teñido utilizando tintes naturales de *Dactylopius coccus* y *Opuntia soehrensii* Britton & Rose no afecta notablemente la elongación (%), resistencia máxima (N) y tenacidad (Mpa) de hilos de alpaca. El porcentaje de elongación varía del 51.67% (T4: *Dactylopius coccus* + $C_2H_2O_4$) al 65% (T7: *Opuntia soehrensii* Britton & Rose + Na_2SO_4), sin diferencias significativas según Tukey. La fuerza máxima varía de 1.64 N (T6: *Opuntia soehrensii* Britton & Rose + $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$) a 1.94 N (T3: *Dactylopius coccus* + Na_2SO_4). La tenacidad se mantiene entre 0.93 MPa y 1.10 MPa, sin diferencias significativas entre los tratamientos. El módulo de Young varía de 1.41 MPa (T6: *Opuntia soehrensii* Britton & Rose + $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$) a 5.31 MPa (T1: *Dactylopius coccus* puro), mostrando diferencias significativas en rigidez según el tratamiento.

La prueba de Tukey muestra que no existió diferencias significativas entre los tratamientos T_0 a T_8 , para los parámetros de elongación (%), fuerza máxima (N) y tenacidad (Mpa). Sin embargo, para módulo de Young (Mpa) se encontraron diferencias entre los tratamientos, como lo muestran las letras (b, c, d, e, f) asignadas a esos valores.



Tabla 3 — Propiedades físico-mecánicas de hilos de Vicugna pacos, teñidas con colorantes naturales.

Muestra	Elongación (%)	Fuerza máxima (N)	Tenacidad (Mpa)	Módulo de Young (Mpa)
T ₀	57.67 ^a ±15.28	1.78 ^a ±0.14	1.01 ^a ±0.08	4.15 ^e ±0.07
T ₁	58.67 ^a ±12.34	1.67 ^a ±0.20	0.94 ^a ±0.11	5.31 ^f ±0.17
T ₂	56.00 ^a ±13.53	1.80 ^a ±0.12	1.02 ^a ±0.07	2.48 ^c ±0.03
T ₃	61.33 ^a ±3.06	1.94 ^a ±0.01	1.10 ^a ±0.00	2.77 ^d ±0.10
T ₄	51.67 ^a ±8.50	1.81 ^a ±0.11	1.02 ^a ±0.06	2.78 ^d ±0.04
T ₅	53.67 ^a ±5.86	1.77 ^a ±0.12	1.00 ^a ±0.07	2.66 ^d ±0.03
T ₆	64.33 ^a ±3.51	1.64 ^a ±0.09	0.93 ^a ±0.05	1.41 ^a ±0.07
T ₇	65.00 ^a ±2.00	1.68 ^a ±0.16	0.95 ^a ±0.09	2.34 ^c ±0.08
T ₈	59.00 ^a ±13.45	1.78 ^a ±0.21	1.01 ^a ±0.12	1.80 ^b ±0.05

T₀, hilo no teñido (blanco); T₁, hilo teñido con cochinilla (*Dactylopius coccus*); T₂, T₃ y T₄, hilos teñidos con cochinilla + mordientes (alumbre, sal de limón y collpa, respectivamente); T₅, hilo teñido con airampo (*Opuntia soehrensii* Britton & Rose; T₆, T₇ y T₈, hilos teñidos con airampo + mordientes (alumbre, sal de limón y collpa, respectivamente). Resultados expresados como promedio ± desviación estándar (n=3) y superíndices con letras diferentes en columnas indican diferencias significativas ($\alpha < 0.05$).

5.1.2 Parámetros de colorimetría

La Tabla 4 muestra los parámetros de colorimetría (L^* , a^* , b^* , c^* , h°) definidos para cada muestra de hilo de fibra de alpaca, utilizando el sistema de coordenadas CIELab. Estos parámetros describen el brillo (L^*), los valores de las coordenadas cromáticas (a^* y b^*), el grado de cromaticidad (c^*) y el matiz (h°) de los colores que fueron producidos en función del proceso de teñido.

El hilo blanco (T₀) presenta la mayor luminosidad (L^*) (91.61 ± 0.55), destacándose por su claridad natural; mientras que la fibra teñida con T₄ (*Dactylopius coccus* + C₂H₂O₄) registró el valor más bajo (24.77 ± 0.23), reflejando un oscurecimiento pronunciado. Los hilos de la fibra de alpaca T₅ (*Opuntia soehrensii* Britton & Rose puro) y T₇ (*Opuntia soehrensii* Britton & Rose + Na₂SO₄) presentan valores intermedios (69.3 ± 0.46 y 70.19 ± 0.26), evidenciando tonos cálidos y moderadamente claros. En el eje rojo-verde (a^*), T₁ (*Dactylopius coccus* puro) mostró el valor más alto (34.95 ± 0.6), indicando un tono rojizo intenso; mientras que T₃ (*Dactylopius coccus* + Na₂SO₄) presentó un valor más bajo (13.12 ± 0.39), con un tono rojo más equilibrado. En el eje amarillo-azul (b^*), T₇ (*Opuntia soehrensii* Britton & Rose + Na₂SO₄) y T₆ (*Opuntia soehrensii* Britton & Rose + KAl(SO₄)₂·12H₂O) alcanzaron valores elevados (25.72 ± 0.78 y 24.27 ± 1.05), representando tonos cálidos; mientras que T₁ (*Dactylopius coccus*) mostró un valor negativo (-10.67 ± 0.28), evidenciando un matiz frío con inclinación hacia el azul. Estos resultados reflejan la capacidad

de los tintes naturales para generar tonalidades cálidas y frías. En cuanto al croma (c^*), T_8 (*Opuntia soehrensii* Britton & Rose + $C_2H_2O_4$) alcanzó el valor más alto (40.29 ± 0.66), mostrando un color saturado y brillante, en contraste con T_0 (7.8 ± 0.24), correspondiente a la ausencia de pigmentación. Finalmente, los valores de ángulo de tono (h°) indicaron tonalidades cálidas en T_4 (*Dactylopius coccus* + $C_2H_2O_4$) (12.92°) y T_5 (51.26°); mientras que T_3 (*Dactylopius coccus* + Na_2SO_4) presentó un ángulo de 314.39° , asociado a tonalidades frías. Estos resultados demuestran cómo los tintes naturales y mordientes influyen en las propiedades cromáticas de los hilos de *Vicugna pacos*, proporcionando información clave para optimizar el diseño textil según las demandas del mercado. En las muestras teñidas, se observa una disminución notable en comparación al grupo de control en la luminosidad, lo que resulta lógico dada la adición de colorantes. c^* y h° , su variación señala la capacidad de múltiples matices y la saturación en el color logrado.

