



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, VINCULACIÓN Y
POSGRADO
DIRECCIÓN DE POSGRADO

Análisis crítico de métodos sostenibles alternativos para el blanqueamiento de
la Fibra de Alpaca: una revisión bibliográfica

Tesis previa a la obtención del grado de
Magíster Agroindustrial

Autor:

Ing. Janeth Araceli Agualongo Arevalo

Tutor:

Mgs. Sebastián Alberto Guerrero Luzuriaga

Riobamba – Ecuador. 2025

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **Janeth Araceli Agualongo Arevalo**, con número único de identificación **0201575891** declaro y acepto ser responsable de las ideas, doctrinas, resultados y lineamientos alternativos realizados en el presente trabajo de titulación denominado: **“ANÁLISIS CRÍTICO DE MÉTODOS SOSTENIBLES ALTERNATIVOS PARA EL BLANQUEAMIENTO DE LA FIBRA DE ALPACA: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA”**, previo a la obtención del grado de Magíster en Agroindustrias.

- Declaro que mi trabajo investigativo pertenece al patrimonio de la Universidad Nacional de Chimborazo de conformidad con lo establecido en el artículo 20 literal j) de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.
- Autorizo a la Universidad Nacional de Chimborazo que pueda hacer uso del referido trabajo de titulación y a difundirlo como estime conveniente por cualquier medio conocido, y para que sea integrado en formato digital al Sistema de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor, dando cumplimiento de esta manera a lo estipulado en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.

Riobamba, 25 de Septiembre 2025



Ing. Janeth Araceli Agualongo Arevalo

N.U.I. 0201575891



ACTA DE CULMINACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

En la ciudad de Riobamba, a 2 días del mes de Octubre del año 2025, los miembros del Tribunal designado por la Comisión de Posgrado de la Universidad Nacional de Chimborazo, reunidos con el propósito de analizar y evaluar el Trabajo de Titulación bajo la modalidad Proyecto de titulación con componente investigación aplicada y/o desarrollo, CERTIFICAMOS lo siguiente:

Que, una vez revisado el trabajo titulado: **ANÁLISIS CRÍTICO DE MÉTODOS SOSTENIBLES ALTERNATIVOS PARA EL BLANQUEAMIENTO DE LA FIBRA DE ALPACA: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**, perteneciente a la línea de investigación: Sistemas de Producción y Desarrollo Agroindustrial, presentado por el maestrante **Janeth Araceli Agualongo Arevalo**, portador de la cédula de ciudadanía **No.0201575891**, estudiante del programa de Maestría en Agroindustrias, se ha verificado que dicho trabajo cumple al 100% con los parámetros establecidos por la Dirección de Posgrado de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Es todo cuanto podemos certificar, en honor a la verdad y para los fines pertinentes.

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:
**SEBASTIAN ALBERTO
GUERRERO LUZURIAGA**

Validar electrónicamente con FirmaAC

Mgs. Sebastián Guerrero

TUTOR



Firmado electrónicamente por:
**CRISTIAN JAVIER
PATIÑO VIDAL**

Validar electrónicamente con FirmaAC

Ing. Cristian Patiño PhD.

MIEMBRO DEL
TRIBUNAL 1



Firmado electrónicamente por:
**VICTOR HUGO
VALVERDE OROZCO**

Validar electrónicamente con FirmaAC

Ing. Víctor Valverde PhD.

MIEMBRO DEL
TRIBUNAL 2



Riobamba, 7 de Octubre del 2025

CERTIFICADO DE CONTENIDO DE SIMILITUD

De mi consideración:

Yo **Sebastián Alberto Guerrero Luzuriaga**, certifico que **Janeth Araceli Agualongo Arevalo** con cédula de identidad **No. 0201575891** estudiante del programa de **Maestría en Agroindustrias**, cohorte Primera presentó su trabajo de titulación bajo la modalidad de Proyecto de titulación con componente de investigación aplicada/desarrollo denominado: **ANALISIS CRITICO DE METODOS SOSTENIBLES ALTERNATIVOS PARA EL BLANQUEAMIENTO DE LA FIBRA DE ALPACA: UNA REVISION BIBLIOGRAFICA**, el mismo que fue sometido al sistema de verificación de similitud de contenido **COMPILATION** identificando el **2 %** en el texto y 0 en inteligencia artificial (si posee).

Es todo en cuanto puedo certificar en honor a la verdad.

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:
**SEBASTIAN ALBERTO
GUERRERO LUZURIAGA**
Validar únicamente con FirmasC

Mgs. Sebastián Alberto Guerrero Luzuriaga

CI: 0603950577

Adj.-

- Resultado del análisis de similitud(Compilation)

Agradecimiento

Agradezco a Dios por haberme guiado y protegido durante toda mi vida académica, Quiero comenzar expresando mi más sincero agradecimiento al Mgs. Sebastián Alberto Guerrero Luzuriaga, mi tutor de tesis, por su experiencia, paciencia y apoyo constante. Su guía fue fundamental no solo para dar claridad académica a este trabajo, sino también para motivarme en los momentos de duda. Su confianza en mí fue un impulso decisivo para superar cada desafío durante este proceso. A mi familia, especialmente a mis padres, les agradezco profundamente su amor incondicional y apoyo constante a mi hija cuyo amor y energía incondicional han sido mi motor fundamental, mi faro en cada desafío y la motivación constante para continuar. Esta tesis es un tributo a tu presencia y a la fuerza que me impulsa cada. Su fe en mí ha sido la fuerza que me permitió seguir adelante y concluir este camino. A mis hermanas y hermano gracias por sus palabras de aliento, y a mis abuelos, por su presencia y cariño, quienes han sido un pilar en los momentos difíciles. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

Un agradecimiento especial a la prestigiosa Universidad Nacional de Chimborazo por brindarme la oportunidad de crecer tanto académica como profesionalmente. Mi reconocimiento se extiende al Departamento de Investigaciones, cuyo apoyo y disposición fueron esenciales para finalizar esta tesis. Valoro mucho la confianza que depositaron en mi trabajo y el ambiente tan enriquecedor que me ofrecieron para aprender. Por último, agradezco sinceramente a todos los colegas y colaboradores que participaron en esta investigación.

Araceli

Dedicatoria

Dedico esta tesis, en primer lugar, a Dios, mi fuente inagotable de vida y fortaleza, quien ha sido mi guía y sostén en cada paso de este camino, iluminando mi senda incluso en los momentos más difíciles. A mis queridos padres, les agradezco profundamente por su amor incondicional, sus enseñanzas y sacrificios, que han sido el fundamento sobre el cual he construido mi crecimiento y perseverancia. A mi hija, mi mayor inspiración y alegría, gracias por ser el motor que impulsa mi esfuerzo y la razón por la que nunca pierdo la esperanza ni el entusiasmo. A mi hermano y a mis hermanas, les reconozco con cariño su apoyo constante, su compañía y las palabras alentadoras que siempre han iluminado mis días. Y a todos mis conocidos, que con su amistad, consejos y buena energía han acompañado esta etapa tan significativa de mi vida, les expreso mi más sincero agradecimiento. Esta dedicatoria es un humilde gesto de gratitud para todos ustedes, quienes han hecho posible que este sueño se transforme en realidad.

Araceli

ÍNDICE

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	II
ACTA DE CULMINACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN.....	III
CERTIFICADO ANTIPLAGIO	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
DEDICATORIA.....	VI
ÍNDICE.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	XI
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO I.....	4
1. GENERALIDADES	4
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.2 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.3 OBJETIVOS.....	6
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	6
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
CAPÍTULO II.....	7
2. ESTADO DEL ARTE	7
2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVO	7
2.2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE FIBRAS.....	12
2.2.1	
ALPACA.....	12
2.2.3 FIBRA DE ALPACA	14

2.2.4 ESTRUCTURA DE LA FIBRA DE ALPACA	14
2.2.5 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA LANA DE ALPACA	14
2.2.6 CLASIFICACIÓN DE LA FIBRA DE ALPACA	15
2.2.7 PROPIEDADES DE LA LANA DE ALPACA (COLOR).....	16
2.2.8 PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS.....	17
2.2.9 BLANQUEAMIENTO DE LA LANA DE ALPACA.....	17
2.2.10 TIPOS DE BLANQUEAMIENTO DE LA ALPACA.....	17
2.2.11 PROCESOS ALTERNATIVOS	18
2.2.12 SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL EN LOS PROCESOS DE BLANQUEAMIENTO.....	19
2.2.13 TENDENCIAS ECOLÓGICAS DE TEXTILES	19
2.2.14 CERTIFICACIONES ECO O BIO	19
CAPÍTULO III	21
3. DISEÑO METODOLÓGICO	21
3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN.....	21
3.2 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	21
3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	21
3.4 POBLACIÓN DE ESTUDIO Y TAMAÑO DE MUESTRA.	22
3.5 MÉTODOS DE ANÁLISIS	22
CAPÍTULO IV	24
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	24
4.1. MATRIZ DE ÍNDICE DE AMARILLEZ Y BLANCURA.....	25
4.2. MATRIZ PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS	27
4.3. MATRIZ DE MORFOLOGÍA SEM.....	29
4.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS HALLADOS EN LOS ARTÍCULOS CIENTÍFICOS DE ÍNDICE DE AMARILLEZ Y BLANCURA	31
4.5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS HALLADOS EN LOS ARTÍCULOS CIENTÍFICOS DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LA LANA	33

4.6. ANÁLISIS DE IMÁGENES SEM DE LA FIBRA BLANQUEADAS POR DIFERENTES MÉTODOS HALLADOS EN LOS ARTÍCULOS CIENTÍFICOS	35
CAPITULO V	38
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	38
5.1. CONCLUSIONES.....	38
5.2. RECOMENDACIONES	39
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de blanqueamiento asistido por ultrasonidos, personalizado para el cabello de yak, activado por la reacción de Fenton dirigida a la melanina.	8
Tabla 2: Un método de blanqueo ecológico para fibra de cachemira con peróxido de hidrógeno y lacasa en SCF-CO ₂ evitando la descarga de grandes cantidades de efluentes .	9
Tabla 3: Grado de blancura de lanas crudas y lanas blanqueadas industriales en la empresa X.	9
Tabla 4: Propiedades Físico-mecánicas de las especies examinadas	11
Tabla 5: Los Principales Estados Productores De Fibra De Base Agrícola En La India	12
Tabla 6: Clasificación De La Lana De Alpaca	15
Tabla 7: Requisitos de la fibra de alpaca	16
Tabla 8: Certificaciones conforme al Reglamento UE 1007/2011.....	19
Tabla 9: Estudios relacionados al índice de amarillez y blancura	25
Tabla 10: Estudios relacionados a las Propiedades físico-mecánicas de la fibra de alpaca	27
Tabla 11: Estudios relacionados a la Morfología de la fibra por SEM	29
Tabla 12: índice de blancura (IB) e índice de amarillez (IA)	31
Tabla 13: Propiedades físico-mecánicas de la fibra de ovino	33

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Estrategia propuesta de blanqueamiento asistido por ultrasonido para fibra de yak	7
Ilustración 2: Imagen SEM de la estructura de la fibra posterior al ultrasonido	8
Ilustración 3: Imágenes SEM de fibras tratadas con diferentes agentes oxidantes	10
Ilustración 4: Huacaya	13
Ilustración 5: Suri	13
Ilustración 6: Estructura de fibra de lana	14
Ilustración 7: Estructura química de la queratina	15
Ilustración 8: Diagrama prisma para el análisis crítico de métodos sostenibles alternativos para el blanqueamiento de la fibra de alpaca	24
Ilustración 9: imágenes SEM de cada tratamiento	35

Resumen

La fibra de alpaca, conocida por su suavidad, durabilidad y propiedades térmicas, es un recurso valioso en la industria textil. Sin embargo, el blanqueamiento, una etapa esencial en su procesamiento, plantea desafíos ambientales y económicos debido al uso de agentes químicos agresivos, altos consumo de agua y energía. Este trabajo analiza alternativas sostenibles para los procesos convencionales de blanqueamiento de fibra de alpaca, enfocándose en minimizar el impacto ambiental y preservar la calidad intrínseca de la fibra. Los métodos alternativos incluyen el uso de agentes blanqueadores como peróxidos biológicos, ecológicos como extractos de plantas, así como técnicas basadas en procesos enzimáticos y tecnologías emergentes como el blanqueamiento con ultrasonido. Estas innovaciones no solo reducen la necesidad de químicos tóxicos como el cloro, sino que también optimizan el consumo de recursos y disminuyen los residuos. El análisis bibliográfico destaca las ventajas y limitaciones de cada método, considerando parámetros como eficiencia de blanqueamiento, conservación de propiedades físicas de la fibra, viabilidad técnica, económica, y sostenibilidad. Este enfoque permite identificar soluciones prácticas para la industria textil que integren calidad y compromiso ambiental, promoviendo un procesamiento más responsable de la fibra de alpaca en mercados internacionales.

Palabras claves: Fibra de alpaca, Blanqueamiento ecológico, Sostenibilidad textil, Procesos enzimáticos, Tecnologías emergentes.

ABSTRACT

Alpaca fiber, renowned for its softness, durability, and thermal properties, is a highly valued resource in the textile industry. However, bleaching, a crucial stage in its processing, presents environmental and economic challenges due to the use of harsh chemical agents and high water and energy consumption. This work examines sustainable alternatives to conventional alpaca fiber bleaching processes, with a focus on minimizing environmental impact while preserving the intrinsic quality of the fiber. The alternative methods include the use of bleaching agents such as biological peroxides, eco-friendly plant-based extracts, as well as techniques based on enzymatic processes and emerging technologies such as ultrasound-assisted bleaching. These innovations not only reduce the need for toxic chemicals like chlorine but also optimize resource consumption and decrease waste generation. The literature review highlights the advantages and limitations of each method, considering parameters such as bleaching efficiency, preservation of the fiber's physical properties, technical and economic feasibility, and overall sustainability. This approach allows the identification of practical solutions for the textile industry that integrate quality with environmental commitment, promoting more responsible processing of alpaca fiber in international markets.

Keywords: Alpaca fiber, Eco-friendly bleaching, Textile sustainability, Enzymatic processes, Emerging technologies.



