

Biomaterials derived from protein fiber waste: a literature review

Nely N. Jacinto¹; Ana Villanueva-Llapa¹; Ximena Solis-Tejada¹

¹Universidad Católica San Pablo, Perú, nely.jacinto@ucsp.edu.pe, advillanueva@ucsp.edu.pe, xsolis@ucsp.edu.pe

Abstract– *This study presents a literature review on the valorization of protein fiber waste derived from animal sources, aimed at developing usable biomaterials across various sectors and industries. Following the PRISMA methodology, 37 scientific articles published between 2020 and 2025 were selected from the Scopus database. The results show that protein fiber waste is primarily processed through hydrolysis and subsequently transformed into fibrous materials, films, bioplastics, hydrogels, and protein hydrolysates. Biomedical applications are frequently reported in the literature, while industrial, environmental, and textile applications remain scarcely addressed, revealing research gaps regarding sustainable processes that could be implemented on a larger scale. Overall, the findings underscore the potential of protein fiber waste, especially wool, as an alternative raw material for developing products aligned with circular economy principles.*

Keywords– *Protein fiber, Keratin, Hydrolysis, Biomaterial*

Biomateriales derivados de residuos de fibra proteica: una revisión de la literatura

Nely N. Jacinto¹; Ana Villanueva-Llapa¹; Ximena Solis-Tejada¹

¹Universidad Católica San Pablo, Perú, nely.jacinto@ucsp.edu.pe, advillanueva@ucsp.edu.pe, xsolis@ucsp.edu.pe

Resumen– Este estudio presenta una revisión de literatura sobre la valorización de residuos de fibras proteicas de origen animal, para el desarrollo de biomateriales aprovechables de diferentes sectores e industrias. Siguiendo la metodología PRISMA, se seleccionaron 37 artículos científicos publicados entre 2020 y 2025 de la base de datos Scopus. Los resultados indican que los residuos de fibra proteica se procesan principalmente mediante hidrólisis y posteriormente se transforman en materiales fibrosos, películas, bioplásticos, hidrogeles e hidrolizados proteicos. Las aplicaciones biomédicas se reportan con frecuencia en la literatura, mientras que las aplicaciones industriales, ambientales y textiles son escasamente abordadas, evidenciando brechas en procesos sostenibles que puedan aplicarse a mayor escala. En general, los hallazgos resaltan el potencial de los residuos de fibra proteica, principalmente la lana, como materias primas alternativas en la elaboración de materiales con enfoque a economía circular.

Palabras clave– Fibra proteica, keratina, hidrólisis, biomaterial

I. INTRODUCCIÓN

Debido a los crecientes problemas ambientales suscitados en los últimos años, se ha introducido el concepto de biomateriales como biopolímeros que provienen de recursos renovables o residuos orgánicos, por lo que son biodegradables (descomposición en menos de 180 días), biocompatibles y sostenibles [1], [2]; tienen la finalidad de reemplazar materiales sintéticos, derivados del petróleo que provocan impactos ambientales significativos.

Los biomateriales a base de fibras proteicas han adquirido especial importancia debido a sus diversas aplicaciones en la manufactura, la construcción, la medicina y el uso doméstico. Poseen propiedades mecánicas, antimicrobianas y antioxidantes mejorados, con una versatilidad estructural que los hace adecuados para múltiples usos [2]. Entre estos biomateriales, han despertado un interés particular aquellos a base de queratina, ya que esta proteína es abundante y es el componente principal de la lana, las plumas y el pelo [3], [4]. Mediante su procesamiento, es posible obtener biomateriales con propiedades funcionales mejoradas [5].

Dentro de este contexto, los residuos proteicos derivados de fibras, especialmente la lana, representa una fracción significativa y es aún poco aprovechada dentro del conjunto de residuos textiles. La producción mundial de lana se estima en aproximadamente 1–2 millones de toneladas anuales, de las cuales cerca del 60 % se destina a la fabricación de prendas de vestir, mientras que una proporción considerable se descarta como residuo sin procesos adecuados de valorización [6]. Si bien la lana posee características fisicoquímicas propicias para su reutilización, enfrenta restricciones en su manejo ambiental debido a su alto contenido de queratina y la lenta tasa de biodegradación; sin embargo, al ser rica en aminoácidos, péptidos y proteínas, representa un recurso fundamental para

generar biomateriales funcionales desde una perspectiva de economía circular [6], [7].