Con respecto a la prueba de Tukey mostró diferencias significativas en todos los parámetros de colorimetría entre tratamientos. Las letras diferentes indican que los grupos son distintos, mostrando que los tratamientos impactan el color de manera heterogénea. Existen diferencias significativas en la luminosidad, a^* , b^* , croma y tono; lo cual, indica que cada tratamiento da un color particular en el hilo de la fibra de alpaca. Las diferencias son de diversa magnitud en cada parámetro, siendo algunos más evidentes que otros. El análisis de Tukey confirma la gran variabilidad que se observa en los parámetros colorimétricos entre tratamientos, indicando que no son aleatorios.



Tabla 4 — Parámetros de colorimetría

Muestra	L*	a*	b*	c*	h°
T ₀	91.61 ^h ±0.55	02.47 ^a ±0.26	7.40 ^e ±0.20	7.80 ^a ±0.24	71.56 ^e ±1.67
T ₁	39.52 ^b ±0.47	34.95 ⁱ ±0.60	-10.67 ^b ±0.28	36.54 ^h ±0.62	343.03 ^h ±0.35
T ₂	47.06 ^c ±0.46	29.83 ^g ±0.43	-3.70 ^c ±0.28	30.07 ^e ±0.39	352.93 ⁱ ±0.62
T ₃	39.26 ^b ±0.67	13.12 ^c ±0.39	-13.40 ^a ±0.32	18.75 ^b ±0.48	314.39 ^g ±0.54
T ₄	24.77 ^a ±0.23	28.18 ^f ±0.40	6.46 ^d ±0.28	28.91 ^d ±0.39	12.92 ^a ±0.58
T ₅	69.30 ^f ±0.46	20.61 ^d ±0.41	25.69 ^h ±0.37	32.93 ^f ±0.34	51.26 ^d ±0.77
T ₆	63.99 ^e ±0.84	24.73 ^e ±0.52	24.27 ^g ±1.05	34.66 ^g ±0.39	44.44 ^c ±1.83
T ₇	70.19 ^g ±0.26	04.11 ^b ±0.15	25.72 ^h ±0.78	26.05 ^c ±0.77	80.91 ^f ±0.47
T ₈	54.69 ^d ±0.58	33.45 ^h ±0.42	22.43 ^f ±0.69	40.29 ⁱ ±0.66	33.83 ^b ±0.67

L*, luminosidad; C*, cromaticidad; h°, tonalidad.

T₀, hilo no teñido (blanco); T₁, hilo teñido con cochinilla (*Dactylopius coccus*); T₂, T₃ y T₄, hilos teñidos con cochinilla + mordientes (alumbre, sal de limón y collpa, respectivamente); T₅, hilo teñido con airampo (*Opuntia soehrensii* Britton & Rose; T₆, T₇ y T₈, hilos teñidos con airampo + mordientes (alumbre, sal de limón y collpa, respectivamente).

Resultados expresados como promedio ± desviación estándar (n=3) y superíndices con letras diferentes en columnas indican diferencias significativas ($\alpha < 0.05$).

5.1.3 Solidez al lavado

La Tabla 5, se presenta los resultados obtenidos de la evaluación de solidez al lavado; también indica las mediciones de cambio de color espectral y visual junto con la inspección realizada a la vista, se utilizó una escala de 1 al 5. En esta escala, el valor 5 indica una solidez aceptable, mientras que 1 indica una solidez muy insuficiente al lavado.

En la Tabla 5, se observa una resistencia al lavado dentro del rango de bajo a moderado, todos los tratamientos muestran valores entre 1 y 2 en la escala de evaluación. Las muestras tratadas con *Dactylopius coccus* muestran mayor resistencia que aquellas teñidas con *Opuntia soehrensii*. Específicamente, la muestra T₃ (*Dactylopius coccus* Na₂SO₄) muestra mayor resistencia al lavado con un valor de 2 en comparación con las otras muestras de *Dactylopius coccus* (T₁, T₂, T₄) que mostraron resistencia en el rango de 1 a 2. De manera similar, entre las muestras teñidas con *Opuntia soehrensii*, la muestra T₇ (*Opuntia soehrensii* Na₂SO₄) supera al resto de los tratamientos (T₅, T₆, T₈) con un nivel de solidez al lavado de 1, de modo que todas muestran una resistencia de 1. La adición de mordientes (KAl(SO₄)₂·12H₂O, Na₂SO₄, C₂H₂O₄) no mejora favorablemente la solidez al lavado en ninguno de los dos colorantes. De hecho, en algunos casos, la adición de ciertos mordientes disminuye ligeramente la solidez.



Tabla 5 — Resultados de la evaluación de solidez al lavado

Muestra	Cambio de Color (Espectrofotómetro)	Cambio de Color (Visual)
T ₁	1-2	1-2
T ₂	1-2	1-2
T ₃	2	2
T ₄	1	1
T ₅	1	1
T ₆	1	1
T ₇	2	1-2
T ₈	1	1

T₁, hilo teñido con cochinilla (*Dactylopius coccus*); T₂, T₃ y T₄, hilos teñidos con cochinilla + mordientes (alumbre, sal de limón y collpa, respectivamente); T₅, hilo teñido con airampo (*Opuntia soehrensii* Britton & Rose; T₆, T₇ y T₈, hilos teñidos con airampo + mordientes (alumbre, sal de limón y collpa, respectivamente).

5.1.4 Solidez al frote

En la Tabla 6, se muestra la evaluación de solidez del frote, que a continuación se presenta.

Tabla 6 — Resultados de la evaluación de solidez al frote

Muestra	Testigo Seco (Espectrofotómetro)	Testigo Seco (Visual)	Testigo Húmedo (Espectrofotómetro)	Testigo Húmedo (Visual)
T ₁	4	4	4	4
T ₂	2	1-2	1-2	1-2
T ₃	2-3	2	2	2
T ₄	3	3	3	3
T ₅	4-5	4	4	4-5
T ₆	4-5	4	4	4-5
T ₇	4+	4	4	4-5
T ₈	4-5	4	4	4

T₁, hilo teñido con cochinilla (*Dactylopius coccus*); T₂, T₃ y T₄, hilos teñidos con cochinilla + mordientes (alumbre, sal de limón y collpa, respectivamente); T₅, hilo teñido con airampo (*Opuntia soehrensii* Britton & Rose; T₆, T₇ y T₈, hilos teñidos con airampo + mordientes (alumbre, sal de limón y collpa, respectivamente).