Firmado electrónicamente por:
**SOFIA FERNANDA
FREIRE CARRILLO**

Validar únicamente con FirmaEC

Reviewed by:

Mgs. Sofia Freire Carrillo

ENGLISH PROFESSOR

C.C. 0604257881

Introducción

La alpaca (*Vicugna pacos*) es una de las especies de animales domésticos más importantes entre los camélidos que habitan en Sudamérica de gran importancia económica, ya que proporcionan fibra y carne, estos animales de cuerpo esbelto, están cubiertos por un vellón de diversos colores, siendo el blanco el preferido por los productores. La cría de alpacas se centra en la producción de fibras de alta calidad, ya que es muy apreciada en la industria textil por sus propiedades, e incluso conocidas como "fibras nobles" (Cruz et al., 2021).

En comparación con las fibras de otras especies animales, y especialmente las fibras de oveja, que son las más populares en la industria textil, las fibras de alpaca se caracterizan por sus mejores propiedades de aislamiento mecánico y térmico (Jankowska et al., 2021). Estas fibras tienen propiedades destacadas como alto módulo, baja densidad, costo reducido, reciclabilidad, no toxicidad y fácil accesibilidad. Estas propiedades hacen de las fibras naturales una opción atractiva y sostenible para industrias e investigadores que buscan alternativas respetuosas con el medio ambiente (Kılınç et al., 2017).

En términos económicos, los aspectos más relevantes de las fibras de alpaca son el diámetro, la longitud, además del color y el peso del vellón. Ellas tienen un impacto sobre las propiedades mecánicas y los atributos del producto final (Quispe et al., 2023).

Por ello, las fibras obtenidas representan una tendencia emergente en el mercado textil, contribuyendo a reducir el impacto ambiental y alineándose con las demandas de los consumidores, los métodos alternativos en el procesamiento de fibras pueden incluir el uso de agentes blanqueadores ecológicos como ozono, así como técnicas basadas en procesos enzimáticos y procesos tecnológicos emergentes como el plasma y ultrasonido (Erdoğan et al., 2021).

En este contexto, es necesario analizar detalladamente cada proceso alternativo en el blanqueamiento en la lana de alpaca, con el uso de agentes blanqueadores ecológicos y tecnologías emergentes. Estas alternativas están tomando fuerza por el impacto que tiene hacia la fibra, así como características diferentes y la optimización de procesos. Se espera que los resultados de esta investigación permitan determinar cuál es el mejor proceso y tecnología emergente.

CAPÍTULO I

1. Generalidades

1.1 Planteamiento Del Problema

La industria textil enfrenta una creciente preocupación debido a los métodos tradicionales de procesamiento de fibras animales, como la fibra de alpaca, que generan grandes volúmenes de efluentes tóxicos con impactos significativos en el medio ambiente. Estos métodos, que incluyen carbonización, blanqueo con disolventes y lavado tradicional con detergentes o agua caliente, utilizan compuestos químicos agresivos y grandes cantidades de agua dulce. Aunque eficaces para la eliminación de impurezas como sudor, grasa y materia vegetal, estos procesos comprometen las propiedades mecánicas y químicas de las fibras, además de ser ambientalmente insostenibles (Abrar et al., 2021).

Sin embargo, los métodos tradicionales de blanqueamiento a menudo implican el uso de productos químicos agresivos que pueden tener impactos negativos tanto en el medio ambiente como en la salud de los trabajadores. Estos productos químicos, como el peróxido de hidrógeno y el hipoclorito de sodio, generan residuos tóxicos que contaminan cuerpos de agua y suelos, afectando la biodiversidad y la salud pública (Farr et al.,)

El blanqueamiento de esta fibra comúnmente se realiza mediante el uso del peróxido de hidrógeno, ya que es muy efectivo para lograr la decoloración deseada, este puede afectar a las características intrínsecas de la fibra tanto en el color, el porcentaje de medulación y la integridad estructural de la fibra (Cardamone et al., 2004).

Sin embargo, la transición hacia métodos ecológicos plantea desafíos técnicos y económicos, como el desarrollo de soluciones que reduzcan el consumo de energía mediante la optimización de procesos, que empleen productos químicos o ecológicos para minimizar los residuos y emisiones. Entre estas alternativas se encuentran el uso de enzimas biodegradables, tratamientos con ultrasonido y el empleo de enzimas beneficiosas (Erdoğan et al., 2021).

Uno de los principales problemas que enfrenta actualmente la investigación sobre el blanqueamiento de la lana de alpaca es la limitada y desactualizada información disponible en la literatura científica. Gran parte de los estudios existentes se centran en métodos tradicionales, principalmente basados en agentes químicos como el peróxido de hidrógeno, sin abordar de manera suficiente el impacto de nuevas tecnologías más sostenibles como el ultrasonido, las enzimas o los extractos de plantas. Esta carencia de evidencia actualizada dificulta establecer comparaciones críticas y objetivas sobre el efecto de los métodos alternativos en parámetros determinantes como el índice de amarillez, la blancura, las propiedades fisicomecánicas y la morfología de la fibra, lo que limita la generación de procesos innovadores y sostenibles aplicables al sector textil

1.2 Justificación de la Investigación

Sudamérica tiene alrededor de cuatro millones de alpaca, Perú representan la mayor población de alpaca del mundo, Otros países con una alta población de alpaca son: Bolivia, Chile y Ecuador. Recientemente, el Ministerio de Agricultura y Riego de Perú (MINAGRI) declaró que este país tiene alrededor de 3.8 millones de alpacas, que es el 87% de la población mundial de alpaca (Candio, 2020). La cría de alpacas ofrece: producción de fibra para los mercados nacional y mundial, producción de carne para el mercado nacional, reproductores y pieles como productos secundarios o subproductos.

En Ecuador, se estima que hay entre 6,000 y 7,000 alpacas. La mayoría de estas alpacas (alrededor del 80%) son propiedad de comunidades rurales y asociaciones, mientras que el resto pertenece a criadores privados o instituciones públicas. Las alpacas son importantes para la economía local, ya que proporcionan ingresos a sus criadores y ayudan a proteger los páramos andinos. Es así como en los últimos años hubo esfuerzos por parte del estado a través del MINAGRI, gobiernos regionales y organismos no gubernamentales, en apoyar programas de mejoramiento genético de alpacas; sin embargo, no consideraron los posibles escenarios económicos en los que se ven involucrados los productores de alpacas debido a la forma de pago y calidad de la fibra (Cruz et al., 2021).

Actualmente existen productores individuales, asociaciones y empresas privadas que se dedican a la crianza de alpacas, la cual se desarrolla en completa armonía con el ambiente haciendo sostenible el ecosistema altoandino, la alpaca ofrece una gran diversidad de colores, permitiendo aprovechar más de 23 tonos de colores naturales en las prendas sin hacer uso de teñidos lo cual la convierte en una fibra eco amigable por su alta calidad textil permite elaborar prendas de vestir de buena calidad y elevada cotización internacional (Paitan, 2019).

Sin embargo, la demanda del mercado por una variedad de colores y matices más amplia requiere la implementación de procesos y tecnologías sostenibles que puedan ofrecer ventajas competitivas a las empresas textiles y productores locales, así alineándose con las demandas del mercado y las regulaciones ambientales cada vez más estrictas, el valor comercial de la fibra de alpaca muchas veces no es el mejor para los productores. Ejemplos como el del cashmere en mongolia donde la fibra de esta especie gracias a las certiicaciones ecologicas organicas han promovido un valor mas alto para los productores pueden ser un ejemplo para el mercado de la fibra de alpaca (Martínez et al., 2022).

Desde el punto de vista teórico, se realiza esta investigación, para abordar las nuevas tendencias en el proceso del blanqueamiento de las fibras mediante el uso de diferentes métodos, como, el uso de enzimas, extractos de plantas, y nuevas tecnologías como el ultrasonido, para demostrar cómo influye en la fibra. además, se plantea aportar con evidencia científica mediante la recopilación de resultados de investigaciones previas para el desarrollo de posteriores trabajos.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo General*

- Analizar De Forma Critica Los Métodos Sostenibles Alternativos Para El Blanqueamiento De La Fibra De Alpaca, A Través De Una Investigación Bibliográfica.

1.3.2 *Objetivos Específicos*

- Identificar Los Diferentes Métodos Alternativos Para El Blanqueamiento De Fibra de Alpaca.
- Revisar y actualizar la bibliografía científica sobre el blanqueamiento sostenible de la fibra de alpaca, asegurando la inclusión de publicaciones recientes y relevantes sobre el tema
- Proponer recomendaciones para la implementación de métodos sostenibles en la industria textil, basadas en los hallazgos de la revisión bibliográfica.

CAPÍTULO II

2. Estado del Arte

2.1 Antecedentes Investigativo

El Estudio De (Li et al., 2022) “Una Estrategia Eficiente De Decoloración Asistida Por Ultrasonidos, Personalizada Para Cabello De Yak, Activada Por La Reacción De Fenton Dirigida A La Melanina.” Analiza una estrategia de blanqueo ultrasónico para fibras secundarias oscuras, como el pelo de yak, utilizando un proceso de oxidación Fenton enfocado en la melanina. El método se compone de tres fases principales: incorporación de iones Fe^{2+} a la melanina, blanqueo oxidativo catalítico con H_2O_2 y limpieza reductora.

Los aspectos evaluados más importantes fueron, la eficiencia del blanqueo y la resistencia a la tracción del pelo de yak tratado en diferentes tratamientos con presencia y ausencia de ultrasonido, además se investigaron efectos de los iones de Fe^{2+} , la descomposición del H_2O_2 y su efecto en la eliminación de gránulos de melanina por ultrasonido. Esta investigación demuestra que el uso de ultrasonido potencia la generación de radicales hidroxilos (OH) que son los principales agentes oxidativos en el proceso, que ayudan a la degradación de la melanina, además se tomó en cuenta otros aspectos como la integridad de la fibra enfatizando en su estructura cuticular y la alteración en su composición específicamente en los enlaces disulfuros, que son los responsables en las propiedades fisicomecánicas de la fibra. la implementación de este tipo de métodos ayuda a generar procesos alternativos para la manufactura de la lana.

Ilustración 1: Estrategia propuesta de blanqueamiento asistido por ultrasonido para fibra de yak



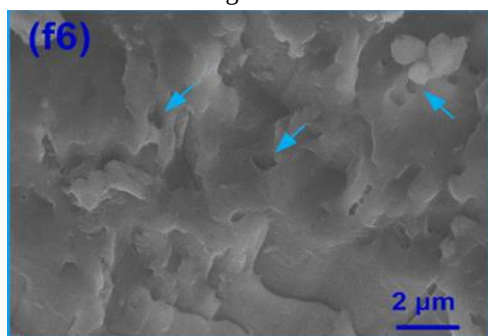
Nota.

“An efficient ultrasonic-assisted bleaching strategy customized for yak hair triggered by melanin-targeted Fenton reaction” por (Li et al., 2022a)

Tabla 1: Características de blanqueamiento asistido por ultrasonidos, personalizado para el cabello de yak, activado por la reacción de Fenton dirigida a la melanina.

Características	Valor/ Descripción
Índice de blancura (WI)	Incremento de 11 a 45 (44.6 % superior al blanqueo sin ultrasonido). Valor teórico máximo: 52.4 (según CCD).
Pérdida de resistencia a la tracción	15 % debido a un leve daño en la cutícula.
Aumento de elongación	Incremento del 14 % debido a la ruptura de enlaces disulfuro.
Descomposición de H_2O_2 (sin ultrasonido)	Mejora del 20.9 % con Fe^{2+} .
Descomposición de H_2O_2 (con ultrasonido)	Mejora del 35.9 %.
Concentración de radicales HO	Incremento del 94 % (confirmado en experimentos de eliminación de HO-).
Estructura de la fibra	Presencia de una estructura porosa debido a la eliminación de gránulos de melanina.

Ilustración 2: Imagen SEM de la estructura de la fibra posterior al ultrasonido



Nota. “An efficient ultrasonic-assisted bleaching strategy customized for yak hair triggered by melanin-targeted Fenton reaction” por (Li et al., 2022a)

El Estudio De (Wang Et Al., 2024) “Un Método De Blanqueo Ecológico Para Fibra De Cachemira Con Peróxido De Hidrógeno Y Lacasa En Scf-Co2 Evitando La Descarga De Grandes Cantidades De Efluentes”. Presenta un enfoque innovador para el blanqueo ecológico de la fibra de cachemira mediante el uso de la enzima lacasa (LA) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en un fluido supercrítico de dióxido de carbono (SCF- CO_2). Este método utiliza un sistema eficiente de transferencia de agentes blanqueadores y catalizadores biológicos para eliminar eficazmente los colorantes naturales presentes en la fibra. Factores clave como las dosis de H_2O_2 y la temperatura, la presión y la duración del tratamiento influyen significativamente en la eficiencia del proceso.

El método ecológico, demostró la reducción de daños en la fibra, conservando propiedades térmicas y fisicomecánicas, la despigmentación de la fibra se comprobó mediante técnicas avanzadas como espectroscopia de energía de rayos X (EDS) y microscopia electrónica de barrido (SEM). En condiciones críticas permitió evitar el uso

excesivo de productos químicos, reduciendo aguas residuales y efluentes. este método es una solución sostenible para la generación de fibras más claras, siendo el punto de partida para la que la industria textil sea más respetuosa con el medio ambiente.