Por ejemplo, los residuos hidrolíticos producidos durante la hidrólisis de las fibras proteicas de queratina tienen un potencial significativo de valorización, aunque la literatura científica al respecto es limitada [8]. Si bien numerosos estudios exploran el uso de residuos textiles para convertirlos en biomateriales mediante hidrólisis u otros métodos de extracción [6], estos se enfocan principalmente en aplicaciones biomédicas, mientras el estudio en aplicaciones en otros sectores industriales como el textil sigue siendo escasa y limitada. Esta falta de integración del conocimiento representa una importante brecha de investigación desde una perspectiva industrial y tecnológica. Abordar esta brecha es crucial para promover la economía circular, que requiere innovación para valorizar los residuos textiles e integrarlos en los ciclos de producción.

A partir de ello, este estudio plantea las siguientes preguntas de investigación: ¿Qué procesos se realizan para la valorización de residuos de fibras proteicas?, ¿Qué tipos de biomateriales pueden obtenerse a partir de residuos de fibras proteicas?, y ¿cuáles son las principales aplicaciones industriales reportadas para estos biomateriales, con énfasis en el sector textil y sus aspectos funcionales, tecnológicos y ambientales? Para responderlas, se desarrolla una revisión de literatura, empleando la metodología PRISMA y el software VOSviewer, con el fin de identificar tendencias, aplicaciones y brechas de investigación en la literatura publicada entre 2020 y 2025, contribuyendo así al desarrollo de soluciones alineadas con la sostenibilidad y la economía circular.

II. MARCO TEÓRICO

A. Fibra proteica

Material fibroso de origen natural compuesto por proteínas estructurales como queratina, colágeno, elastina y seda, que combinan resistencia mecánica, biocompatibilidad y biodegradabilidad, que tiene aplicaciones textiles, biomédicas, entre otras [9].

B. Residuos hidrolíticos

Se define como un residuo sólido proveniente de un proceso de hidrólisis, donde se hizo uso de un agente hidrolizante, como el NaOH. Son una mezcla de queratina densa y filamentos desgastados que no pudieron ser hidrolizados al 100% [10].

C. Biomaterial

Es un material natural o sintético diseñado para interactuar con sistemas biológicos con fines médicos, manteniendo biocompatibilidad y funcionalidad. También denominado como “material de origen biológico”, que pueden ser derivadas de residuos agroindustriales o animales. Da la

oportunidad de usar los recursos naturales, pero con un enfoque de económica circular, en donde no se generen desechos y los residuos puedan ser usados como materia prima [1], [11].

III. METODOLOGIA

Se realiza una revisión de literatura, seleccionandose la base de datos Scopus por su amplia cantidad de revistas indexadas de alto impacto en las áreas de ciencia de materiales, ingeniería y sostenibilidad. Se establecieron ecuaciones de búsqueda que incorporaron palabras clave relacionadas con aditivos funcionales de interés (glicerol, gelatina y carboximetilcelulosa (CMC)), biomateriales, queratina, fibras proteicas e hidrólisis. Se utilizaron conectores lógicos para ampliar y perfeccionar los resultados.

TABLA I
FORMULACIONES DE BÚSQUEDA Y PALABRAS CLAVE EMPLEADAS EN LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Nº	Palabras claves utilizadas	Fórmulas utilizadas	Nº de artículos
1	protein fiber, keratin, hydrolysis, biomaterial	(ALL (protein fiber) AND ALL ("Keratin" AND "hydrolysis") AND ALL (biomaterial))	1149
2	protein fiber, keratin, biomaterial, gelatin	(ALL (protein fiber) AND ALL (keratin) AND ALL (biomaterial) AND TITLE-ABS-KEY (gelatin))	579
3	protein fiber, keratin, biomaterial, CMC	(ALL (protein fibers) AND ALL (keratin) AND ALL (biomaterial) AND TITLE-ABS-KEY (Carboxymethylcellulose))	138
4	protein fiber, keratin, biomaterial, glycerol	(ALL (protein fibers) AND ALL (keratin) AND ALL (biomaterial) AND TITLE-ABS-KEY (glycerol))	105