En la prueba de frote húmedo, las muestras T₂ (*Dactylopius coccus* + KAl(SO₄)₂·12H₂O) y T₃ (*Dactylopius coccus* + Na₂SO₄) evidenciaron la transferencia de color de manera desigual y con mancha; lo que podría limitar su uso en aplicaciones expuestas frecuentemente a la humedad. En contraste, los tratamientos T₁, T₅, T₆, T₇ y T₈ presentaron una ligera transferencia de color, demostrando mejor desempeño frente a T₂ (*Dactylopius coccus* + KAl(SO₄)₂·12H₂O) y T₃ (*Dactylopius coccus* + Na₂SO₄). Estos resultados



destacan la relevancia de evaluar la solidez al lavado y al frote para garantizar la calidad y durabilidad de los hilos en el sector textil.

5.1.5 Propiedades de hidrofobicidad

En la Tabla 7, se presentan los resultados del análisis de hidrofobicidad de los hilos de la fibra de alpaca, considerando la media, desviación estándar, mínimo y máximo.

Tabla 7 — Ángulo de contacto de hilos de alpaca teñida

Muestra	Mínimo (°)	Máximo (°)	Mean (°) ± SD
T ₀	88.92	91.46	89.98 ^a ± 1.18
T ₁	95.87	98.60	97.22 ^e ± 1.08
T ₂	92.55	95.57	94.09 ^{bc} ± 1.25
T ₃	92.62	94.71	93.16 ^b ± 0.88
T ₄	93.88	96.56	95.08 ^c ± 1.01
T ₅	92.77	95.27	94.08 ^{bc} ± 0.95
T ₆	93.13	94.66	93.71 ^b ± 0.56
T ₇	92.29	94.53	92.95 ^b ± 0.93
T ₈	88.26	90.90	89.2 ^a ± 1.11

T₀, hilo no teñido (blanco); T₁, hilo teñido con cochinilla (*Dactylopius coccus*); T₂, T₃ y T₄, hilos teñidos con cochinilla + mordientes (alumbre, sal de limón y collpa, respectivamente); T₅, hilo teñido con airampo (*Opuntia soehrensii* Britton & Rose); T₆, T₇ y T₈, hilos teñidos con airampo + mordientes (alumbre, sal de limón y collpa, respectivamente).

Resultados expresados como promedio ± desviación estándar (n=3) y superíndices con letras diferentes en columnas indican diferencias significativas ($\alpha < 0.05$).

Los hilos de las fibras analizadas mostraron distintos comportamientos hidrofóbicos según el tratamiento aplicado. El hilo blanco (T₀) presentó un ángulo medio de 89.98°, indicando afinidad moderada al agua debido a la ausencia de tratamiento. El teñido con *Dactylopius coccus* (T₁) alcanzó el mayor ángulo medio (97.22°), destacando como el tratamiento más hidrofóbico por la interferencia química en la adhesión del agua. T₂ (*Dactylopius coccus* + KAl(SO₄)₂·12H₂O) y T₃ (*Dactylopius coccus* + Na₂SO₄) mostraron ángulos medios de 94.09° y 93.16°, respectivamente; con una reducción en repelencia al agua en comparación con T₁, posiblemente influenciada por los mordientes empleados. T₄ (*Dactylopius coccus* + C₂H₂O₄) registró un ángulo medio de 95.08°, mejorando la hidrofobicidad respecto a los tratamientos T₂ y T₃, aunque sin superar a tratamiento T₁. En el caso de *Opuntia soehrensii* Britton & Rose, T₅ presentó un ángulo medio de 94.08°, similar a T₂; mientras que T₆ (*Opuntia soehrensii* Britton & Rose + KAl(SO₄)₂·12H₂O) tuvo un ángulo de 93.71°, con una ligera disminución en hidrofobicidad pero una desviación mínima (0.6°). T₇ (*Opuntia soehrensii* Britton



& Rose + Na₂SO₄) alcanzó un ángulo de 92.95°, intermedio entre T₅ y T₆, con comportamiento uniforme. Finalmente, T₈ (*Opuntia soehrensii* Britton & Rose + C₂H₂O₄) mostró un ángulo medio de 89.23°, destacándose como el único tratamiento con hidrofiliidad, cercano al comportamiento de la fibra sin tratar (T₀). Estos hallazgos resaltan la influencia de los tintes y mordientes en las propiedades hidrofóbicas de los hilos de *Vicugna pacos*.

De acuerdo con el análisis de Tukey basado en diferencias significativas ($\alpha < 0.05$), los tratamientos se agruparon en tres categorías de hidrofobicidad: un grupo que muestra la menor hidrofobicidad (T₀: 89.98° y T₈: 89.23°); un grupo intermedio (T₃: 93.16°, T₆: 93.71°, T₇: 92.95°, T₂: 94.09° y T₅: 94.08°); y un grupo que muestra la mayor hidrofobicidad (T₁: 97.22° y T₄: 95.08°) con T₁ mostrando el valor máximo. Esto indica que el tipo de teñido y, en menor medida, el mordiente, afectan significativamente la hidrofobicidad de los hilos de fibra de alpaca.

5.2 Contrastación de hipótesis

5.2.1. Propiedades físico-mecánicas

Ho: El uso de diferentes fuentes naturales de coloración roja, como la cochinilla, el ayrampu y mordientes, tiene efectos en las propiedades físico-mecánicas de hilos de alpaca, como la resistencia a la tracción, el módulo de tracción.

Ha: El uso de diferentes fuentes naturales de coloración roja, como la cochinilla, el ayrampu y mordientes, no tiene efectos en las propiedades físico-mecánicas de hilos de alpaca, como la resistencia a la tracción, el módulo de tracción.

Para el módulo de Young se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna ($p < 0.05$). Para la elongación, fuerza máxima y tenacidad, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna ($p > 0.05$).

5.2.2. Intensidad de color

Ho: Hilos de alpaca teñidos con fuentes naturales rojas, como la cochinilla, el ayrampu y mordientes presenta diferencias en sus características de intensidad de color (luminosidad, croma, fuerza de color, entre otras).

Ha: Hilos de alpaca teñidos con fuentes naturales rojas, como la cochinilla, el ayrampu y mordientes no presenta diferencias en sus características de intensidad de color (luminosidad, croma, fuerza de color, entre otras).

Se acepta la hipótesis nula ($p < 0.05$) para los indicadores de intensidad de color (luminosidad y cromaticidad)

5.2.3 Hidrofobicidad

Ho: La utilización de diversas fuentes naturales de coloración roja, como la cochinilla, el ayrampu y distintos mordientes influye en las propiedades de hidrofobicidad de hilos de alpaca.