Tabla 2: Un método de blanqueo ecológico para fibra de cachemira con peróxido de hidrógeno y lacasa en SCF-CO₂ evitando la descarga de grandes cantidades de efluentes

Características	Valor/Descripción
Índice de blancura (WI)	83.39%
Solubilidad alcalina	15.55%
Daños en la fibra	Reducidos
Impacto en propiedades térmicas	Mínimo
Impacto en propiedades mecánicas	Mínimo
Eliminación de colorantes naturales	Validada mediante EDS y SEM
Generación de efluentes	Mínima o nula

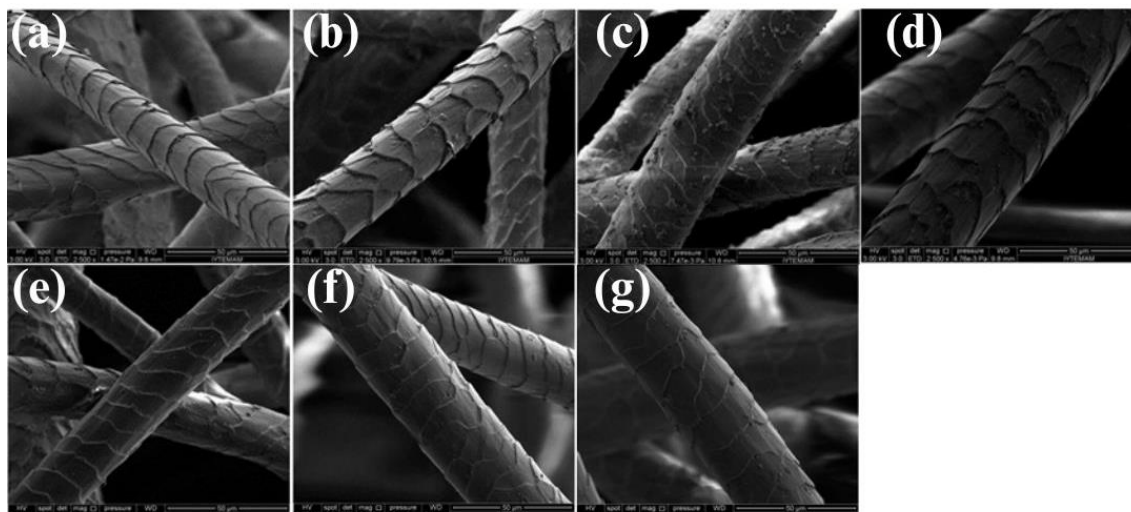
El Estudio de (Erdoğan et al., 2021) “Investigación De Métodos Alternativos De Blanqueo Ecológico De Fibras De Lana. Presento las técnicas de blanqueo de fibras de lana son: blanqueo con agentes reductores, blanqueo con agentes oxidantes y blanqueo con combinación de agentes oxidantes y reductores. En este estudio se han desarrollado diferentes métodos químicos de blanqueo como alternativa al método convencional utilizo fibra de lana estándar sin tratar de 28 micras. Para cada proceso, se pesan 5 g de lana estándar. Las técnicas de blanqueo de fibras de lana son: blanqueo con agentes reductores, blanqueo con agentes oxidantes y blanqueo con combinación de agentes oxidantes y reductores.

Tabla 3: Grado de blancura de lanas crudas y lanas blanqueadas industriales en la empresa X.

	Receta De Blanqueamiento	Wi-Berger	Wi-Cie	Yi-E313
Lana Cruda	30 g/L de H ₂ O ₂ + 1 g/L de NH ₃ 60°C 30 minutos.	4.13	-23.64	30.91
Proceso de la Compañía “X”	30 g/L de H ₂ O ₂ + 1 g/L de NH ₃	11.82	-16.85	25.54
	30 g/L de H ₂ O ₂ + 1 g/L de NH ₃	27.50	18.15	11.16

En los estudios de blanqueo realizados a partir de imágenes de SEM, se observa que la tendencia al fieltrado de la lana ha disminuido y que el proceso aplicado no ha producido deformación en la superficie. Si se considera que la luz reflejada por las superficies lisas será mayor, esto significa que, tras aplicar un agente blanqueador óptico, se obtendrán fibras blancas más brillantes en las superficies lisas.

Ilustración 3: Imágenes SEM de fibras tratadas con diferentes agentes oxidantes



- **Ilustración 3a.** Imagen SEM de fibra de lana tratada con NaDCC al 1% a pH 5,5 y 30 °C.
- **Ilustración 3b.** Imagen SEM de fibra de lana **con 10 g/L** de ácido peracético a pH 55,5 y 60°C.
- **Ilustración 3c.** Imagen SEM de fibra de lana tratada con 3% NaBH₄ + 10 g/L H₂O₂ a pH 8 y 60.
- **Ilustración 3d.** Imagen SEM de fibra de lana tratada con 3% NaBH₄ + 10 g/L H₂O₂ a pH 5,5 y 60 °C.
- **Ilustración 3e.** Imagen SEM de fibra de la tratada con un 1 % NaBH₄ a pH 8 y 60^a C.
- **Ilustración 3f.** Imagen SEM de fibra de lana tratada con 15g/LH₂O₂ a pH8 y 60^a C.
- **Ilustración 3g.** Imagen SEM de fibra de lana tratada con 30 g/L de H₂O₂, 1 g/L de NH₃ a pH 8 y 60 °C (primer paso) y 4 g/L de hidrosulfito de sodio + 2 g/L de metabisulfito de sodio a 60 °C (segundo paso).

Las imágenes de microscopía electrónica (SEM) muestran que al tratar la fibra de lana con diferentes agentes y concentraciones, se logra eliminar o aplanar las escamas superficiales sin dañar la fibra, lo que mejora sus propiedades: el tratamiento con NaDCC (Dicloruro de sodio) al 1% mantiene la superficie limpia y lisa, potenciando la capacidad de teñido y reduciendo el fieltro; el ácido peracético, a concentraciones mayores, desprende las escamas que causan deformaciones, aumentando también el teñido y disminuyendo el fieltro; y en ambientes básicos, casi todas las escamas desaparecen, logrando la mejor combinación de tinte y resistencia al fieltro, especialmente cuando a 15 g/L las escamas se desintegran, confirmando la obtención de fibras con propiedades anti fieltro. Como resultado, dentro del alcance del estudio, se desarrollan métodos alternativos de blanqueo que se realizan utilizando menos agua y energía en un solo paso teniendo niveles de blancura industrial sin dañar ni apelmazar la fibra.

El Estudio de (Jankowska et al., 2021) “Comparación De Las Propiedades Físico-Mecánicas De Fibras E Hilos De Lana De Alpaca, Oveja Y Cabra. Revista De Fibras Naturales, fue incluido el análisis físico-mecánico de propiedades de la fibra y el hilo: como diámetro, fuerza de rotura, elongación en rotura, módulo joven, rotura de tensión y energía de tensión se utilizó lana de animales de un año de edad, por la posibilidad de comparar individuos no afectados por factores fisiológicos, como la reproducción, pero con un pelaje completamente desarrollado al mismo tiempo, las propiedades físicas y mecánicas seleccionadas de las fibras mostró que las fibras de cabra son la más rígida, pero al mismo tiempo la más duradera, mientras que el hilo hecho de fibras de oveja es el más resistente, el hilo de fibras de alpaca es el más elástico, y el de las fibras de cabra es el más rígido.

Tabla 4: Propiedades Físico-mecánicas de las especies examinadas

Tipo de hilo	Fuerza de ruptura (cN)	Elongación a la ruptura ε (%)	Módulo de Elasticidad E (MPa)
Hilo de fibra de oveja	2.314	42	416,14
Hilo de fibra de alpaca	3.036	33	340,82
Hilo de fibra de cabra	2.714	27	527,35

Nota. cN = centi newton, MPa = Megapascasles. Tomado de Comparison of Physic-mechanical Properties of Fibre and Yarn Made of Alpaca, Sheep, and Goat Wool, por Jankowska et al., 2021

Se encontró una diferencia estadísticamente significativa en el módulo de Young, siendo mayor para las fibras de cabra (3540,93 MPa) en comparación con las de alpaca y oveja. El análisis de la fuerza máxima de ruptura (FMAX) para los hilos fabricados con fibras de las diferentes especies animales reveló que las fibras de alpaca generaron hilos con el mayor valor de esta propiedad (3036 cN) además, la FMAX de los hilos de alpaca fue significativamente superior a la de los hilos hechos con fibras de oveja, alpaca (2314 cN).

El Estudio de (Bhuyan et al., 2020) “Fibras Naturales: Innovadoras, Sostenibles Y Ecológicas. Revista Internacional De Microbiología Actual Y Ciencias Aplicadas. Este trabajo de investigación busca ilustrar la presencia de fibras naturales en el sector textil, producidas a partir de fuentes naturales, lo que facilita un entorno limpio y ecológico, además de tener un efecto positivo en la salud humana. Además, este documento enfatizó en el concepto de viaje del textil ecológico junto con la sostenibilidad relacionada con el sector textil en relación con los productos naturales.

Ante los problemas ambientales y el calentamiento global, la gente está reconociendo el uso de productos naturales. Por lo tanto, el uso de fibras sostenibles como materia prima para la fabricación de productos textiles de moda es una estrategia hacia la sostenibilidad que impulsará nuestra economía y contribuirá a un medio ambiente sano y limpio este artículo se centró en la clasificación de la estructura y las propiedades de las diferentes fibras.

Tabla 5: Los Principales Estados Productores De Fibra De Base Agrícola En La India

Fibra	Estado Productor Principal De Fibra
Sisal	Sisal Maharastra
Pino tornillo	Kerala
Hoja de palma	Tamil Nadu y Kerala
Hierba korai	Tamil Nadu y Kerala
Fibra de hoja de piña	Meghalaya
Sitalpati	Assam, Meghalaya
Bambú	Noreste de la India
Hierba sikki y mung Cáñamo	Bihar
sisal, ortiga del Himalaya 10) Plátano	Uttarakhand

Nota. (Bhuyan et al., 2020)

Esto resulta en la producción a gran escala de fibras limitadas en un sector agrícola específico, lo que reduce la elección del consumidor y aumenta numerosos riesgos, como los ecológicos y ambientales. Ante los problemas ambientales y el calentamiento global, la gente está reconociendo el uso de productos naturales. Por lo tanto, el uso de fibras sostenibles como materia prima para la fabricación de productos textiles de moda es una estrategia hacia la sostenibilidad que impulsará nuestra economía y contribuirá a un medio ambiente sano y limpio.⁴

2.2 Fundamentación Teórica De Fibras

2.2.1 Alpaca

La alpaca forma parte de los denominados camélidos sudamericanos, su fibra se considera de lujo y ser el principal producto comercial de la alpaca. La fibra de alpaca constituye uno de los recursos textiles más valiosos provenientes de los Andes sudamericanos, principalmente de Perú, Bolivia y Chile. Este camélido sudamericano, domesticado aproximadamente hace 6.000 años, produce una fibra con excepcionales características que el posicionamiento como una materia prima en la industria textil global (Conterras, 2019).

La alpaca se clasifica en dos razas principales:

Huacaya: Produce fibra esponjosa, risada y densa, representado aproximadamente el 85% de la población mundial de alpacas es un animal resistente al medio ambiente en cuanto a la fibra que produce, esta es más corta que la de la especie.

Ilustración 4: Huacaya

(Perales et al, 2017)

Suri: Genera fibra larga, sedosa y lustrosa, escasa y considerada de alcance valor comercial para algunos técnicos esta especie produce mejor cantidad y calidad de pelo, su fibra es más delgada y larga. Su especie demanda más cuidados en su crianza su vellón tiene la peculiaridad de ser ligeramente más pesado, compuesta por mechas de naturaleza lacia, brillante y suave al tacto.

Ilustración 5: Suri

(Perales et al, 2017).

2.2.2 Fibra Naturales

Las fibras naturales, obtenidas directamente de plantas, animales o minerales sin procesos químicos complejos, fueron las primeras en ser utilizadas por el ser humano en la historia textil. Aunque la naturaleza provee cientos de fibras con propiedades como suavidad y flexibilidad, muy pocas tienen una utilidad práctica a nivel industrial debido a sus limitaciones. Frente a esto, se desarrollaron las fibras de producción química (artificiales o sintéticas) de longitud infinita, que se han convertido en una de las alternativas más innovadoras y cotizadas en el mercado global, destacándose por su gran variedad de colores (Canaza-Cayo et al., 2021a).

Las fibras naturales más importantes son las de origen animal, y la fibra de alpaca y otros camélidos sudamericanos son destacables internacionalmente por sus propiedades térmicas, suavidad y su exclusividad. Estas fibras son muy utilizadas en el sector textil para la elaboración de suéteres, bufandas y guantes. (Zoccola et al., 2023).

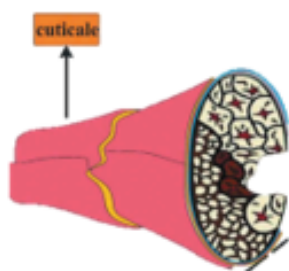
2.2.3 Fibra De Alpaca

Se denomina fibra de alpaca al pelo que proviene de camélidos sudamericanos, es de naturaleza proteica, la proteína principal que la compone es la queratina y contiene una gran cantidad de azufre. La lana tiene una forma rizada, mientras que las fibras de alpaca se caracterizan por una superficie muy fina y lisa. Por eso la llamamos fibra y no lana. La fibra de alpaca tiene propiedades termorreguladoras, tiene la capacidad de absorber humedad y es resistente al fuego debido a su composición química y alta higroscopicidad (Palacios, 2022).

2.2.4 Estructura De La Fibra De Alpaca

La fibra está cubierta por células externas llamada cutícula que forman un recubrimiento alrededor de la queratina. Las células de la cutícula o escamas se superponen como las tejas en un tejado una sobre otra, haciendo que la lana sea única entre las fibras textiles. Este tipo de células cumple la función de anclar las fibras de la lana en la piel de las ovejas (F. Allafi et al., 2022).

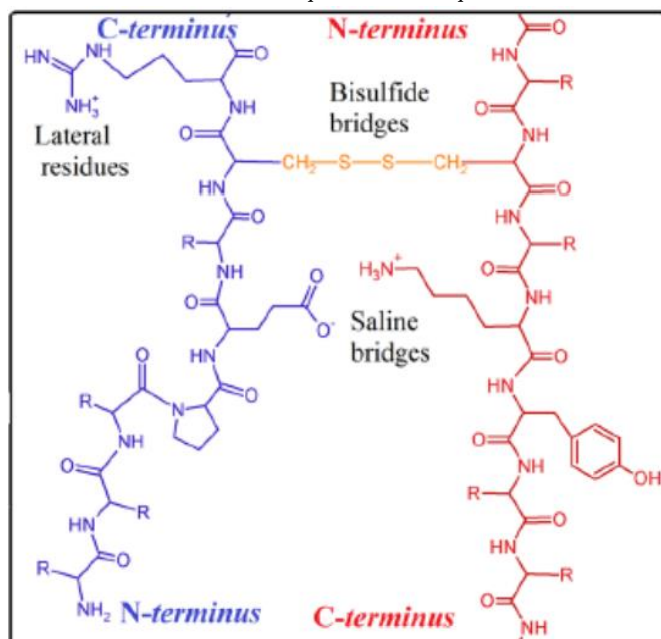
Ilustración 6: Estructura de fibra de lana



Nota. “Advancements in Applications of Natural Wool Fiber” por Allafi et al., 2022.

2.2.5 Composición Química De La Lana De Alpaca

La lana es una proteína denominada queratina, compuesta por 18 aminoácidos que se clasifican en cinco categorías según la naturaleza de su grupo radical. La queratina es un grupo de proteínas fibrosas presentes en células epiteliales de vertebrados como reptiles, aves y mamíferos. Estas proteínas son abundantes en la naturaleza y constituyen la mayor parte del cabello, lana, cuernos, uñas, plumas y el estrato córneo de la piel. Las queratinas se distinguen de otras proteínas estructurales por su alto contenido de residuos de cisteína (7-20% del total de aminoácidos), los cuales forman enlaces disulfuro intra- e intermoleculares. Estos enlaces confieren a la queratina una estructura tridimensional compacta que le otorga alta resistencia frente a ataques químicos y enzimáticos. (Bouagga et al., 2020).