El proceso de selección de artículos se realizó siguiendo el método PRISMA como se muestra en al Fig 1. A partir de una búsqueda inicial en Scopus se identificaron 1971 registros, los cuales fueron depurados mediante criterios progresivos de exclusión. Los criterios de exclusión se describen en la Tabla II. Tras la evaluación de títulos y resúmenes, la eliminación de duplicados y después de hacer la lectura de los artículos, se seleccionaron finalmente 37 artículos, que constituyeron la base para el análisis bibliométrico.

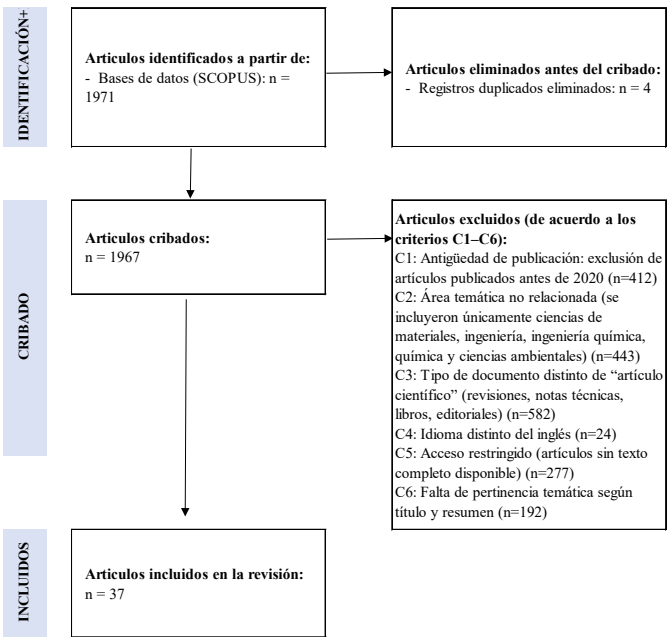


Fig. 1 Diagrama PRISMA del proceso metodológico de selección de artículos incluidos en la revisión bibliográfica

La distribución temporal de los artículos analizados se muestra en la Fig 2, mostrando el número de estudios se mantuvo estable y moderada entre 2020 y 2023, el aumento en 2024 refleja un creciente interés en el tema. No obstante, 2025 muestra una disminución que evidencia es un área de investigación especializada aún en desarrollo.

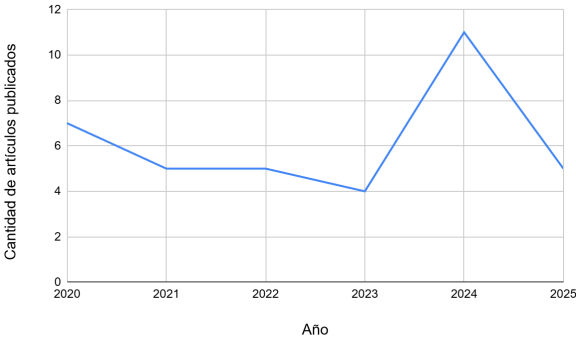


Fig. 2 Evolución anual de publicaciones científicas sobre biomateriales obtenidos a partir de residuos de fibras proteicas.

Además, las revistas seleccionadas se categorizaron según las áreas temáticas establecidas por la base de datos Scopus, como se muestra en la Fig. 3. Esto se hizo para garantizar la coherencia entre los temas y facilitar el análisis cuantitativo de la distribución de revistas por disciplina. La ciencia de los materiales estudia cómo la composición y la estructura influyen en el rendimiento de los materiales; la ingeniería química y la ingeniería se ocupan de su aplicación y escalado; la química proporciona la base molecular; y las ciencias ambientales investigan su sostenibilidad e impacto.