Ha: La utilización de diversas fuentes naturales de coloración roja, como la cochinilla, el ayrampu y distintos mordientes no influye en las propiedades de hidrofobicidad de hilos de alpaca.

Se acepta la hipótesis nula ($p < 0.05$) para la hidrofobicidad de hilos teñidos con diversas fuentes naturales de coloración roja, como la cochinilla, el ayrampu y distintos mordientes.

5.3 Discusión

Los resultados obtenidos de la elongación varían del 51.67% (T_4 : *Dactylopius coccus* + $C_2H_2O_4$) al 65% (T_7 : *Opuntia soehrensii* Britton & Rose + Na_2SO_4), sin diferencias significativas según la prueba de Tukey. Según Czaplicki (2012), obtuvo resultados similares de elongación, con un promedio del 45% (que osciló entre el 38% y el 51%); mientras que Wuliji et al. (2000), obtuvieron un valor inferior, con un promedio del 31,3%. De acuerdo Czyż et al. (2024), señala que las características mecánicas de las fibras que influyen en el procesamiento son la fuerza de rotura, alargamiento y tenacidad. Las fibras procesadas deben tener alta resistencia debido a la fuerza a la que están expuestas.

Con respecto a la fuerza máxima (N) oscilan entre 1.64 N (T_6) a 1.94 N (T_3), investigación realizada por Czaplicki (2012), reporta el valor de la fuerza de rotura que osciló entre 0,063 y 0,148 N, siendo el más bajo para las fibras beige oscuro y el más alto para las fibras beige claro, y en ambos casos de alpacas Suri. Según Jankowska et al. (2021), los hilos de *Dactylopius coccus* poseen una fuerza máxima comparable a la fuerza del hilo de la oveja y menor que a la fuerza del hilo de cabra; con una tenacidad superior a la tenacidad del hilo de la oveja (188.46 MPa) e inferior a la tenacidad del hilo de cabra (221.02 MPa), y una rigidez elevada (Módulo de Young de 2713.95 MPa), superior a rigidez del hilo de oveja, pero menor que la rigidez del hilo de cabra.



De acuerdo a la tenacidad, se demostró que se mantiene entre 0.93 MPa y 1.10 MPa, sin diferencias significativas entre los tratamientos, sabiendo que la tenacidad (MPa) corresponde a la fuerza máxima sostenida y dividida por el área de la sección transversal que fue sometida el hilo de la fibra de alpaca, y se precisa que no existe diferencia significativa entre todos los tratamientos; es decir, que los distintos mordientes y colorantes no influye en la tenacidad de la fibra, existiendo otros factores que si afectan de manera razonable como es la raza de los animales, fibras naturales de color u otros factores, tal como señala Lupton (2006), donde reporta que las fibras más oscuras tienen menor resistencia que las fibras más claras; lo que no se confirmó en el estudio realizado; es probable que en la investigación realizada se desarrolló con fibras de colores naturales. En la presente pesquisa no se evidenció diferencia significativa ($\alpha < 0.05$) entre la elongación, fuerza máxima y tenacidad; señala Czyż (2024), donde indica que, no hubo correlación entre el alargamiento a la rotura y el diámetro de la fibra o el color de la fibra.

En relación con el análisis colorimétrico con diferentes mordientes, se muestra una alta variabilidad entre los tratamientos (T_0 - T_8). El parámetro L^* (luminosidad) varía de 24.77 (T_4) a 91.61 (T_0), demostrando diferencias significativas respecto a la claridad del color, resultados que corrobora Jung y Bae (2014), donde señala que los mordientes actúan como agentes que mejoran la adhesión del colorante a las fibras y alteran el pH en el que se encuentra el baño de teñido. De igual manera Lozano et al. (2024), afirma respecto a la luminosidad (L^*) que disminuyó significativamente después del teñido y pos-mordentado al comparar con el hilo blanco (93.26), siendo la menor luminosidad en hilos pos-mordentados con ccollpa (51.42) y los resultados afirman la diferencia significativa entre todos los colorantes utilizados, considerando el colli, ccollpa, alumbre y sal de limón.

Los hilos de fibras teñidas muestran una disminución notable en L^* y cambios en a^* y b^* . Los altos valores de a^* (34.95 ± 0.60 en T_1) indican matices rojizos, y los valores negativos (-13.40 ± 0.32 en T_3) indican tonos verdosos. Los valores de b^* van desde amarillos (positivos) hasta azules (negativos), refirmando lo anteriormente mencionado Lozano et al. (2024), reporta que los hilos mordentados con ccollpa y alumbre mostraron valor negativo que tiene relación con el tono verde oscuro generado y el parámetro b^* reporta incremento positivo. Por otro lado, señala que las variaciones en los parámetros colorimétricos conducen a la aparición de distintos matices de color; por consiguiente, el procedimiento de pre-mordentado utilizando $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ y $FeSO_4$ ha influido en los valores colorimétricos observados. Además, Lozano et al. (2024), señala que los datos revelaron



que la luminosidad (L^*) sufrió una pérdida considerable después del teñido y del pre-mordentado con $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ (81,47) y $FeSO_4$ (70,47). Adicionalmente, tanto el valor b^* como el valor c^* experimentaron un aumento relevante a temperaturas elevadas y con un tiempo de teñido mayor, dando como resultado cambios sutiles en el matiz y saturación con respecto a los diferentes tratamientos. Según Palacios-Ochoa y Siddons (2021), el análisis colorimétrico del colorante *Dactylopius coccus* evidencia su sensibilidad a tratamientos alcalinos y cambios de pH. Las muestras teñidas con *Dactylopius coccus* rosa mostraron valores de L^* : 53.26, a^* : 1.25 y b^* : 0.45, con variaciones de Δa^* : 6.47 y ΔL^* : -7.86, indicando un tono rojo más oscuro; mientras que el *Dactylopius coccus* naranja presentó un ΔL^* de -10.97, evidenciando tonos azulados más oscuros y menor resistencia al lavado Palacios-Ochoa et al. (2021).

En relación con la evaluación de solidez al lavado, se obtiene una resistencia al lavado dentro del rango de bajo a moderado, todos los tratamientos (T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 , T_6 , T_7 y T_8) muestran valores entre 1 y 2 en la escala de evaluación. Estos resultados pueden atribuirse a la poca afinidad que tiene la fibra de alpaca por los colorantes naturales que los sintéticos. Su estructura química y tamaño molecular pueden dificultar su fijación a la fibra, haciéndola más susceptible a lavado. Resultado que contraviene a lo indicado por Lozano et al. (2024), donde comprobó que la solidez del color al lavado y al frotamiento mostró valores aceptables en la escala de grises. En la misma línea, reporta Sucasaca y Guevara (2020), que el colorante natural inflorescencia de colli (*Buddleja coriacea*) tiene efectos resaltantes en la solidez del color de la fibra de alpaca expuesta a la luz solar durante el proceso de teñido. También, el reportados por Ünal et al. (2019), quienes reportaron un promedio de solidez al lavado de 3.5 en fibras de alpaca, inferior al promedio de 4.5 observado en tejidos de seda Gürkan et al. (2019).