Ilustración 7: Estructura química de la queratina

Nota. “Interacciones químicas entre las cadenas de queratina (proto fibrillas) que dan origen a la fibra” por Allafi et al., 2022.

2.2.6 Clasificación de la Fibra de Alpaca

- **Baby Alpaca:** fibra fina de entre 17 y 23 micrones.
- **Superfina:** fibra con grosor entre 23.1 y 26.5 micrones.
- **Superfina Media:** fibra de 26.5 a 29 micrones.
- **Media:** fibra de 29 a 35 micrones.
- **Gruesa:** fibras mayores a 35 micrones.
- **Fibra Huacaya:** fibra densa, esponjosa y de textura suave.
- **Fibra Suri:** fibra larga, sedosa y brillante.

Tabla 6: Clasificación De La Lana De Alpaca

Clasificación	Micronaje (μm)	Descripción	Normativas
Baby Alpaca (BI)	17 a 23	Fibra fina, suave, generalmente de la primera esquila o animales jóvenes.	Norma Técnica Peruana NTP 231.301:2004
Alpaca Fleece (FS)	23.1 a 26.5	Fibra fina y media, con resistencia y suave al tacto.	Norma Técnica Peruana NTP 231.301:2004
Medium Fleece (FSM)	26.6 a 29	Fibra media, muy gruesa, usada en prendas más	Norma Técnica Peruana NTP 231.301:2004

Alpaca (HZ)	Huarizo	29.1 a 31.5	resistentes y duraderas. Fibra más gruesa, tendencia a ser de menor calidad para textiles finos pero útil en ropa exterior.	Norma Peruana 231.301:2004	Técnica NTP
Alpaca (AG)	Gruesa	> 31.5	Fibra gruesa, de baja finura, para productos rústicos o uso industrial.	Norma Peruana 231.301:2004	Técnica NTP
Alpaca Corta (MP)		Longitud 20-50 mm	Fibra corta, menos valorada en hilados finos, usada para rellenos o productos de menor calidad.	Norma Peruana 231.301:2004	Técnica NTP

Nota. (Díaz et al., 2021)

Sin embargo, para estandarizar la clasificación de las fibras de alpaca se tiene como referencia la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN (2015) N.º. 2852:2015. Que están basadas en la Norma Técnica Peruana (NTP, 2004).

Tabla 7: Requisitos de la fibra de alpaca

Baby alpaca	Fleece		Médium Fleece		Método de Ensayo
	Mín.	Max.	Mín.	Max.	
Finura, μm	18	23	26,6	29	ISO 137
Longitud, mm	60	65	65	70	ISO 2648
Contenido de humedad, (%)	5	8	5	8	NTE INEN 145
Contenido de grasa, (%)	2	4	2	4	NTE INEN 2544-1

Nota. La tabla 1 nos muestra los requisitos mínimos y máximos que se maneja como norma general para clasificar la fibra de alpaca de mejor calidad e intermedia en el territorio ecuatoriano, el diámetro se mide en micras (μm), la longitud en milímetros (mm), el contenido de humedad y grasa debe ser representado en porcentajes y no varía por calidad. Tomado de NTE INEN 2852

2.2.7 Propiedades De La Lana De Alpaca (Color)

La lana de alpaca, se caracteriza por una amplia gama de colores naturales que van desde el blanco al negro, refleja la interacción compleja entre la genética de la raza, el entorno y la nutrición. A través de la selección cuidadosa, las alpacas han evolucionado de producir vellones toscos y oscuros a lanas finas y blancas. Sin embargo, la composición

proteica de la lana puede provocar que amarillento bajo condiciones ambientales extremas y tratamientos químicos agresivos (Quispe et al., 2021).

2.2.8 Propiedades físico-mecánicas

La fibra de alpaca posee propiedades físico-mecánicas que la hacen muy valorada en la industria textil. Es conocida por su suavidad, calidez y durabilidad. Además, es resistente al agua y al fuego, y no contiene lanolina, lo que la hace hipoalergénica

1. Tracción

Es la capacidad a la disposición específica de estructuras en espiral dentro de la fibra de lana, conocidas como hélices alfa. Estas hélices, cuando están orientadas de manera óptima, confieren a la fibra una mayor elasticidad y una menor tendencia a deformarse permanentemente bajo carga. Esto se traduce en una mayor resiliencia y durabilidad, que son características deseables en productos (Lakshmanan, 2022).

2. Tensión – deformación

La fibra de lana de oveja muestra tres fases distintas durante su estiramiento como: elástica, plástica y límite de fractura. En la primera fase, la lana exhibe una respuesta elástica proporcional a la carga aplicada, seguida por una etapa de fluencia donde la estructura de las proteínas se altera para permitir una mayor extensión sin daño. Finalmente, en la fase de límite a la fractura, la fibra se estira hasta un 35% antes de romperse debido a la ruptura de los enlaces de disulfuro (Lakshmanan, 2022).

2.2.9 Blanqueamiento De La Lana De Alpaca

El blanqueamiento de la fibra de alpaca es un proceso importante en la industria textil que permite obtener un color base claro y uniforme, facilitando así la posterior aplicación de tintes y acabados. La fibra de alpaca, conocida por su suavidad y propiedades térmicas, presenta una amplia gama de colores naturales, que van desde el blanco hasta el negro, pasando por diversos tonos intermedios (Duffield et al., 2008)

2.2.10 Tipos De Blanqueamiento De La Alpaca

Blanqueamiento Enzimático

El blanqueamiento enzimático es un método innovador que utiliza enzimas específicas para descomponer los pigmentos y las impurezas de la lana de alpaca. Este proceso es más suave que los métodos químicos tradicionales y puede preservar mejor las propiedades intrínsecas de la fibra, las enzimas como la celulasa y la lignina son efectivas para eliminar los pigmentos sin dañar la estructura de la fibra (Kozłowski et al, 2020)

Blanqueamiento con extractos vegetales

El uso de productos naturales para el blanqueamiento de la lana de alpaca ha ganado popularidad en respuesta a la creciente demanda de prácticas sostenibles. Métodos que utilizan extractos de plantas, como el jugo de limón, pueden ayudar a aclarar la lana de manera más ecológica (Guerrero et al., 2024).

Blanqueamiento con Vapor

El blanqueamiento con vapor es un método físico que utiliza vapor de agua para abrir la estructura de la fibra y facilitar la eliminación de impurezas y pigmentos. Este proceso puede ser combinado con tratamientos de limpieza para mejorar la eficacia del blanqueo. Aunque el blanqueamiento con vapor puede no ser tan efectivo como los métodos químicos para lograr un color blanco puro, puede ser útil en combinación con otros tratamientos para mejorar la calidad de la lana (Erdoğan et al., 2021).

Blanqueamiento Químico

El blanqueamiento químico es el método más utilizado en la industria textil para eliminar los pigmentos naturales de la lana de alpaca. Este proceso implica el uso de agentes blanqueadores que actúan sobre los enlaces químicos de los pigmentos, descomponiéndolos y permitiendo que la fibra adquiera un color más claro. Los agentes blanqueadores más comunes incluyen:

Blanqueamiento del Hipoclorito de Sodio

Este es otro agente blanqueador común que se utiliza en el blanqueamiento de la lana de alpaca. Aunque es efectivo para eliminar pigmentos, su uso debe ser cuidadosamente controlado, ya que puede debilitar la fibra si se aplica en concentraciones demasiado altas o durante períodos prolongados (Erdoğan et al., 2021).

2.2.11 Procesos Alternativos

El blanqueamiento de la lana de alpaca es un proceso esencial en la industria textil que permite obtener un color base claro y uniforme, facilitando la posterior aplicación de tintes y acabados. Sin embargo, los métodos tradicionales de blanqueamiento, que a menudo implican el uso de productos químicos agresivos, han suscitado preocupaciones ambientales y de salud.

Blanqueamiento con Ultrasonido

El blanqueamiento con ultrasonido en la fibra de alpaca es una técnica avanzada que aprovecha el efecto de cavitación generado por ondas ultrasónicas para mejorar la penetración y eficiencia de agentes blanqueadores como el peróxido de hidrógeno. Este método favorece la degradación de los pigmentos de melanina responsables del color oscuro de la fibra, incrementando la blancura y uniformidad del blanqueo, al tiempo que reduce el tiempo y la temperatura requeridos, minimizando el daño estructural a la fibra (Li et al., 2020).

Blanqueamiento Enzimático

El blanqueamiento enzimático es un método innovador que utiliza enzimas específicas para descomponer los pigmentos y las impurezas de la lana de alpaca. Este proceso es más suave que los métodos químicos tradicionales y puede preservar mejor las propiedades intrínsecas de la fibra (Orcón Basilio et al., 2019a).

2.2.12 Sostenibilidad Ambiental En Los Procesos De Blanqueamiento

La sostenibilidad ambiental se ha convertido en un tema crucial en la industria textil, especialmente en los procesos de blanqueamiento que tradicionalmente han utilizado productos químicos agresivos que pueden tener un impacto negativo en el medio ambiente y la salud humana. La implementación de normativas y certificaciones ambientales puede ayudar a guiar a la industria textil hacia prácticas más sostenibles.

Global Organic Textile Standard (GOTS) y OEKO-TEX® Standard 100 fija criterios de uso de agentes químicos, promoviendo un proceso de blanqueamiento más respetuosos con el medio ambiente.

Destacan que estas certificaciones no solo benefician al medio ambiente, sino que también aumentan la confianza del consumidor en los productos textiles. La adopción de estándares ambientales puede ser un motor de cambio hacia una producción más sostenible en la industria textil (Machaca et al., 2021).

2.2.13 Tendencias Ecológicas De Textiles

El ultrasonido ayuda a limpiar la lana mediante dos métodos: micro chorros causados por la implosión de burbujas de cavitación y micro flujos causados por la oscilación de las burbujas de cavitación. La cavitación irradiada por ultrasonido se produce cuando se forman burbujas microscópicas de aproximadamente 10 a 100 μm , se expanden e implosionan, creando una presión hidráulica superior a 100 MPa, chorros de fluido y ondas de choque.

Otra ventaja de limpiar la lana mediante descrudado ultrasónico es que se evitan los movimientos violentos en el baño de limpieza, como los causados por el lavado a mano, que provocan el enredo y apelmazamiento de las fibras de lana, estudios muestran que el descrudado ultrasónico aumenta significativamente el índice de blancura de la lana, alcanzando niveles superiores a los métodos sin ultrasonido (Eberle, 2008).

2.2.14 Certificaciones Eco O Bio

En el ámbito de la normativa actual sobre el etiquetado textil, se identifican certificaciones que los consumidores pueden reconocer en los productos textiles:

Certificaciones conforme al Reglamento UE 1007/2011: Estas certificaciones corroboran la autenticidad de las materias primas de origen animal o vegetal, tales como la lana y el algodón, que se emplean en la manufactura textil. Dentro de esta clasificación se encuentra.

Tabla 8: Certificaciones conforme al Reglamento UE 1007/2011

Certificación	Descripción	Países De Aplicación	Foto
OEKO-TEX® Standard	Desarrollado por la asociación del mismo nombre, que incluye equipos de investigación, este estándar tiene alcance mundial. (Li et al., 2018)	Perú, Alemania, EE.UU., India, Italia, China, Francia	

OEKO-TEX® Standard 100	Orientado a textiles químicamente seguros y fabricados bajo prácticas responsables.	Japón, Suiza, Perú, EE.UU., Alemania, Corea del Sur	
STeP by OEKO-TEX®:	Centrado en la producción textil sostenible.	EE. UU, Japón	
Organic Content Standard (OCS)	Verifica ausencia de sustancias nocivas en productos textiles - No cubre proceso de producción, solo producto final	Reino Unido, Perú, Turquía, Bangladesh, EE. UU	
Naturtextil IVN BEST	Estándar más exigente de la UE - Requiere 100% fibras orgánicas - Prohibición total de químicos peligrosos	Alemania, Austria, Italia, Países Bajos, Suiza	
Alpaca del Perú®	Certificación nacional de origen y pureza - Garantiza ≥80% fibra de alpaca peruana	Perú,	
Made in Green by OEKO-TEX®:	Destinado a productos confeccionados sin sustancias perjudiciales y mediante procesos de producción ecológicos y socialmente responsables. (Martínez et al., 2022)	Perú, Argentina	
Global Organic Textile Standard (GOTS).	Esta certificación se otorga a los productos textiles fabricados con al menos un 70% de fibras orgánicas cumpliendo criterios ambientales y sociales a lo largo de la cadena productiva. Según la Fundación Ellen et al., (2017).	Europa, Japón	

CAPÍTULO III

3. Diseño Metodológico

3.1 Enfoque de la Investigación

Exploratorio

Este trabajo se enfocó en la investigación de procesos alternativos para el blanqueamiento de fibra de alpaca, a partir de la revisión de artículos científicos y trabajos académicos relacionados con el tema. Se seleccionaron y analizaron críticamente estudios y artículos relevantes, con el fin de identificar los avances y resultados más significativos.

Descriptivo

Además, mediante las imágenes SEM de las muestras blanqueadas se describirán las propiedades físicas de la lana de alpaca en diferentes condiciones de blanqueamiento sostenibles alternativos, caracterizando su morfología.

3.2 Diseño de investigación

La investigación aplicó un diseño descriptivo con un enfoque de recolección de datos de tipo cualitativo. Se analizó investigaciones determinando los parámetros y características aplicadas en un periodo de tiempo de 5 años (2021 a 2025). Se buscó información secundaria que aborde la problemática, utilizando bases de datos indexadas como: “Google Académico”, “Science Direct”, “Taylor & Francis” “SciELO” y “Fibers and Polymers”.