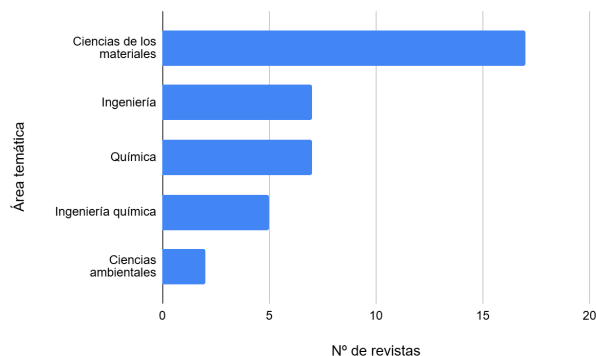


Fig. 3 Número de revistas según área temática

La ciencia de los materiales es la disciplina que predomina, lo que indica que la mayor parte de la investigación se centra en el análisis y la caracterización del funcionamiento de los materiales. La ingeniería y la química tienen una presencia moderada, lo que resalta la relación entre el análisis de materiales y su aplicación práctica. La ingeniería química desempeña un papel menos significativo, especialmente en el escalado de procesos. La ciencia ambiental tiene una presencia limitada, lo que sugiere una oportunidad para fortalecer el enfoque en la sostenibilidad.

Se realizó un análisis bibliométrico utilizando VOSviewer para identificar patrones y conexiones entre palabras clave relevantes.

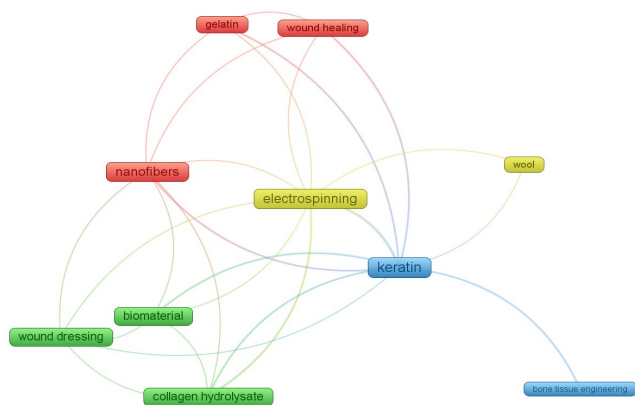


Fig. 4 Mapa de coocurrencia de términos científicos

El gráfico indica que la queratina es el término más destacado, lo que demuestra que es el foco principal de la mayor parte de la investigación analizada. Términos como electrohilado y nanofibras aparecen junto a él, lo que indica que tecnologías de electrohilado se utilizan ampliamente para procesar la queratina. De igual manera, las conexiones con colágeno hidrolizado y biomateriales demuestran un fuerte enfoque en aplicaciones médicas, particularmente en la cicatrización de heridas. Las conexiones con gelatina y lana indican un interés en el uso de proteínas naturales como fuentes sostenibles y alternativas.

IV. RESULTADOS

A. ¿Qué procesos se realizan para la valorización de residuos de fibras proteicas?

Los artículos desarrollan métodos para obtener biomateriales, de ha identificado una secuencia de etapas general; comienza con la extracción o solubilización de la proteína. Después, el biomaterial se da forma física a través de la creación de películas, nanofibras, andamiajes, hidrogeles o bioplásticos. Esto muestra que el objetivo está en desarrollar estructuras funcionales. Finalmente, el biomaterial obtenido puede ser reticulado o estabilizado mediante la incorporación de modificaciones químicas o refuerzos específicos que se requiera, con el objetivo de mejorar sus propiedades térmicas y mecánicas para obtener productos más valiosos.

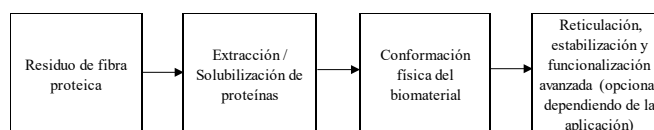


Fig. 5 Diagrama de proceso de obtención de biomaterial.

a. Extracción y solubilización de proteínas

En todos los artículos, los residuos de fibras proteicas son sometidos a una etapa inicial de solubilización total o parcial de la proteína para romper la estructura altamente estable de la queratina y otras proteínas fibrosas presentes en los residuos, y obtener fracciones solubles que puedan ser posteriormente procesadas y conformadas en biomateriales.