Con respecto a la evaluación de solidez al frote, las muestras teñidas con *Opuntia soehrensii* (T_5 - T_8) exhiben buena solidez al frote (4-5) tanto en seco como en húmedo, mostrando buena fijación del tinte. Las muestras con *Dactylopius coccus* (T_1 - T_4) muestran una resistencia al tinte variable: T_1 es excelente (4), y T_2 es pobre (1-2); lo que significa, que $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ disminuye la solidez del color. T_3 y T_4 están en equilibrio con una solidez moderada (2-3 y 3). La solidez al frote en húmedo es generalmente menor que en seco, lo que indica una mayor sensibilidad a la fricción cuando están húmedos. Los mordientes añadidos afectan la solidez al frote.



Los resultados de hidrofobicidad indican que el tratamiento T_1 (*Dactylopius coccus* puro), muestra el ángulo de contacto más alto con $97.22^\circ \pm 1.08^\circ$. Los tratamientos con *Opuntia soehrensii* tuvieron ángulos que varían de 92.95° a 94.08° . La fibra sin color (T_0) tiene un ángulo de contacto de 89.98° con una desviación estándar de $\pm 1.18^\circ$ y se demostró que el teñido y, en menor medida, el mordiente, afectan significativamente la hidrofobicidad de la fibra de alpaca. Según Brack et al. (1999), la capa superficial de la lana dificulta la absorción de tintes; se puede mejorar la absorción de tintes en la lana, eliminando parte del sustrato hidrofóbico mediante métodos químicos o enzimas proteolíticas. Según Sureshkumar et al. (2021), técnicas como la descarga corona y la mercerización han demostrado ser efectivas en la reducción de la hidrofobicidad en fibras naturales, optimizando sus propiedades mecánicas y disminuyendo la absorción de humedad. Aunque este estudio se centró en procesos tradicionales, los resultados son consistentes con resultados reportados por otros autores Sureshkumar et al. (2021).



CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

El estudio demostró que el teñido de hilos de alpaca con tintes naturales obtenidos de la cochinilla (*Dactylopius coccus*) y la tuna (*Opuntia soehrensii*), combinado con mordientes tradicionales, es una alternativa práctica para la industria textil. Este método preserva las propiedades físicas y mecánicas de la fibra, generando una paleta de colores rica y variada. Los tratamientos no provocaron cambios significativos en parámetros como elongación, fuerza máxima o resistencia a la tracción, lo que indica que la estructura interna de la fibra se mantuvo intacta. Sin embargo, se observaron diferencias notables en el módulo de Young, lo que indica un cambio sutil en la rigidez y la textura de la fibra. Desde una perspectiva colorimétrica, los resultados fueron claros y consistentes. La cochinilla produjo tonos rojos intensos, con un valor a^* de 34,95, mientras que el Airampo produjo tonos amarillos cálidos y brillantes, con valores L^* de hasta 70,19. Los mordientes utilizados, como el alumbre, el ácido oxálico (también conocido como sal de limón) y la collpa, actuaron como modificadores de color eficaces, ampliando la gama de tonos producidos. Un hallazgo notable fue el aumento de la hidrofobicidad en los hilos teñidos solo con cochinilla, alcanzando un ángulo de contacto de $97,22^\circ$, lo que indica una mejor resistencia al agua. Por el contrario, la adición de mordientes en los tratamientos con cochinilla y Airampo disminuyó esta propiedad. Las pruebas de durabilidad revelaron importantes desafíos para el uso comercial de estos productos. La solidez al lavado fue limitada, con una degradación del color calificada como severa en la mayoría de los tratamientos (valores de 1 a 2 en la escala de grises). Sin embargo, la transferencia de color a otras telas durante el lavado fue mínima, con calificaciones de 4 a 5. En cuanto a la solidez al frote, los hilos teñidos con achiote tuvieron un rendimiento excepcional tanto en seco como en húmedo. En cambio, los hilos tratados con cochinilla y mordientes mostraron una solidez baja, con valores que oscilaron entre 1 y 2. En resumen, si bien los tintes naturales evaluados ofrecen resultados estéticos atractivos y mantienen la integridad estructural de la fibra de alpaca, es fundamental optimizar los procesos de fijación para mejorar la permanencia del color. Esta mejora es crucial para superar el principal obstáculo técnico y avanzar hacia un uso comercial sostenible en el mercado textil de alto valor.



6.2 Recomendaciones

Efectuar teñidos de hilos de fibra de alpaca con Airampo y cochinilla utilizando mordientes de origen vegetal en reemplazo de mordientes de origen químico y medir el efecto sobre las propiedades físicas, mecánicas y de color.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abbate, S., P. Centobelli, R. Cerchione, S. P. Nadeem, and E. Riccio. 2023. "Sustainability Trends and Gaps in the Textile, Apparel, and Fashion Industries." *Environment, Development and Sustainability* 26 (2): 2837–2864. <https://doi.org/10.1007/S10668-022-02887-2>
2. Adeel, S., M. Hussaan, F. U. Rehman, N. Habib, M. Salman, S. Naz, N. Amin, and N. Akhtar. 2019. "Microwave- Assisted Sustainable Dyeing of Wool Fabric Using Cochineal-Based Carminic Acid as a Natural Colorant." *Journal of Natural Fibers* 16 (7): 1026–1034. <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1448317>.
3. Ali *et al.*, "Hydrophobic treatment of natural fibers and their composites—A review," May 01, 2018, *SAGE Publications Ltd.* doi: 10.1177/1528083716654468.
4. Ali, S. B., J. L. Harmon, and K. C. Kirkham. 2025. "Analyzing the Lightfastness of Indigo and Woad-Dyed Cotton Using Different Reducing Agents, Lemon Treatment, and Variation in Dye Concentration." *Cellulose* 32 (2): 1253–1271. <https://doi.org/10.1007/s10570-024-06311>.
5. Arnob Dhar Pranta, M. T. R. 2024. "Extraction of Eco-Friendly Natural Dyes and Biomordants for Textile Coloration: A Critical Review." *Nano-Structures & Nano-Objects* 39:101243. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101243>.
6. Arroyo Figueroa, G., M. G. Casimiro Rodríguez, P. Rafael Martínez, N. J. Hernández Carrillo, Y. G. Leal Sánchez, and F. Montalvo García. 2021. "Teñido con grana de cochinilla: Solidez del color y expectativas de aplicación." *Jóvenes en la Ciencia* 10:1–6.
7. Arroyo, T. Medina, M. García, J. Dzul, L. Vargas, and C. Herrera, "Quality and solidity of a cosmetic product made with the extract of the cochineal," *Journal of Agro-Industry Sciences*, vol. 1, no. 1, pp. 7–10, 2019, doi: 10.17268/jais.2019.001.
8. ASTM International. 2022. "ASTM D2256/D2256M-21: Standard Test Method for Tensile Properties of Yarns by the Single-Strand Method." https://doi.org/10.1520/D2256_D2256M-21.