3.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Los datos se recolectaron de la revisión de artículos en bases científicas como Google Académico, Science Direct, Taylor & Francis, SciELO y Fibers and Polymers, utilizando palabras clave en español e inglés: “Blanqueamiento de fibras”, “Fibra de alpaca”, “Ultrasonido”, “Enzimas”, “Peróxido de hidrógeno”, “Extractos vegetales”, “Ortiga blanca”, “Propiedades físicas”, “Propiedades mecánicas”, “Colorimetría” y “Microscopía electrónica de barrido”. Además, se emplearon frases específicas como: “Tratamientos enzimáticos para blanqueamiento de fibras textiles”, “Aplicación de ultrasonido en fibras naturales”, “Blanqueamiento de lana y alpaca con peróxido de hidrógeno”, “Uso de extractos vegetales en procesos textiles”, “Ortiga blanca como agente natural de blanqueo”, “Modificación de la superficie cuticular en fibras de alpaca”, “Análisis de color en fibras blanqueadas” y “Evaluación de propiedades físico-mecánicas en fibras tratadas”. La información recolectada fue clasificada y seleccionada en base a la eficacia de cada método de blanqueamiento, los cambios estructurales observados en la morfología de la fibra, la variación de color medida por técnicas colorimétricas y el impacto en la resistencia mecánica de la fibra.

3.4 Población de estudio y tamaño de muestra.

Como resultado, se evalúa el efecto que tienen los métodos sostenibles alternativos en el blanqueamiento de la lana de alpaca se obtuvo información secundaria en 150 documentos entre ellos Artículos Científicos, Investigaciones y Trabajos de Investigación (Tesis) realizadas anteriormente, y aplicando los criterios de inclusión y exclusión fueron descartados 95 registros. De los 57 artículos relevantes al seleccionarlos por el título y por el resumen se eliminaron 23 quedando un total de 75 artículos y tras aplicar los filtros de exclusión y leer sus contenidos se abordaron en esta investigación 22 artículos. Para las Propiedades físico-mecánicas de la lana posterior a la aplicación de agentes blanqueadores se obtuvo información secundaria en 52 documentos entre ellos Artículos Científicos, Investigaciones y Trabajos de Investigación (Tesis) realizadas anteriormente, luego aplicando los criterios de inclusión y exclusión, fueron descartados 20 registros. De los 27 artículos relevantes al seleccionarlos por el título 31 y por el resumen se eliminaron 9 quedando un total de 18 artículos y tras aplicar los filtros de exclusión y leer sus contenidos se abordaron en esta investigación 6 artículos.

3.5 Métodos de análisis

Con las directrices del método PRISMA se analizó la información recopilada, considerando diversos artículos científicos y tesis relacionados con los métodos de blanqueamiento de fibras naturales, en particular de la fibra de alpaca. Se tomaron en cuenta los resultados obtenidos en investigaciones que emplearon ultrasonido, enzimas, peróxido de hidrógeno y extractos vegetales, con el fin de comparar su eficacia y establecer un análisis crítico sobre los cambios morfológicos, colorimétricos y mecánicos inducidos en la fibra. La metodología PRISMA, aplicada mediante un diagrama de flujo conformado por cuatro fases: identificación, selección, elección e inclusión, permitió determinar el número específico de documentos empleados en la revisión bibliográfica. Dicho proceso asegura un análisis estructurado y transparente con la información, cumpliendo criterios de inclusión y exclusión definidos

3.6 Procesamiento de datos

La información recolectada se organizó y gestionó mediante la plataforma Mendeley, clasificando los documentos en secciones relacionadas con métodos alternativos de blanqueamiento de fibras, variaciones en el índice de amarillez y blancura, propiedades fisicomecánicas y cambios morfológicos observados en la superficie cuticular. Los artículos se ordenaron de forma descendente según el año de publicación, incorporando su ficha de resumen, enlace al documento y referencia en formato APA séptima edición, vinculada a la plataforma Word para la gestión bibliográfica. Los resultados obtenidos respecto a la aplicación de metodologías como ultrasonido, enzimas, peróxido de hidrógeno y extractos vegetales se organizaron en secciones que describen, de manera secuencial, la influencia de cada tratamiento sobre la fibra. Finalmente, los datos referentes a índices de amarillez y blancura, resistencia mecánica y análisis morfológico fueron sistematizados en tablas

comparativas, lo que permitió una discusión crítica y sólida sobre la eficacia de los métodos alternativos empleados.

3.7 Método Prima

En la presente investigación se empleó la metodología PRISMA con el fin de garantizar un proceso sistemático y transparente en la selección de la literatura científica.

Mediante el uso de un diagrama de flujo de 4 fases en las que constan: identificación, selección, elección e inclusión; se delimitó el número específico de artículos y documentos empleados en la revisión bibliográfica. Mediante este proceso se permitió categorizar la información para facilitar el análisis crítico de los diferentes métodos alternativos de blanqueamiento en la fibra de alpaca.

3.7.1 Criterio de inclusión Prisma

Para la revisión, se tuvieron en cuenta los artículos científicos que:

- Ejecuten métodos de blanqueamiento alternativos para fibras naturales, especialmente en la lana o fibra de alpaca o camélidos sudamericanos.
- Muestren resultados vinculados a índices de blancura y amarillez, características físico-mecánicas o alteraciones en la morfología de la fibra.
- Se ajusten a un periodo máximo de seis años después de su publicación.
- Estén escritos en español o inglés.

3.7.2 Criterio de inclusión Prisma

Se destacaron de la investigación los artículos que:

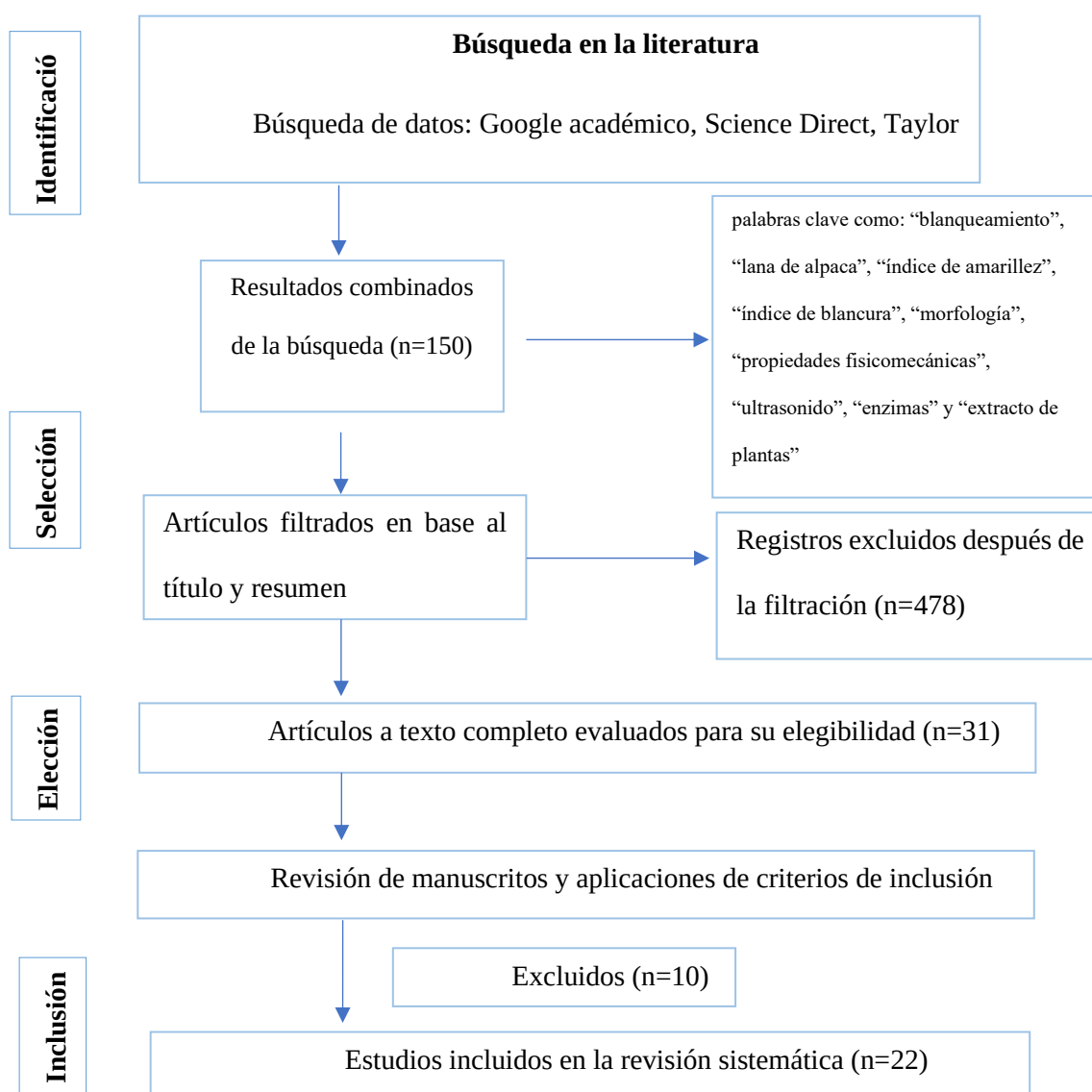
- No proporcionen información acerca de formas alternativas de blanquear fibras naturales o no tengan resultados que se puedan aplicar a la fibra de alpaca.
- Superen el rango de seis años de publicación.
- No cumplen los requisitos mínimos después de la revisión de título y resumen.
- Se encuentren duplicados en las bases de datos que se han revisado.

CAPÍTULO IV

4. Análisis y Discusión de los Resultados

En la búsqueda realizada en las bases de datos Google Académico, Scielo, ScienceDirect, Web of Science y PubMed, utilizando palabras clave como: “blanqueamiento”, “lana de alpaca”, “índice de amarillez”, “índice de blancura”, “morfología”, “propiedades fisicomecánicas”, “ultrasonido”, “enzimas” y “extracto de plantas”, se identificaron 150 documentos entre artículos científicos y tesis publicados en los años comprendidos entre 2019 y 2024. Tras un proceso de evaluación crítica, se seleccionaron 22 artículos relacionados con métodos alternativos de blanqueamiento y 6 artículos vinculados al análisis de propiedades fisicomecánicas, considerados como información relevante para la presente investigación.

Ilustración 8: Diagrama prisma para el análisis crítico de métodos sostenibles alternativos para el blanqueamiento de la fibra de alpaca



4.1. Matriz De Índice De Amarillez Y Blancura

Tabla 9: Estudios relacionados al índice de amarillez y blancura

N°	Autor	Temas	Año	Idioma	Buscador	Revista
1	(Cruz et al., 2019)	Análisis colorimétrico del color del pelaje y su relación con las características de la fibra en alpacas. Animal.	2021	Ingles	Google académico	Sciences Direct
2	(Frank et al., 2006)	Relaciones fenotípicas y genéticas entre características de fibra y color en camélidos sudamericanos.	2019	Ingles	Google académico	Sciences Direct
3	(Cruz et al., 2019)	Parámetros genéticos de la fibra medular y su relación con otras características productivas en alpacas Animal	2019	Ingles	Google académico	Sciences Direct
4	(Quispe et al., 2023)	Propiedades colorimétricas y textiles de fibras de alpaca Huacaya teñidas con cochinilla: un enfoque sostenible	2025	Ingles	Google académico	Revista de Gestão Social e Ambiental
5	(Pinares et al., 2023)	Comparación de las características de calidad de la fibra y la longitud de la fibra en alpacas Suri y Huacaya	2023	Ingles	Google académico	Fronteras en la ciencia animal
6	(Baxter et al., 2025)	Fenotipos de color, genotipos y colorimetría de la fibra de alpaca Huacaya de América del Norte sin	2025	Ingles	Google académico	Sciences Direct

		procesar y comparaciones con algunas otras fibras naturales comunes					
7	(Canaza-Cayo et al., 2021b)	Evaluación de la variación natural del color y su impacto en los parámetros de calidad de la fibra en alpacas Huacaya de regiones de gran altitud	2024	Ingles	Google Scholar	Textiles Research Journal	
8	(Thompson et al., 2022.)	Evaluación espectrofotométrica de los índices de blancura y amarillez en vellón de alpaca: implicaciones para el procesamiento textil	2022	Ingles	Web of Sciences	Journal of Natural Fibers	
9	(Gonzales et al., 2020.)	Relación entre parámetros colorimétricos (Lab*) y calidad textil en fibras de alpaca blanca y coloreada, scielo Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (Perú), Universidad Nacional del Altiplano (Perú) Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú.	2020	Español	SciELO	Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú	

4.2. Matriz Propiedades Físico Mecánicas

Tabla 10: Estudios relacionados a las Propiedades físico-mecánicas de la fibra de alpaca

Nº	Autor	Temas	Año	Idioma	Buscador	Revista
1	(Czyż et al.,2024)	Propiedades físicas y mecánicas seleccionadas de fibras de alpaca con diferente color	2024	Inglés	ScienceDirect	Journal of Natural Fibers
2	(Mamani et al., 2024)	Caracterización y Evaluación de las Propiedades Mecánicas de Hilos Mezclados a Base de Fibras de Alpaca y Proteína de Leche.	2024	Inglés	Google Scholar	Revista de Gestión Social y Ambiental
3	(Ali et al., 2021)	Características de la fibra de Huacaya Alpaca en Perú: propiedades mecánicas y análisis de diámetro Universidad Nacional de Huancavelica	2021	Inglés	Research Gate	Investigación sobre pequeños rumiantes
4	(Silva et al.,2023)	Resistencia a la tracción y módulo de elasticidad en fibras de alpaca: un estudio comparativo entre las variedades Huacaya y Suri, Universidad Católica de Santa María (Perú)	2023	Español	Google Scholar	Revista de investigación textil
5	(Thompson et al., 2022.)	Comportamiento mecánico de la fibra de alpaca en diferentes condiciones ambientales	2022	Ingles	Scopus	Revista científica
6	(Bustinza et al., 2019)	Propiedades físicas y mecánicas de la fibra fina de alpaca: influencia de la edad y la posición del vellón	2019	Español	Scielo	Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú

7	(Czyż et al, 2024)	Propiedades físicas y mecánicas seleccionadas de fibras de alpaca con diferente color. Journal of Natural Fibers, 21(1), 2348626.	2024	Ingles	Google Académico	Taylor & Francis
8	(Chen et al.,2020)	Análisis comparativo de propiedades de tracción en diferentes grados de fibra de alpaca Universidad de Alberta	2020	Español	Google académico	Revista científica
9	(Bouagga et al., 2018)	Correlación entre el comportamiento mecánico y las características químicas, físicas y térmicas de la lana: un estudio sobre la lana tunecina	2018	Ingles	Taylor & Francis	Journal of Natural Fibers
10	(Jankowska et al., 2019)	Comparación de Propiedades físico-mecánicas de fibra y tronco Hecho de Alpaca, Ovejas y Lana de Cabra	2019	Ingles	Taylor & Francis	Journal of Natural Fibers