El procedimiento más utilizado es la hidrólisis alcalina, que consiste en tratar la fibra con soluciones alcalinas (principalmente NaOH o KOH) a altas temperaturas. Esto facilita la ruptura de los enlaces disulfuro y amida de la queratina. Su simplicidad, alta eficiencia y posibilidad de escalado a bajo costo son las razones por las que se utiliza con frecuencia en la investigación de diferentes aplicaciones [12], [13], [14], [3].

Además, se identificaron métodos de extracción reductiva que usan agentes reductores, como la urea que descompone las interacciones secundarias dentro de la proteína, mientras que los agentes reductores (como el β -mercaptoetanol o la L-cisteína) rompen selectivamente los enlaces disulfuro, lo que permite la retención de segmentos estructurales de la α -queratina. Estos procedimientos se utilizan para la lana residual o pelo animal y son especialmente importantes para obtener soluciones proteicas más funcionales y estables usados en técnicas como la bioimpresión, el injerto químico o el electrohilado. [15], [16], [17], [18].

Asimismo, surgen métodos alternativos y sostenibles, como la extracción hidrotérmica en agua subcrítica, que utiliza únicamente agua a alta presión y temperatura sin reactivos químicos agresivos, permite la degradación parcial de la estructura de la queratina, aumenta la hidrofiliidad de la fibra y mejora su compatibilidad con matrices poliméricas. Su aplicación se basa en los principios de la economía circular y la química verde. [19], [20].

También se ha reportado, aunque en menor medida, el uso de solventes reactivos y líquidos iónicos, como el hidróxido de tetrametilamonio (TMAOH). Estos sistemas permiten la disolución directa de biomasa con alto contenido proteico, descomponiendo simultáneamente las interacciones físicas y químicas de la fibra. Además, el solvente puede recuperarse y reutilizarse, reduciendo así el impacto ambiental del proceso. [21], [22].

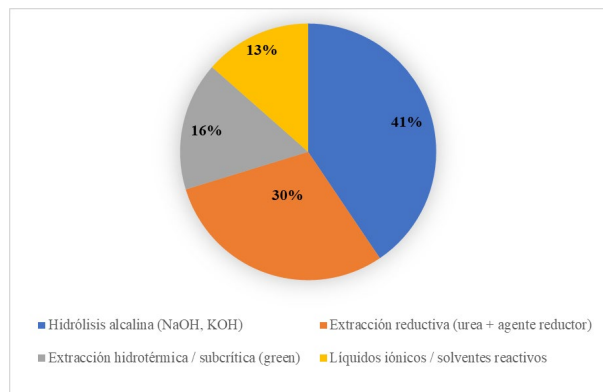


Fig. 6 Tipos de extracción de proteínas.

b. Conformación física del biomaterial

El electrohilado, el método más utilizado en conformación del biomaterial, emplea un campo eléctrico de alto voltaje para estirar una solución polimérica, creando nanofibras continuas que se aplican como membranas no tejidas. De la misma manera, las proteínas purificadas se mezclan con polímeros auxiliares como polialcohol vinílico (PVA), la polivinilpirrolidona (PVP), el polióxido de etileno (PEO) o la policaprolactona (PCL), para mejorar sus propiedades [23], [24], [25], [8], [26].

Por su parte, el casting o moldeo es ampliamente utilizado para la producción de películas de biocompositos y bioplásticos. Este proceso consiste en verter una solución de proteína en un molde plano y dejar que el disolvente se evapore de forma controlada; la adición de plastificantes, como el glicerol, es esencial para evitar una fragilidad excesiva y ajustar la flexibilidad y la resistencia mecánica del producto final. Su simplicidad y reproducibilidad la convierten en una técnica fundamental para el desarrollo de etiquetas y películas funcionales [28], [29], [30].

El hilado en húmedo es otra técnica de conformado que consiste en pasar la solución proteica a través de una boquilla a un baño líquido. Esto solidifica el material y permite la creación de fibras continuas con forma y tamaño controlados [31]. La liofilización es un proceso de secado que consiste en congelar la muestra y luego extraer el agua en forma de vapor. Esto permite obtener estructuras sólidas muy ligeras y porosas sin perder su forma original [23], [32]. Por otro lado, los métodos de hilado en húmedo son procesos similares a la fabricación de papel, en los que las fibras celulósicas y proteicas se dispersan en agua, se filtran y se secan para crear láminas delgadas sin necesidad de aditivos químicos [20].