9. Balladares Zevallos, C. P. 2024. Análisis de la vulnerabilidad de la producción de fibra de alpaca al cambio climático y su impacto en la demanda de seguros en Perú, Repositorio Institucional UNALM [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina].
10. Bechtold, T., and R. Mussak. 2009. Handbook of Natural Colorants: Dyes and Pigments from Plants.
11. Brack, N., R. N. Lamb, D. Pham, T. Phillips, and P. Turner. 1999. "Effect of Water at Elevated Temperatures on the Wool Fibre Surface." *Surface and Interface Analysis* 27 (12): 1050–1054. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9918\(199912\)27:123.0.co;2-a](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9918(199912)27:123.0.co;2-a).
12. Brack, R. Lamb, D. Pham, and P. Turner, "Nonionic surfactants and the wool fibre surface," *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, pp. 405–415, 1999, doi: 10.1016/S0927-7757(98)00863-2.
13. Bustillos, A. Abigail, and A. Figueroa, "TEÑIDO DE FIBRAS NATURALES CON COLORANTES NATURALES," 2017.
14. Caldas-Cueva *et al.*, "Stability of Betacyanin Pigments and Antioxidants in Airampo (*Opuntia soehrensii* Britton and Rose) Seed Extracts and as a Yogurt Natural Colorant," *J Food Process Preserv*, vol. 40, no. 3, pp. 541–549, Jun. 2016, doi: 10.1111/jfpp.12633.
15. Chieli, A., J. Sanyova, B. Doherty, B. G. Brunetti, and C. Miliani. 2016. "Chromatographic and Spectroscopic Identification and Recognition of Ammoniacal Cochineal Dyes and Pigments." *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 162:86–92. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2016.03.007> 21 JOURNAL OF NATURAL FIBERS.
16. Cruz *et al.*, "Colorimetry analysis of coat color and its relationship with fiber traits in alpacas," *Animal*, vol. 15, no. 5, May 2021, doi: 10.1016/j.animal.2021.100219.
17. Czaplicki, "Properties and structure of polish alpaca wool," *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, vol. 90, no. 1, pp. 8–12, 2012.



18. Czyż, A. Wyrostek, A. Wojdon, and D. Jankowska, “Selected Physical and Mechanical Properties of Alpaca Fibers Differing in Color,” *Journal of Natural Fibers*, vol. 21, no. 1, 2024, doi: 10.1080/15440478.2024.2348626.
19. Díaz-Garay, B., R. Larios-Francia, and W. H. Gorriti. 2021. “A Diagnosis of the Artisanal Production Process of Alpaca Fiber Yarn in Puno, Peru.” *Revista De Investigación En La Ciencia De La Producción Agropecuaria* 7 (1): 1–12. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/REVULIMA_521cf6ab68e22368e8b3cb628e4bc6e0.
20. Eyupoglu, C., S. Eyupoglu, and N. Merdan. 2022. “Investigation of Dyeing Properties of Mohair Fiber Dyed with Natural Dyes Obtained from *Candelariella reflexa*.” *Journal of Natural Fibers* 19 (16): 12829–12848. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2076273>.
21. Eyupoglu, C., S. Eyupoglu, N. Merdan, and Z. Omerogullari Basyigit. 2024. “Natural Dyeing of Air Plasma-Treated Wool Fabric With *Rubia Tinctorum* L. and Prediction of Dyeing Properties Using an Artificial Neural Network.” *Coloration Technology* 140 (1): 91–102. <https://doi.org/10.1111/cote.12700>.
22. Ferdush, N. Jahan, S. Ahmed, and M. Jannatul Ferdous, “Colorimetric Analysis and Fastness Rating of Natural Yellow Color Dyes on Cotton Fabric,” *Journal of Natural Science and Textile Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 62–71, 2022.
23. Flint, H. V., H. A. Rivera Tito, R. D. James, F. Cucinotta, E. Gibson, and M. E. Quintana Caceda. 2024. “Betanin Dye Extracted from Airampo (*Opuntia soehrensii*) Seeds to Develop Dye-Sensitized Solar Cells.” *RSC Advances* 14 (14): 9913–9919. <https://doi.org/10.1039/d3ra08010b>.
24. Gotoh, K. 2020. “Application of Atmospheric Pressure Plasma Oxidation and Plasma-Induced Polymer Coating to Surface Functionalization of Textiles.” *Journal of Fiber Science and Technology* 76 (9): 275–287. <https://doi.org/10.2115/FIBERST.2020-0034>.
25. Gürkan Ünal, R. Atav, S. Ilarslan, and B. Berkhan Kastaci, “The effect of using alpaca and silk instead of wool in weft yarns on the woollen fabric properties,” *Journal of*



Natural Fibers, vol. 16, no. 7, pp. 1043–1054, Oct. 2019, doi: 10.1080/15440478.2018.1448319.

26. Haberová, K., V. Jančovičová, D. Veselá, Z. Machatová, and M. Oravec. 2021. “Impact of Organic Binders on the Carminic-Colorants Stability Studied By: ATR-FTIR, VIS and Colorimetry.” *Dyes and Pigments* 186:Artículo 108971. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2020.108971>.
27. Harsanto, I. Primiana, V. Sarasi, and Y. Satyakti, “Sustainability Innovation in the Textile Industry: A Systematic Review,” Jan. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/su15021549.
28. International Organization for Standardization. 2010. ISO 105-C06: Textiles — Tests for Colour Fastness — Part C06: Colour Fastness to Domestic and Commercial Laundering. <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/05/12/51276.html>.
29. International Organization for Standardization. 2014. ISO 105-B02: Textiles — Tests for Colour Fastness — Part B02: Colour Fastness to Artificial Light: Xenon Arc Fading Lamp Test. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0054034>.
30. International Organization for Standardization. 2016. ISO 105-X12: Textiles — Tests for Colour Fastness — Part X12: Colour Fastness to Rubbing. <https://www.iso.org/standard/65207.html>.
31. Islam and S. Akter, “Investigation of the Colorfastness Properties,” no. 2, pp. 58–68, 2020.
32. Jankowska, A. Wyrostek, B. Patkowska-Sokoła, and K. Czyż, “Comparison of Physico-mechanical Properties of Fibre and Yarn Made of Alpaca, Sheep, and Goat Wool,” *Journal of Natural Fibers*, vol. 18, no. 10, pp. 1512–1517, 2021, doi: 10.1080/15440478.2019.1691126.
33. Jung and D. G. Bae, “Natural dyeing with black cowpea seed coat. I. Dyeing properties of cotton and silk fabrics.,” *fibers and polymers*, vol. 15, pp. 138–144, 2014, doi: 10.1007/s12221-014-0138-7.