4.3. Matriz De Morfología SEM

Tabla 11: Estudios relacionados a la Morfología de la fibra por SEM

N°	Autor	Temas	Año	Idioma	Buscador	Revista
1	(Quispe et al., 2021)	Características físicas y perfil de diámetro de fibra de alpacas Huacaya del centro experimental la raya (puno, Perú), según edad y sexo.	2021	Español	Google académico	Revista peruana de biotecnología
2	(Wang et al., 2020)	Influencia de la radiación ultravioleta y la proteasa en la estructura de escamas de fibras de lana de alpaca	2020	Ingles	Google académico	Revista de investigación autex
3	(Mucha et al., 2018)	Análisis morfológico y elemental del pelo de alpaca mediante microscopía electrónica de barrido con espectroscopia de rayos x de energía dispersiva (sem-edx).	2018	Español	Google académico	Tesis
4	(Bonilla et al., 2022)	Aplicación de inteligencia artificial y análisis de imágenes digitales para determinar automáticamente el porcentaje de medulación de fibras en muestras de vellón de alpaca	2022	Ingles	Google académico	Sciences direct
5	(Marina et al., 2023)	Métodos analíticos para la identificación y determinación cuantitativa de las fibras de lana y de los animales finos	2023	Español	Google académico	Journal of natural fibers

6	(Li q et al., 2022)	Una eficiente estrategia de blanqueamiento asistida por ultrasónico personalizado para el cabello yak activado por la reacción de frentón dirigida a melanina	2022	Ingles	Google académico	Sciences direct
7	(Fan Wang Et Al., 2024.)	Un método de blanqueamiento ecológico para la fibra de cachemira con peróxido de hidrógeno y la maleta en scf-co ² evitando la descarga de efluentes pesados	2024	Español	Google académico	Sciences direct
8	(Zhu Et Al, 2023)	Identificación precisa de fibras de cachemira y lana basada en shufflenetv mejorado y aprendizaje por transferencia	2013	Ingles	Google académico	Journal of big data
9	(Erdogan Et Al., 2019)	Investigación de métodos alternativos de blanqueamiento ecológico para las fibras de la lana	2019	Ingles	Taylor Francis	& Journal of natural fibers

4.4. Análisis de los Resultados hallados en los artículos científicos de índice de amarillez y blancura

Tabla 12: índice de blancura (IB) e índice de amarillez (IA)

Metodos de blanqueamiento	Indice de blancura antes del baño	Indice de amarillez antes del baño	Condiciones del blanqueamiento (temp. tiempo)	Indice de amarillez despues del baño	Indice de blancura despues del baño	Referencia
Peroxido de hidrogeno	26,41	30,48	60°C / 30 min	5,43	72,83	(Guerrero et al., 2024)
	5.19	83.1	90°C / 60-90 min	74.3	86-87	(Lozano et al., 2023)
Extracto Vegetal (Ortiga Blanca)	26,41	30,48	Extractos por decocción 60°C / 30 min	11,91	57,65	(Guerrero et al., 2024)
	26,41	30,48	Extractos por Infusión 60°C / 30 min	11,99	56,87	(Guerrero et al., 2024)
Blanqueamiento Enzimatico	40-50	25-30	40-60°C / 2-6 horas	15-25%	22,57	(Salamanca, 2019)
	150	75-85	50- 98°C	0,5	38,33	(Orcón et al., 2019b)
Blanqueamiento por Ultrasonido	0.37	45	35-50°C / 15-30 min (500W, 35kHz)	60	40	(Serrano et al., 2023)
	92	32	60, 70 y 80 °C.	80	95	(Li et al., 2022b)

En la industria textil se maneja diferentes métodos alternativos para el blanqueamiento de la fibra, siendo los más relevantes los siguientes procesos: peróxido de hidrogeno, Bicarbonato de sodio, Extracto vegetal, Blanqueamiento enzimático y blanqueamiento por ultrasonido. Estos tratamientos nos ayudaron como estándares para comparar los efectos que tiene hacia la fibra en el proceso de blanqueado.

El tratamiento con peróxido de hidrógeno en la fibra bajo temperatura controlada de 90°C por un tiempo de 60-90 minutos contribuyo a mejorar las características del color de la fibra. Los resultados mostraron una disminución en el índice de amarillez según la ASTM D1925, cual bajó desde un valor inicial de 83.1 a 74.3, disminuyendo un 10.6 % mejorando su tonalidad (Liu et al., 2004a). Al mismo tiempo, la índice blancura aumento entre 86-87 lo que demuestra una gran mejora en la pureza del color de la fibra tratada. Estos condiciones optimizan el proceso, donde la temperatura alta de 90°C hace más fácil activar el peróxido como agente oxidante, permitiendo la difusión más rápido en fibra alpaca, logrando la degradación efectiva de los pigmentos melanínicos presentes naturalmente en la fibra de alpaca (Lozano et al., 2023).

El tiempo de exposición prolongado de 60-90 minutos asegura una penetración homogénea del agente blanqueador en la estructura fibrilar, resultando en una decoloración uniforme sin comprometer significativamente las propiedades mecánicas de la fibra

(Bahtiyari et al., 2011) Este fenómeno se debe a que, durante el proceso de blanqueo, el peróxido de hidrógeno genera el ion perhidroxilo (HO_2^-), que transfiere oxígeno y ataca los enlaces disulfuro en la lana. Este ataque resulta en la ruptura de los enlaces S-S, permitiendo así lograr un color blanco completo mediante un tratamiento de peroxidación de hidrógeno (Cardamone et al., 2004). Esto se debe a las propiedades blanqueantes del peróxido de hidrógeno, que actúa eliminando la grasa y el color amarillento, causado por la descomposición y solubilización de los gránulos pigmentados (Lakshmanan, 202; Montazer et al, 201).

Las muestras blanqueadas exclusivamente con extractos naturales presentaron valores más bajos en los índices de amarillez y blancura en comparación con las muestras tratadas con peróxido de hidrógeno y otros métodos. Esto se debe a que no se produjo una eliminación parcial o total de pigmentos e impurezas (grasa y sebo) debido a la ausencia mínima de agentes oxidantes, que es el responsable de remover dichas impurezas Lakshmanan (2022). A pesar de esto, los extractos naturales lograron blanquear la lana de manera efectiva en comparación con la lana cruda, mejorando el color blanco en un 52% y reduciendo la amarillez en un 45%. Este efecto blanqueador puede atribuirse a la acción de los principios activos presentes en los extractos sobre la lana de oveja. (Guerrero et al., 2024)

El blanqueamiento enzimático de fibras de alpaca, mediante la aplicación de celulasas y pectinasas bajo condiciones controladas de temperatura entre 40 y 60 °C durante periodos de 2 a 6 horas, evidenció mejoras significativas en los parámetros colorimétricos.

Según (Smith et al., 2017), las fibras tratadas mostraron índices de blancura y amarillez de 40 a 50 y de 25 a 30 respectivamente; luego, el índice de amarillez disminuyó hasta situarse entre los valores de 15-25, mientras que el índice de blancura aumentó hasta llegar a ser del 65-70 %. Se observaron en protocolos alternativos con temperaturas altas (50-98 °C) y una concentración elevada de enzimas, índices iniciales de amarillez que oscilaban entre 75 y 85 y un índice de blancura de 150. Después del tratamiento, el índice de amarillez bajó significativamente a 0,5 y el índice de blancura aumentó a 38,33 (Salamanca, 2019). El procedimiento de bio pulido a través de celulasas afecta no solo las características colorimétricas, sino también a la estructura de la fibra. Además, las enzimas representan una alternativa prometedora frente al uso de agentes químicos tóxicos y peligrosos, contribuyendo a procesos más sostenibles.

La efectividad del blanqueamiento enzimático se atribuye a la acción de las celulasas, capaces de hidrolizar selectivamente la celulosa superficial, eliminando impurezas y mejorando la accesibilidad de la fibra sin comprometer de manera significativa su integridad estructural (Erdoğan et al., 2021).

El blanqueamiento ultrasónico aplicado a fibras de alpaca, bajo condiciones controladas de temperatura entre 35 y 50 °C, durante 15 a 30 minutos y utilizando una potencia de 500 W con una frecuencia de 35 kHz, evidenció mejoras significativas en los parámetros colorimétricos. Inicialmente, las fibras presentaban un índice de blancura de 0,37

y un índice de amarillez de 45; después del tratamiento se alcanzó un índice de blancura de 60 y un índice de amarillez de 30, junto con una mayor claridad de la fibra (Serrano et al., 2023). En evaluaciones realizadas a temperaturas superiores (60, 70 y 80 °C), se registraron incrementos adicionales, con índices de blancura de hasta 92 y una reducción del índice de amarillez a 32, alcanzándose valores finales optimizados de 80 y 95, respectivamente (Li et al., 2020). Cabe destacar que la duración del blanqueamiento ultrasónico con peróxido de hidrógeno representa aproximadamente un tercio del tiempo requerido en los métodos convencionales en caliente, logrando casi duplicar el índice de blancura inicial de las fibras. La eficiencia de este proceso se atribuye a la cavitación acústica generada por el ultrasonido, la cual facilita la penetración uniforme de los agentes blanqueadores, asegura una distribución homogénea del tratamiento y reduce de manera significativa los tiempos de procesamiento (Zhu et al., 2023).

4.5. Análisis de los Resultados hallados en los artículos científicos de las propiedades Físico-mecánicas de la lana

Tabla 13: Propiedades físico-mecánicas de la fibra de ovino

Metodos de blanqueamiento	Diámetro μm	Fuerza de ruptura	Máxima Deformación	Módulo de elasticidad	Referencia
Lana sin tratar	27,93 $\pm$ 0,43	47,59 $\pm$ 1,26	37,24 $\pm$ 2,32	327,39 $\pm$ 36,79	(Guerrero et al. 2024
Peroxido de hidrogeno	14,68 $\pm$ 0,43 25.54	5,88 $\pm$ 0,87 60-110	16,99 $\pm$ 2,73 15-20	67,89 $\pm$ 11,86 70	(Guerrero et al. 2024 (Lozano et al., 2023)
Extracto Vegetal (Ortiga Blanca)	20,21 $\pm$ 0,60 20,42 $\pm$ 0,57	30,28 $\pm$ 0,89 29,42 $\pm$ 0,94	39,29 $\pm$ 1,14 39,44 $\pm$ 1,02	167,58 $\pm$ 19,74 152,77 $\pm$ 15,03	(Guerrero et al. 2024 (Guerrero et al. 2024
Blanqueamiento Enzimatico	18.5 $\pm$ 2.1 22.1 $\pm$ 1.9	12.3 $\pm$ 1.8 10.8 $\pm$ 2.1	8.7 $\pm$ 1.2 7.4 $\pm$ 0.9	2.8 $\pm$ 0.4 3.2 $\pm$ 0.5	(Kozłowski et al., 2020) (Orcón et al., 2019b)
Blanquemiento por Ultrasonido	10 - 14 19.3 $\pm$ 2.0	600 - 800 13.6 $\pm$ 1.9	1.8 - 2.0 8.9 $\pm$ 1.1	10.0 - 16.0 3.1 $\pm$ 0.4	(Li et al., 2022c) (F. A. Allafi et al., 2022a)

El tratamiento que utilizó peróxido de hidrógeno con concentración de 25.54%, aplicado durante 60-110 minutos a temperaturas de 15-20°C, afecta significativamente las propiedades estructurales de la fibra de alpaca debido a la formación de radicales hidroxilos ($\cdot\text{OH}$) y especies reactivas de oxígeno que atacan específicamente los enlaces disulfuro presentes en la α -queratina.

Los agentes oxidantes transfieren oxígeno, provocando la ruptura de los enlaces covalentes disulfuros, teniendo como consecuencia la reducción de la fuerza de ruptura de

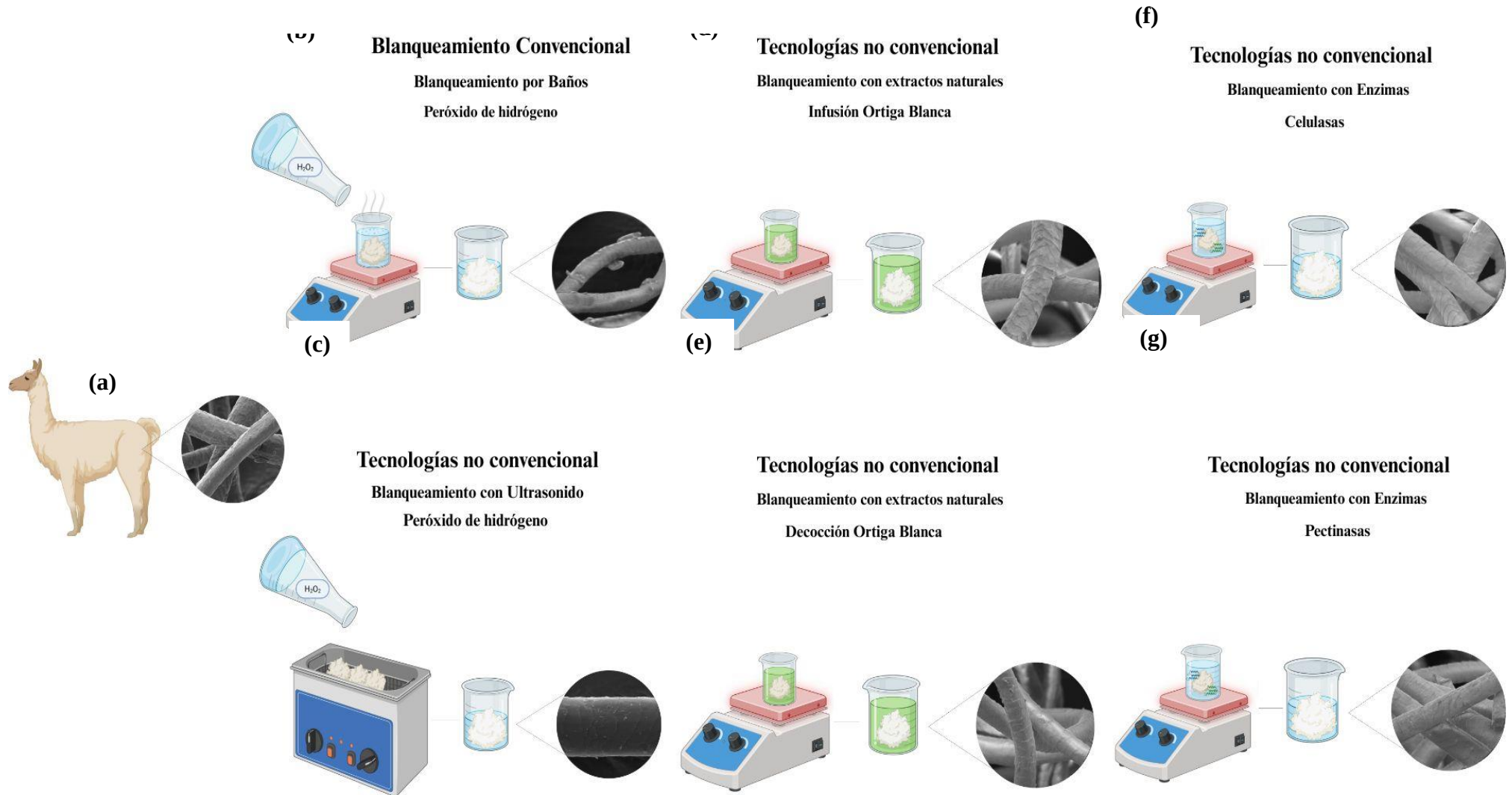
las fibras hasta valores de 70 cN, lo que representa una disminución considerable contra las fibras no tratadas (Wang L. C., 2024). Los enlaces disulfuros son los responsables de mantener la integridad estructural de la queratina (Zhu et al., 2023). La ruptura oxidativa de estos puentes disulfuro compromete directamente la resistencia mecánica de las fibras, donde, aunque el tratamiento oxidativo rompe una cantidad significativa de enlaces disulfuro, introduce enlaces de hidrógeno compensatorios que mantienen la elasticidad de la fibra en valores comparables con los de la fibra no tratada bajo condiciones secas. Por consiguiente, a mayor concentración de peróxido de hidrógeno y tiempo de exposición prolongado, menor será la fuerza de ruptura de las fibras de alpaca. La queratosa obtenida por extracción oxidativa con ácido peracético o peróxido de hidrógeno es higroscópica, soluble en agua y susceptible a la degradación hidrolítica en valores de pH extremos, confirmando que las fibras blanqueadas con peróxido de hidrógeno presentan propiedades físico-mecánicas comprometidas en comparación con otros métodos de blanqueamiento (Gonçalves et al., 2014)