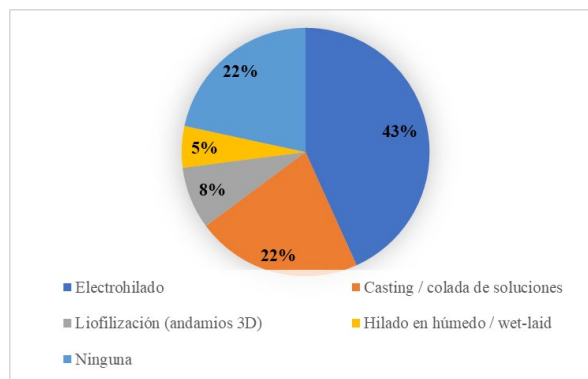


Fig. 7 Conformación del biomaterial

c. Reticulación y funcionalización avanzada

Una proporción importante de los estudios incluye etapas de reticulación que consiste en “unir” las cadenas de la proteína entre sí para que el biomaterial sea más resistente y estable. La reticulación térmica se logra mediante la adición de calor, lo que provoca que las moléculas alteren su orden y permanezcan unidas mediante interacciones físicas [15]. La reticulación química emplea compuestos específicos, como los sistemas EDC/NHS o el glutaraldehído, que funcionan como puentes estables entre las cadenas proteicas, generando enlaces fuertes y duraderos [32], [33]. La reticulación enzimática, a su vez, utiliza enzimas naturales (como la transglutaminasa) para unir selectivamente ciertos aminoácidos en la proteína, imitando así los procesos que ocurren en los sistemas biológicos [28].

Además, existe un creciente interés en la funcionalización química, es decir, la modificación de proteínas para dotarlas de nuevas funciones. Un ejemplo es la inclusión de grupos metacrilato, que permite que el material se endurezca al exponerse a la luz. Esto facilita su uso en bio-impresión 3D y bio-tintas, donde se crean estructuras porosas con características y formas controladas [16], [34], [35]. Asimismo, los sistemas que combinan elementos minerales y orgánicos para optimizar la funcionalidad del material, y el ensamblaje capa por capa (LbL), que implica la superposición de capas delgadas de materiales con cargas opuestas, amplían las aplicaciones potenciales de los biomateriales proteicos a productos de mayor valor añadido [36], [33].

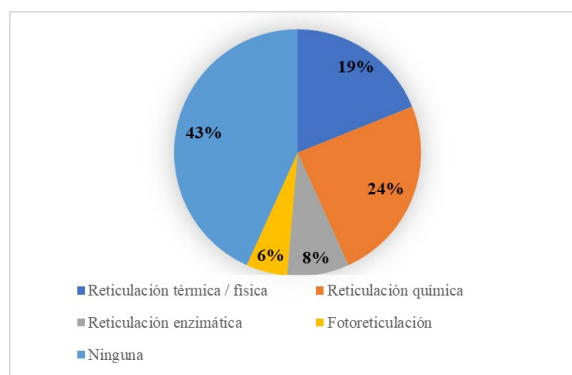


Fig. 8 Diferentes tipos de reticulación.

B. ¿Qué tipos de biomateriales pueden obtenerse a partir de residuos de fibras proteicas?

Se identifican y clasifican diferentes fuentes o materias primas de biomateriales de la siguiente manera: (i) la lana de oveja (*Ovis aries*) representa la fuente más reportada (21 artículos) debido a su alta disponibilidad como residuo agroindustrial y textil; (ii) pelo de animales distintos de las ovejas, como conejo, cabra, yak, burro y bovino, generado principalmente en actividades de mataderos y curtidurías (5 artículos reportados); (iii) seda, que comprende sericina y fibroína obtenidas de capullos de *Bombyx mori*, subproductos de la industria textil de la seda con propiedades funcionales específicas (5 artículos reportados) y (iv) sistemas de proteínas mixtas que combinan dos o más matrices biológicas, como lana y seda o queratina con colágeno (6 artículos reportados), destinados a mejorar las propiedades mecánicas y funcionales.