34. Khan, S. A., M. Shahid, M. I. Khan, M. Yusuf, L. J. Rather, M. A. Khan, and F. Mohammad. 2015. "Mixed Metal Mordant Dyeing of Wool Using Root Extract of *Rheum emodi* (Indian Rhubarb/Dolu)." *Journal of Natural Fibers* 12 (3): 243–255. <https://doi.org/10.1080/15440478.2014.919893>.
35. Kumar and P. Agarwal, "Application of natural dyes on textiles," vol. 34, no. December, pp. 384–399, 2009.
36. Liberman, M. 2021. "Climate Change, Wetland Management, and Alpaca Pastoralism in the Bolivian High Andes Mountains." In *Geobotany Studies: Tools for Landscape-Scale Geobotany and Conservation*, edited by F. Pedrotti and E.O. Box, 65–98. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-74950-7_5.
37. Lindon, J. Holmes, and G. Tranter, "Colorimetry , Theory," no. January 2000, 2019.
38. Lozano, F., A. Quispe-Quispe, and F. Vilcanqui-Pérez. 2024. "Effect of Mordants on the Variation of Diameter and Colour Tone in Alpaca Fibre Threads Dyed with Colli (*Buddleja coriacea*) Flowers." *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú* 35 (1), e27379. Artículo 27379. <https://doi.org/10.15381/rivep.v35i1.27379>.
39. Lozano, S. Tapía-Pacci, R. Ccopa, A. Quispe-Quispe, and J. C. Salazar-López, "Effect of mordants on colour variation in alpaca fibre dyed with dye extracted from the tankar stem (*Berberis boliviensis* L.)," *Coloration Technology*, 2024, doi: DOI: 10.1111/cote.12760.
40. Lupton, A. McColl, and R. H. Stobart, "Fiber characteristics of the Huacaya Alpaca," *Small Ruminant Research*, no. 0921–4488, pp. 211–224, 2006, doi: 10.1016/J.SMALLRUMRES.2005.04.023.
41. Mathur and N. P. Gupta, "Use of natural mordant in dyeing of wool," *Indian J Fibre Text Res*, vol. 28, no. 1, pp. 90–93, 2003.
42. Merck. 2025. Oxalic Acid Dihydrate (C₂H₂O₄ · 2H₂O), CAS 6153-56-6 – Product Information and Safety Data. ChemicalBook. https://www.chemicalbook.com/SpectrumEN_6153-56-6_IR1.htm.



43. Muthu and M. A. Gardetti, *Sustainable Fibres for Fashion Industry*, vol. 1. 2016. doi: 10.1007/978-981-10-0522-0_1.
44. Myrick, M. L., M. N. Simcock, M. Baranowski, H. Brooke, S. L. Morgan, and J. N. McCutcheon. 2011. "The Kubelka-Munk Diffuse Reflectance Formula Revisited." *Applied Spectroscopy Reviews* 46 (2): 140–165. <https://doi.org/10.1080/05704928.2010.537004>.
45. Naebe, M., P. G. Cookson, J. Rippon, R. P. Brady, X. Wang, N. Brack, and G. Van Riessen. 2010. "Effects of Plasma Treatment of Wool on the Uptake of Sulfonated Dyes with Different Hydrophobic Properties." *Textile Research Journal* 80 (4): 312–324. <https://doi.org/10.1177/0040517509338308>.
46. Narayanaswamy, K. N. Ninge Gowda, and R. Sudhakar, "Dyeing and Color Fastness of Natural Dye from Psidium guajava on Silk," *Journal of Natural Fibers*, vol. 10, no. 3, pp. 257–270, 2013, doi: 10.1080/15440478.2013.797948.
47. Ortiz, A. A. 2023. "Artisanal Alpaca Garments from the Central Andes: Slow Fashion Practices for Cultural Sustainability." *Fashion and Textiles* 10 (1): 1–18. <https://doi.org/10.1186/s40691-023-00336-6>.
48. Palacios-Ochoa, M. E. Guillén Serrano, and D. Siddons, "Evaluación de la solidez del color en tejidos de lana y alpaca tinturados con biocolorantes extraídos de plantas y animales," *Siembra*, vol. 8, no. 2, p. e2917, 2021, doi: 10.29166/siembra.v8i2.2917.
49. Periyasamy, A. P. 2022. "Natural Dyeing of Cellulose Fibers Using Syzygium Cumini Fruit Extracts and a Bio-Mordant: A Step Toward Sustainable Dyeing." *Sustainable Materials and Technologies* 33:Artículo e00472. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00472>.
50. Pizzicato, S. Pacifico, D. Cayuela, G. Mijas, and M. Riba-Moliner, "Advancements in Sustainable Natural Dyes for Textile Applications: A Review," *Molecules* 2023, Vol. 28, Page 5954, vol. 28, no. 16, p. 5954, Aug. 2023, doi: 10.3390/MOLECULES28165954.
51. Quispe, M., L. Serrano-Arriezu, E. Quispe, M. Beruete, and J. D. Trigo. 2025. "Spectral



Preprocessing and Instrumentation for the Identification of Camelid and Goat Fibers Using Artificial Intelligence.” *The Journal of the Textile Institute* 116 (1): 1–14. <https://doi.org/10.1080/00405000.2025.2536354>.