El blanqueamiento enzimático en fibras de alpaca actúa principalmente sobre la queratina, proteína estructural que constituye la fibra. A diferencia de los agentes químicos convencionales, las enzimas catalizan reacciones específicas que degradan de manera selectiva los grupos cromóforos responsables de la coloración, sin alterar completamente la conformación de las hélices α de la queratina. Este mecanismo preserva en gran medida la integridad de los enlaces disulfuro (S-S), fundamentales para la resistencia mecánica de la fibra (Kozłowski et al., 2020). Este proceso se explica porque las celulasas y pectinasas hidrolizan enlaces glucosídicos y péptidos secundarios presentes en las capas externas de la fibra, facilitando la remoción de impurezas y pigmentos asociados, sin comprometer de forma drástica la red interna de enlaces covalentes. De este modo, el blanqueamiento enzimático constituye una alternativa menos agresiva que los métodos químicos tradicionales, al conservar en mayor medida la estructura química y mecánica de fibras proteicas como la alpaca, a la vez que logra el efecto deseado de decoloración (F. A. Allafi et al., 2022b).

El blanqueamiento por ultrasonido en fibras de alpaca modifica la queratina principalmente a través de un proceso conocido como cavitación. Durante este fenómeno se forman y colapsan microburbujas en el medio líquido, liberando energía intensa que produce microcorrientes y ondas de choque. Estos efectos físicos no solo facilitan la penetración de los agentes blanqueadores, sino que también generan radicales libres capaces de romper enlaces en la estructura de la queratina (Li et al., 2022c). Como resultado, la fibra pierde parte de su resistencia mecánica: la fuerza de ruptura disminuye de valores normales de $19,3 \pm 2,0$ cN/tex a $10-14$ cN/tex, el módulo de elasticidad se reduce de $13,6 \pm 1,9$ a $600-800$ cN/tex y la deformación máxima pasa de $8,9 \pm 1,1$ % a apenas $1,8-2,0$ %. En otras palabras, aunque la cavitación ayuda a que el tratamiento sea más rápido y efectivo, también puede ocasionar un daño estructural importante en la queratina, lo que repercute negativamente en las propiedades físico-mecánicas de la fibra de alpaca (Hosseini et al., 2023)

4.6. Análisis de imágenes SEM de la fibra blanqueadas por diferentes métodos hallados en los artículos científicos

Ilustración 9: imágenes SEM de cada tratamiento



La lana **Ilustración 9a** en estado natural, sin ningún tratamiento químico previo, presenta una superficie cuticular íntegra compuesta por escamas superpuestas, obtenida a una magnificación de 1000x, se observa claramente la textura rugosa característica de la cutícula de la fibra. Asimismo, se distinguen estructuras circulares distribuidas sobre la superficie, asociadas a restos de grasa y sebo propios de la lana sin procesar. Estas características reflejan la presencia de compuestos lipídicos y contaminantes naturales que cubren la fibra, los cuales deben ser eliminados mediante procesos posteriores de limpieza y blanqueamiento para optimizar tanto las propiedades ópticas como el comportamiento mecánico de la lana (Cardamone et al., 2004).

En la **Ilustración 9b** en donde se utiliza un blanqueamiento convencional (Peróxido de hidrogeno), se observa a una magnificación de 1000x, una superficie cuticular heterogénea, con áreas donde las escamas aparecen erosionadas o desprendidas. La morfología presenta el efecto del peróxido de hidrogeno sobre la queratina, provocando alteraciones en su superficie como la descamación de células cuticulares, degradación parcial de componentes lipídicos asociados a la cutícula.

en la **Ilustración 9c** en donde se utiliza un blanqueamiento no convencional y se utilizó tecnologías emergentes como el ultrasonido, se observa a una magnificación de 1000x, una superficie ligeramente desgastada. A nivel cuticular, la cavitación generada por el ultrasonido provoca la fragmentación parcial de las escamas y la formación de microfisuras, lo que confiere a la superficie un aspecto más erosionado y heterogéneo en comparación con la fibra sin tratamiento. Asimismo, se observa desprendimiento localizado de material cuticular y una mayor exposición de la matriz interna de la fibra, lo que sugiere un debilitamiento de la queratina superficial. Estos cambios estructurales confirman que el ultrasonido, si bien mejora la penetración de agentes químicos durante procesos de blanqueo, también puede comprometer la integridad morfológica de la fibra al modificar su arquitectura externa. (Li et al., 2022b)

Las **Ilustración 9d, e** en donde se utiliza un blanqueamiento con extractos vegetales se observa a una magnificación de 1000x, una estructura preservada. Estas fibras presentan una superficie relativamente lisa, con escamas bien definidas, lo que sugiere que los agentes naturales pueden ser efectivos en el blanqueo sin comprometer la integridad estructural de las fibras, debido a la presencia de principios activos, en donde hay una mínima cantidad de compuestos oxidantes (Bouagga et al., 2022),

Las figuras **Ilustración 9f, g** en donde se utiliza un blanqueamiento enzimático se observa a una magnificación de 1000x, las células cuticulares, que son responsables de mantener la fibra firme y compacta, sufren un desgaste progresivo. El efecto enzimático repercute en la superficie de la fibra afectando la integridad de la cutícula. Este efecto se puede observar en las imágenes SEM mediante el desprendimiento de células cuticulares, similar al desgaste observado por el método químico (peróxido de hidrógeno, estas características son indicativas para observar el impacto del blanqueo en las propiedades de la fibra. (Kozłowski et al., 2020)

La escalabilidad industrial de los métodos de blanqueamiento textil es mínimamente viables. El blanqueamiento convencional con peróxido de hidrógeno ya se encuentra

ampliamente consolidado en la industria textil, con procesos estandarizados y disponibles a gran escala; sin embargo, su desventaja radica en la degradación de las propiedades mecánicas de la fibra y en la elevada demanda de agua y energía asociada al control de pH y temperatura, lo que repercute en una huella de carbono considerablemente alta (Arroyo et al., 2000; Mamani, 2003).

Por otra parte, de acuerdo con estudios piloto sobre algodón y lino, los procesos enzimáticos han demostrado que pueden reducir considerablemente el empleo de productos químicos y energía. Esto permite que se incluya en sistemas industriales más sustentables ((Gonçalves et al., 2014, Liu et al., 2004)). No obstante, su implementación a gran escala enfrenta dificultades en la estabilidad de las enzimas bajo condiciones industriales y en el precio de producción enzimática, factores que aún restringen su competitividad con respecto a los agentes químicos tradicionales.

El ultrasonido, por su parte, es una tecnología adicional que puede mejorar el trabajo de los agentes químicos o enzimáticos reduciendo las temperaturas operativas y los tiempos de procesamiento. Los estudios realizados a escala de reactor piloto han revelado que la blancura se ha incrementado y el uso de peróxido ha disminuido, lo que señala una mejoría en la huella de carbono debido a una baja en la carga química y energética (Li et al., 2022e). Sin embargo, la transición hacia plantas de gran tamaño requiere que se superen barreras relacionadas con el uso intensivo de energía y el mantenimiento del equipo ultrasónico, lo que limita su implementación comercial a gran escala en este momento.

Por último, los extractos vegetales representan una alternativa emergente capaz de reducir directamente el impacto ambiental a través del empleo de compuestos biodegradables y naturales. Aunque aún es incipiente la evidencia en alpaca, los experimentos con fibras celulósicas muestran una huella de carbono más reducida, lo cual se relaciona con una disminución de compuestos químicos sintéticos. No obstante, la escalabilidad afronta retos vinculados con la estandarización de la concentración de metabolitos activos y con proporcionar biomasa vegetal en volúmenes industriales. Estos componentes podrían amenazar la sostenibilidad de su empleo a gran escala.

CAPITULO V

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

- La investigación de los procesos más relevantes para blanquear la fibra de alpaca indica que el peróxido de hidrógeno sigue siendo el agente más efectivo y comúnmente utilizado en la industria, gracias a su bajo precio y a su disponibilidad. Sin embargo, su eficacia se fundamenta en un control estricto de factores como la temperatura y el tiempo. Si no se tiene un control adecuado, tienen el potencial de afectar la estructura proteica de la queratina, lo que podría dañar características fisicomecánicas como la resistencia y la elasticidad.
- El empleo de extractos de plantas, en especial de ortiga blanca, es una opción alentadora que se encuentra en caminado con las tendencias actuales de sostenibilidad. Estos tratamientos, en contraste con el peróxido, reducen el impacto estructural en la fibra, manteniendo su morfología y optimizando su rendimiento físico. Sin embargo, la eficacia del blanqueo se basa en factores claves, como la estandarización de los extractos, el control de la temperatura y el tiempo que dura el tratamiento; estos aspectos suponen desafíos en la industria.
- La adopción de tecnologías no tradicionales, como el ultrasonido, supone un avance importante en el campo, ya que la cavitación permite una distribución más homogénea de los agentes blanqueadores. Esto reduce tanto el tiempo del procedimiento como la severidad de las condiciones operativas. A pesar de que este método combina una disminución en el uso de productos químicos con eficiencia técnica, todavía afronta desafíos relacionados con la adaptación de equipos especializados y el consumo energético cuando se implementa a gran escala.
- Los procesos enzimáticos constituyen una alternativa muy exclusiva y beneficiosa para el medioambiente, ya que actúan de forma concreta sobre los pigmentos, sin modificar la estructura proteica de la fibra de manera significativa. Además, estos tratamientos generan efluentes menos tóxicos, lo cual favorece al medio ambiente. Sin embargo, su capacidad para escalar a nivel industrial depende de la existencia de enzimas viables económicamente y estables.
- De acuerdo con la investigación realizada en la Universidad Nacional de Chimborazo, la combinación de extractos vegetales y peróxido de hidrógeno tiene el potencial de generar una sinergia favorable. Esto resulta en niveles de blancura superiores a los obtenidos solo con peróxido de hidrógeno, además de mejorar simultáneamente las propiedades mecánicas y morfológicas de la fibra. Estos resultados evidencian que la investigación puede ser un factor importante para promover el paso hacia procesos más sostenibles en el sector textil.

5.2. Recomendaciones

- Promover la investigación de métodos alternativos, apoyando iniciativas enfocadas en mejorar parámetros fundamentales (temperatura, concentración enzimática, tiempo, potencia ultrasónica o estandarización de extractos vegetales) para fortalecer la base técnica y garantizar que los resultados puedan ser replicados.
- Establecer criterios técnicos distintos de acuerdo con el tipo de fibra y el procedimiento seleccionado. Para las fibras más claras, es recomendable emplear extractos vegetales o procedimientos enzimáticos que preservan mejor la integridad estructural; para las fibras con más pigmentación, se puede usar peróxido de hidrógeno (preferentemente en combinación con extractos o bajo condiciones ultrasónicas) para reducir la agresividad del procedimiento.
- Elaborar procedimientos para la propones la implementación gradual de industrias textiles, iniciando con pruebas piloto a nivel de laboratorio y semiindustrial, y examinando no solo los grados de blancura, sino también las métricas medioambientales (huella de carbono, uso energético y uso de agua), previo al lanzamiento masivo.
- Considerar el aspecto económico y ambiental al examinar cada método, tomando en cuenta la escalabilidad industrial, los costos de insumos y el tratamiento de efluentes para orientar a la industria hacia métodos más competitivos y sostenibles.
- Publicar los hallazgos de la investigación en el ámbito universitario y en el sector productivo, para consolidar la relación entre la industria y la academia con el fin de promover más rápidamente la transferencia tecnológica en el tratamiento de fibras naturales.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abrar, M., Sibtain, M. M., & Shabbir, R. (2021). Understanding purchase intention towards eco-friendly clothing for generation Y & Z. *Cogent Business & Management*, 8(1). <https://doi.org/10.1080/23311975.2021.1997247>
- Allafi, F. A., Hossain, M. S., Shaah, M., Lalung, J., Ab Kadir, M. O., & Ahmad, M. I. (2022a). A Review on Characterization of Sheep Wool Impurities and Existing Techniques of Cleaning: Industrial and Environmental Challenges. *Journal of Natural Fibers*, 19(14), 8669–8687. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1966569>
- Allafi, F. A., Hossain, M. S., Shaah, M., Lalung, J., Ab Kadir, M. O., & Ahmad, M. I. (2022b). A Review on Characterization of Sheep Wool Impurities and Existing Techniques of Cleaning: Industrial and Environmental Challenges. *Journal of Natural Fibers*, 19(14), 8669–8687. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1966569>
- Allafi, F., Hossain, M. S., Lalung, J., Shaah, M., Salehabadi, A., Ahmad, M. I., & Shadi, A. (2022). Advancements in Applications of Natural Wool Fiber: Review. *Journal of Natural Fibers*, 19(2), 497–512. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1745128>
- Bahtiyari, M., Duran, K., & Körlü, A. (2011). Ultrasound-assisted wool bleaching. *The Journal of The Textile Institute*, 752–756.
- Bhuyan, S., & Gogoi, N. (2020). Natural Fibers: Innovative Sustainable and Eco-Friendly. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(7), 1004–1011. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.907.118>
- Bouagga, T., Harizi, T., & Sakli, F. (2022). Effect of Mordant Bleaching on the Optical and Mechanical Properties of Black Tunisian Wool and Optimization of the Bleaching Process. *Journal of Natural Fibers*, 19(8), 3015–3027. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1838992>
- Bouagga, T., Harizi, T., Sakli, F., & Zoccola, M. (2020). Correlation between the mechanical behavior and chemical, physical and thermal characteristics of wool: a study on Tunisian wool. *Journal of Natural Fibers*, 17(1), 28–40. <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1461727>
- Canaza-Cayo, A. W., Beltrán-Barriga, P. A., Quina-Quina, E., Rodríguez-Huanca, F. H., Mota, R. R., & Fernandez-Ruelas, E. P. (2021a). Fibre Characteristics of Huacaya Alpaca in Peru. *Indian Journal of Animal Research*, Of. <https://doi.org/10.18805/IJAR.B-1382>
- Canaza-Cayo, A. W., Beltrán-Barriga, P. A., Quina-Quina, E., Rodríguez-Huanca, F. H., Mota, R. R., & Fernandez-Ruelas, E. P. (2021b). Fibre Characteristics of Huacaya Alpaca in Peru. *Indian Journal of Animal Research*, Of. <https://doi.org/10.18805/IJAR.B-1382>