En los artículos estudiados se identificaron varias clases de biomateriales producidos a partir de residuos de fibra proteica:

a. Biomateriales fibrosos y nanofibrosos

Según el análisis, este tipo de biomaterial es el más registrado en la literatura, la cual se centra en la obtención de biomateriales fibrosos y nanofibrosos, principalmente en forma de nanofibras y andamios. Estos materiales se generan en su mayoría mediante electrohilado, utilizando proteínas como la queratina, la sericina o la fibroína, que a menudo se combinan con otros polímeros para facilitar su procesamiento, como la adición de gelatina, PVA, PVP, PEO y PCL para obtener fibras continuas, homogéneas y uniformes [23], [24], [15], [25].

A nivel funcional, este tipo de biomaterial presenta características físicas como una gran área superficial, una porosidad adecuada y una alta afinidad por el agua, propiedades relacionadas con la naturaleza proteica de sus componentes [37]. La alta hidrofiliidad de estos sistemas se asocia con ángulos de contacto bajos, lo que favorece la absorción de humedad. Estas características son particularmente evidentes en las nanofibras con mayor contenido proteico y son importantes para aplicaciones como apósitos y matrices para la regeneración tisular [32].

Asimismo, la estructura proteica típica de los biomateriales se conserva, como lo confirman los espectros FTIR, que muestran las bandas habituales de las amidas I, II y III unidas al enlace peptídico. Además, se observa la presencia de azufre y nitrógeno, componentes típicos de la queratina y asociados principalmente con la cisteína. Dichas características químicas justifican la gran afinidad por el agua y su alta capacidad de absorción de humedad de este tipo de biomaterial [24], [8].

En cuanto a las propiedades mecánicas, numerosos estudios afirman que estas estructuras dependen en gran medida de si el material se ha sometido a un proceso de reticulación. En su forma original, sin reticular, la resistencia suele ser limitada; sin embargo, al aplicar procesos de reticulación térmica o química, se observa un aumento notable

de la rigidez y la estabilidad del material. Este efecto se ha descrito en matrices de queratina-PVP tratadas térmicamente [15] y en nanofibras reticuladas con agentes químicos o activadas por luz [25].

b. Películas y bioplásticos proteicos

Otra categoría que ha recibido una amplia investigación son los bioplásticos y las películas, debido a la simplicidad de sus métodos de elaboración, como es el caso del colado en solución. Según la literatura, estos biomateriales se fabrican a partir de queratina pura o modificada [16], [38], así como sistemas híbridos donde se combinan con polisacáridos u otros polímeros naturales o sintéticos, ya sea como matriz principal o como fase funcional integrada en un sistema más complejo, para ajustar sus propiedades finales [27], [39], [29]. Ejemplos representativos incluyen películas y bioplásticos que han sido reforzados con tetraetilortosilicato (TEOS) y la queratina combinada con polímeros sintéticos (MPEGMA/PEG), [39], [33] así como materiales similares al papel producidos a partir de celulosa y lana [19].

Estas películas conservan señales proteicas como las bandas de amida típicas. En el caso de materiales modificados o reforzados, se observan nuevas señales espectroscópicas, demostrando la formación de enlaces adicionales, lo que confirma la interacción entre la queratina y los componentes añadidos, como ocurre en la queratina modificada con PEG (polietilenglicol) [16]. Con respecto a su composición elemental, se tiene la presencia de nitrógeno y azufre en películas obtenidas de fibra animal, lo que demuestra la naturaleza proteica del biomaterial [14], [3].

En cuanto a sus propiedades térmicas, se muestra biomateriales con una estabilidad adecuada para aplicaciones prácticas, ya que soportan ciertas temperaturas sin degradarse. En cuanto a las propiedades mecánicas, estas dependerán en gran medida de la formulación. Los sistemas simples basados únicamente en proteínas tienden a ser más frágiles y presentan una resistencia limitada; por otro lado, al incorporar aditivos como plastificantes, los resultados muestran materiales más flexibles y resistentes [35], [16]. En general, las películas y los bioplásticos pueden diseñarse con propiedades ajustables, ampliando su potencial en aplicaciones y como sustituto de materiales sintéticos convencionales.

c. Hidrogeles y biomateriales tridimensionales porosos

Gran parte de las investigaciones analizadas se centran en la obtención de hidrogeles y andamios tridimensionales porosos, de gran relevancia en los campos de la biomedicina y la ingeniería de tejidos. Estos materiales se obtienen mediante procesos de reticulación química, enzimática o activada por luz, combinando proteínas como la queratina, la sericina, la fibroína o la gelatina, que se unen entre sí [35], [37].