52. Quispe-Quispe et al. Rahman, M. M., S. Yoon, S. Choi, S. Kim, Y. Kim, I. Hong, N. Hsan, N. Oh, S. Kumar, and J. Koh. 2025. “Enhancing the Dyeing and Color Fastness Properties of Cotton Fabric Dyed with Curcumin: A Sustainable Double Mordanting Approach Using Waste-Derived.” *Fibers and Polymers* 26 (2): 524–535. <https://doi.org/10.1007/S12221-025-01059-Z>.
53. Rahaman, M., and M. A. R. Pranta. 2024. “Green Production and Consumption of Textiles and Apparel: Importance, Fabrication, Challenges, and Prospects.” *Journal of Cleaner Production* 451:Artículo 141979. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S219985312400074X>.
54. Repon, M. R., M. T. Islam, and M. A. A. Mamun. 2017. “Ecological Risk Assessment and Health Safety Considerations During the Enhancement of Color Fastness Properties of Natural Dyed Cotton Through Metallic Mordants.” *Fashion and Textiles* 4 (1), <https://doi.org/10.1186/S40691-017-0109-X>.
55. Rodríguez *et al.*, “Biotic Factors and Concentration of Carminic Acid in Cochineal Insects (*Dactylopius coccus* Costa) (Homoptera: Dactylopiidae),” *Agricultura Técnica*, vol. 65, no. 3, pp. 323–329, Sep. 2005, doi: 10.4067/S0365-28072005000300011.
56. Samanta, A., and A. Konar. 2011. “Dyeing of Textiles with Natural Dyes.” In *Natural Dyes*, edited by A. Konar, 29–50. IntechOpen. <https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=PLqZDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA29>
57. Sankhasti, S., H. Barani, and F. Khazaei. 2025. “Sustainable Dyeing of Wool with Natural Dyes Using Ionic Liquids and Alum Mordant.” *Journal of Molecular Liquids* 401:Artículo 126662. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.126662>.
58. Shahmoradi Ghaheh, F., M. K. Moghaddam, and M. Tehrani. 2021. “Comparison of the Effect of Metal Mordants and Bio-Mordants on the Colorimetric and Antibacterial Properties of Natural Dyes on Cotton Fabric.” *Coloration Technology* 137 (6): 689–698.



59. <https://doi.org/10.1111/cote.12569>.
60. Silva, R. 2007. "Status of Natural Dyes and Dye-Yielding Plants in India." *Current Science* 92 (9): 1275–1282. Socrates, G. 2004. *Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies: Tables and Charts*. Wiley. https://books.google.com/books/about/Infrared_and_Raman_Characteristic_Group.html?hl=es&id=LDoAAjMnwEIC.
61. Strack, D., T. Vogt, and W. Schliemann. 2002. "Recent Advances in Betalain Research." *Phytochemistry* 61 (4): 317–332. Sureshkumar, M. S., V. Vanchinathan, G. Sabareeshwaran, and P. Sivarajan. 2021. "Hydrophilicity in Natural Fibers: A Mini Review." *AIP Conference Proceedings* 2327 (1), Artículo 030018. <https://doi.org/10.1063/5.0039427>.
62. Sucasaca Quispe and E. D. Guevara Garnica, "Efectos del colorante natural inflorescencia de colli (*Buddleja Coriacea*) en la solidez de color de teñido de fibras de alpaca," 2020. doi: 10.54353/ritp.v1i2.e003.
63. Sureshkumar, V. Vanchinathan, G. Sabareeshwaran, and P. Sivarajan, "Hydrophilicity in natural fibers-A mini review," in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Feb. 2021. doi: 10.1063/5.0039427.
64. Tegegne, W., A. Haile, Y. Zeleke, Y. Temesgen, H. Bantie, and S. Biyable. 2024. "Natural Dyeing and Anti-Bacterial Finishing of Cotton Fabric with Extracts from *Justicia Schimperiana* Leaf Extract: A Step Towards Sustainable Dyeing and Finishing." *International Journal of Sustainable Engineering* 17 (1): 1–10. <https://doi.org/10.1080/19397038.2023.2301702>.
65. Wijayati, N., L. R. Lestari, L. A. Wulandari, F. W. Mahatmanti, S. K. Rakainsa, E. Cahyono, and R. A. Wahab. 2021. "Potassium Alum [KAl(SO₄)₂ · 12H₂O] Is a Solid Catalyst for the Effective and Selective Methoxylation Production of Alpha-Pinene Ether Products." *Heliyon* 7 (1), e06058. Artículo e06058. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021. e06058>.



66. Wuliji, G. H. Davis, K. G. Dodds, P. R. Turner, R. N. Andrews, and G. D. Bruce, "Production performance, repeatability and heritability estimates for live weight, fleece weight and fiber characteristics of alpacas in New Zealand," *Small Ruminant Research*, pp. 189–201, 2000, doi: 10.1016/S0921-4488(00)00127-9.
67. Yadav, S., H. C. Prajapati, S. P. Sonkar, R. S. Nigam, R. Chandravanshi, and C. Gupta. 2025. "Innovations in Natural Dye Production: Bridging Tradition and Modern Technology." *Frontiers in Plant Science* 16, Artículo 1568094. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.156809>.



ANEXOS

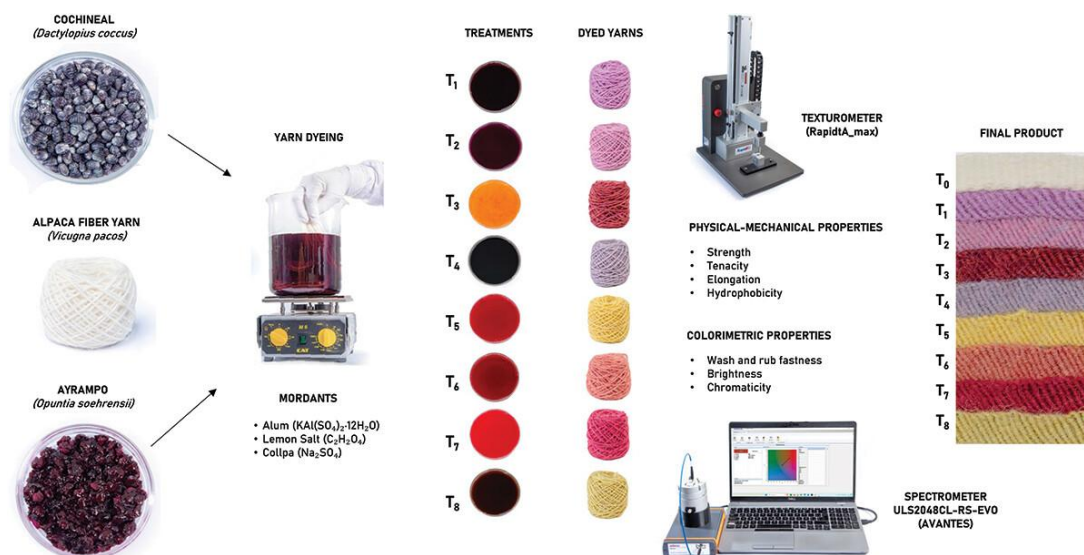


Figura 4 — Graphical abstract (Resumen): Dyeing process and measurement of physico-mechanical properties of the samples