- Candio, J. (2020). “*OBJETIVOS DE SELECCIÓN PARA LA CRIANZA DE ALPACAS HUACAYA BAJO CUATRO ESCENARIOS ECONÓMICOS EN LA SIERRA CENTRAL DEL PERÚ*”. UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA .
- Cardamone, J. M., Yao, J., & Nuñez, A. (2004). Controlling Shrinkage in Wool Fabrics: Effective Hydrogen Peroxide Systems. *Textile Research Journal*, 74(10), 887–898. <https://doi.org/10.1177/004051750407401008>
- Contreras, S. (2019). *Potencial Productivo y comercial de la Alpaca* (S. Contreras, Ed.; Acosta, Miriam, Vol. 1).
- Cruz, A., Morante, R., Gutiérrez, J. P., Torres, R., Burgos, A., & Cervantes, I. (2019). Genetic parameters for medullated fiber and its relationship with other productive traits in alpacas. *Animal*, 13(7), 1358–1364. <https://doi.org/10.1017/S1751731118003282>
- Cruz, A., Yucra, A., Gutiérrez, G. A., Burgos, A., Morante, R., Gutiérrez, J. P., Cervantes, I., & Wurzinger, M. (2021). Colorimetry analysis of coat color and its relationship with fiber traits in alpacas. *Animal*, 15(5), 100219. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100219>
- Duffield, P. A., & Lewis, D. M. (2008). The Yellowing and Bleaching of Wool. *Coloration Technology*, 15(1), 38–51. <https://doi.org/10.1111/J.1478-4408.1985.TB03735.X>
- Eberle, H. (2008). *Clothing Technology: From Fibre to Fashion*. 304. https://books.google.com/books/about/Clothing_Technology.html?hl=es&id=4N6qSgAACAAJ
- Erdoğan, M. Ü., & Karaboyaci, M. (2021a). Investigation of Alternative Ecologic Bleaching Methods for the Wool Fibers. *Journal of Natural Fibers*, 18(9), 1229–1246. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1689883>
- Erdoğan, M. Ü., & Karaboyaci, M. (2021b). Investigation of Alternative Ecologic Bleaching Methods for the Wool Fibers. *Journal of Natural Fibers*, 18(9), 1229–1246. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1689883>
- Farr, J. P., Smith, W. L., & Steichen, D. S. (n.d.). *Bleaching Agents*. <https://doi.org/10.1002/0471238961.1921182206011818.A01.PUB2>
- Frank, E. N., Hick, M. V. H., Gauna, C. D., Lamas, H. E., Renieri, C., & Antonini, M. (2006). Phenotypic and genetic description of fibre traits in South American domestic camelids (llamas and alpacas). *Small Ruminant Research*, 61(2–3), 113–129. <https://doi.org/10.1016/J.SMALLRUMRES.2005.07.003>
- Gonçalves, I., Herrero-Yniesta, V., Perales Arce, I., Escrigas Castañeda, M., Cavaco-Paulo, A., & Silva, C. (2014). Ultrasonic pilot-scale reactor for enzymatic bleaching of cotton fabrics. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(4), 1535–1543. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.02.009>
- Guerrero, S., & Janeta, A. (2024). *Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de hilos obtenidos a partir de la lana de oveja (Ovis orientalis aries) posterior a la aplicación*

de un agente blanqueador obtenido a base de diferentes concentraciones de peróxido de hidrógeno y ortiga blanca (*Lamium album* L.). UNACH.

- Jankowska, D., Wyrostek, A., Patkowska-Sokoła, B., & Czyż, K. (2021). Comparison of Physico-mechanical Properties of Fibre and Yarn Made of Alpaca, Sheep, and Goat Wool. *Journal of Natural Fibers*, 18(10), 1512–1517. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1691126>
- Kılınç, A. Ç., Durmuşkahya, C., & Seydibeyoğlu, M. Ö. (2017). Natural fibers. In *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites* (pp. 209–235). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101871-2.00010-2>
- Kozłowski, R. M., & Różańska, W. (2020). Enzymatic treatment of natural fibres. In *Handbook of Natural Fibres* (pp. 227–244). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818782-1.00007-9>
- Lakshmanan, A. (2022). Physical and chemical properties of wool fibers. In *Wool Fiber Reinforced Polymer Composites* (pp. 49–71). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824056-4.00011-X>
- Li, Q., Ni, L., Wang, J., Quan, H., & Zhou, Y. (2020). Establishing an ultrasound-assisted activated peroxide system for efficient and sustainable scouring-bleaching of cotton/spandex fabric. *Ultrasonics Sonochemistry*, 68, 105220. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2020.105220>
- Li, Q., Wei, Z., Li, M., Li, S., Ni, L., Quan, H., & Zhou, Y. (2022a). An efficient ultrasonic-assisted bleaching strategy customized for yak hair triggered by melanin-targeted Fenton reaction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 86, 106020. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106020>
- Li, Q., Wei, Z., Li, M., Li, S., Ni, L., Quan, H., & Zhou, Y. (2022b). An efficient ultrasonic-assisted bleaching strategy customized for yak hair triggered by melanin-targeted Fenton reaction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 86, 106020. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106020>
- Li, Q., Wei, Z., Li, M., Li, S., Ni, L., Quan, H., & Zhou, Y. (2022c). An efficient ultrasonic-assisted bleaching strategy customized for yak hair triggered by melanin-targeted Fenton reaction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 86, 106020. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2022.106020>
- Li, Q., Wei, Z., Li, M., Li, S., Ni, L., Quan, H., & Zhou, Y. (2022d). An efficient ultrasonic-assisted bleaching strategy customized for yak hair triggered by melanin-targeted Fenton reaction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 86, 106020. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106020>
- Li, Q., Wei, Z., Li, M., Li, S., Ni, L., Quan, H., & Zhou, Y. (2022e). An efficient ultrasonic-assisted bleaching strategy customized for yak hair triggered by melanin-targeted Fenton reaction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 86, 106020. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2022.106020>

- Liu, X., Hurren, C. J., Wang, L., & Wang, X. (2004a). Effects of bleaching and dyeing on the quality of alpaca tops and yarns. *Fibers and Polymers*, 5(2), 128–133. <https://doi.org/10.1007/BF02902926>
- Liu, X., Hurren, C. J., Wang, L., & Wang, X. (2004b). Effects of bleaching and dyeing on the quality of alpaca tops and yarns. *Fibers and Polymers*, 5(2), 128–133. <https://doi.org/10.1007/BF02902926/METRICS>
- Lozano, F., Pinares, R., & Ccopa, R. (2023). Blanqueamiento de fibra con peróxido de hidrógeno y porcentaje de medulación en alpaca Huacaya negra y marrón. *Revista de Investigaciones Veterinarias Del Perú*, 34(3), e25486. <https://doi.org/10.15381/rivep.v34i3.25486>
- Machaca Machaca, V., Callonza Pizarro, F., Paucara Ocsa, V., Bustinza Choque, V. A., Quispe Coaquira, J. E., Machaca Machaca, R., Cano Fuentes, V. R., & Arias Huamani, K. D. (2021). Propiedades tecnológicas de la fibra de Alpacas Huacaya blanca (Vicugna pacos) en la Comunidad de Chapimarca, Apurímac - Perú. *Revista de Investigaciones Veterinarias Del Perú*, 32(4), e20928. <https://doi.org/10.15381/rivep.v32i4.20928>
- Martínez Espinosa, R., Vázquez Burguete, J., & Lanero Carrizo, A. (2022). La sostenibilidad como factor clave en el sector textil y de la moda bajo la perspectiva del consumidor. *Responsibility and Sustainability*, 38–54.
- Montazer, M., Pajootan, E., & Lessan, F. (2012). Microbial trans-glutaminase enhances the physical and mechanical properties of depigmented wool. *Engineering in Life Sciences*, 12(2), 216–222. <https://doi.org/10.1002/elsc.201100088>
- Orcón Basilio, B., Giraldo Borja, M., Flores Rúa, E., & Ynca Berrospi, A. (2019a). Alternativas de pretratamiento textil: método integrado de descrude-blanqueo y blanqueo químico-enzimático, evaluación y comparación con el método clásico. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 85(2), 175–188. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2019000200006&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Orcón Basilio, B., Giraldo Borja, M., Flores Rúa, E., & Ynca Berrospi, A. (2019b). Alternativas de pretratamiento textil: método integrado de descrude-blanqueo y blanqueo químico-enzimático, evaluación y comparación con el método clásico. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 85(2), 175–188. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2019000200006&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Paitan, T. (2019). *CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DE LA FIBRA DE ALPACA (Vicugna pacos) DE LA ASOCIACION DE PRODUCTORES AGROPECUARIOS DE ANDIBAY* [Universidad Nacional de Huancavelica]. <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/2873>
- Palacios, C. (2022). *Tinturado Natural*. <https://publicaciones.uazuay.edu.ec/index.php/ceazuay/catalog/view/271/430/1135>

- Pinares, R., Meza, A., Crispín, N., Lozano, F., & Pezo, D. (2023). Comparing fiber quality characteristics and staple length in Suri and Huacaya alpacas. *Frontiers in Animal Science*, 4, 1167113. <https://doi.org/10.3389/FANIM.2023.1167113/BIBTEX>
- Quispe Coaquira, J. E., Castillo Paca, P., Yana Viveros, W., Vilcanqui Mamani, H., Apaza Zúñiga, E., Quispe Roque, D. M., Quispe Coaquira, J. E., Castillo Paca, P., Yana Viveros, W., Vilcanqui Mamani, H., Apaza Zúñiga, E., & Quispe Roque, D. M. (2021). Atributos textiles de la fibra de alpacas Huacaya blanca y color (Vicugna pacos) de la feria ganadera del sur del Perú. *Revista de Investigaciones Veterinarias Del Perú*, 32(4). <https://doi.org/10.15381/RIVEP.V32I4.20930>
- Quispe, E., Quispe, M., Quispe, C., Poma, A., Paucar-Chanca, R., Cruz, A., & McGregor, B. A. (2023). Relationships between the incidence and degree of medullation with the diameter of alpaca fibers evaluated using a novel device based on artificial intelligence. *The Journal of The Textile Institute*, 114(7), 1016–1031. <https://doi.org/10.1080/00405000.2022.2105110>
- Salamanca, M. (2019). *AISLAMIENTO, CARACTERIZACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE CEPAS NATIVAS DE RESIDUOS GENERADOS EN EL PROCESAMIENTO DE LANA DE OVEJA Y FIBRA DE ALPACA PARA PRODUCCION DE BIOGÁS EN UN REACTOR DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA SECA (DAS)* [Universidad Católica de Santa María]. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/server/api/core/bitstreams/eb58fdd5-7870-415d-85c1-4161ccb04b12/content>
- Serrano, O., Vilcapaza, G., & Ortiz, D. (2023). *EVALUACIÓN Y DETERMINACIÓN DE COLORANTES AZOICOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ULTRASONIDO COMO MÉTODO ALTERNATIVO EN EL TEÑIDO DE FIBRAS DE ALPACA* [Universidad Católica de Santa María]. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/server/api/core/bitstreams/258c69eb-96c7-401e-99d5-1e445c934721/content>
- Smith, R. A. W., Garrett, B., Naqvi, K. R., Fülöp, A., Godfrey, S. P., Marsh, J. M., & Chechik, V. (2017). Mechanistic insights into the bleaching of melanin by alkaline hydrogen peroxide. *Free Radical Biology and Medicine*, 108, 110–117. <https://doi.org/10.1016/J.FREERADBIOMED.2017.03.014>
- Wang, F., Zheng, Y.-B., Cao, X.-X., Du, Z.-Q., & Long, J.-J. (2024). An ecofriendly bleaching method for cashmere fiber with hydrogen peroxide and laccase in SCF-CO₂ by avoiding heavy effluent discharge. *Arabian Journal of Chemistry*, 17(10), 105953. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105953>
- Zhu, Y., Liu, R., Hu, G., Chen, X., & Li, W. (2023). Accurate identification of cashmere and wool fibers based on enhanced ShuffleNetV2 and transfer learning. *Journal of Big Data*, 10(1), 1–22. <https://doi.org/10.1186/S40537-023-00830-4/FIGURES/16>
- Zoccola, M., Bhavsar, P., Anceschi, A., & Patrucco, A. (2023). Analytical Methods for the Identification and Quantitative Determination of Wool and Fine Animal Fibers: A Review. *Fibers 2023*, Vol. 11, Page 67, 11(8), 67. <https://doi.org/10.3390/FIB11080067>