Estos materiales, químicamente, crean redes internas duraderas que contienen grupos funcionales característicos de las proteínas. Con respecto a sus propiedades físicas, destacan por su gran capacidad para absorber agua, expandiéndose

varias veces su tamaño inicial. Esto indica una gran afinidad por los entornos acuosos [37].

En términos mecánicos, estos biomateriales presentan una elasticidad compatible con los tejidos blandos, lo que los hace adecuados para aplicaciones que requieren flexibilidad. Además, la incorporación de refuerzos como nanopartículas u otros polímeros mejora su resistencia y les permite mantener su forma durante el uso sin afectar su capacidad de absorción de agua [22], [38], al igual que las espumas biohíbridas reforzadas con queratina [40], que muestran mejoras significativas en la estabilidad.

d. *Hidrolizados y polvos proteicos*

Parte de los estudios se centran en la obtención de hidrolizados de queratina y polvos proteicos, elaborados principalmente a partir de residuos de origen animal como lana, pelo de conejo, yak o cabra [12], [17], [18]. Estos materiales no están diseñados para crear estructuras sólidas, sino para ser utilizados como insumos en otros productos.

Las propiedades químicas indican una alta concentración de azufre y nitrógeno, mientras que las propiedades físicas muestran un tamaño de partícula muy pequeño y algunos se encuentran en estado líquido. Desde una perspectiva térmica, estos hidrolizados presentan menor resistencia al calor que la fibra original; esto concuerda con el hecho de que la hidrólisis causa una alteración parcial de la estructura proteica [17].

C. *¿Cuáles son las principales aplicaciones industriales reportadas para estos biomateriales, con énfasis en el sector textil y sus aspectos funcionales, tecnológicos y ambientales?*

TABLA II
CLASIFICACIÓN DE APLICACIONES DE BIOMATERIALES
FUNCIONALES

Aplicación	Descripción	Referencias
Biomédicas e ingeniería de tejidos	Andamios, apósitos, nanofibras y biotintas para regeneración tisular y liberación de fármacos	[8], [15], [16], [17], [18], [22], [23], [24], [25], [26], [29], [33], [34], [35], [41]
Agrícolas y agroambientales	Fertilizantes orgánicos, mulching biodegradable y mejora del suelo	[12], [13], [19], [21], [29], [34], [40]
Envases y embalajes sostenibles	Películas biodegradables y bioplásticos con barrera UV y antioxidante	[13], [19], [27], [28], [29]
Industria textil	Acabados funcionales, mejora de teñibilidad y protección UV	[3], [20], [30]
Industriales	Aislantes, espumas técnicas, filtración y dispositivos electrónicos orgánicos	[28], [29], [40], [41]
Cosmética y nutrición	Parches cosméticos, cuidado de la piel y suplementos aminoácidos	[27], [42]

Los biomateriales derivados de residuos de fibras proteicas presentan un amplio ámbito de aplicaciones, que

barcan desde usos biomédicos de alta complejidad hasta aplicaciones agrícolas, textiles, ambientales e industriales. Esta diversidad refleja la versatilidad funcional de proteínas estructurales.

a. *Aplicaciones biomédicas e ingeniería de tejidos*

La aplicación predominante corresponde al ámbito biomédico, particularmente en ingeniería de tejidos, cicatrización de heridas y desarrollo de andamios bioactivos. Numerosos estudios reportan el uso de queratina, sericina y fibroína para la fabricación de matrices extracelulares artificiales, apósitos avanzados y andamios tridimensionales, aprovechando su biocompatibilidad, bioactividad intrínseca y similitud con proteínas naturales del organismo [23], [24], [17], [16].

En este contexto, las nanofibras electrohiladas y las membranas proteicas destacan por favorecer la adhesión, proliferación y migración celular, siendo empleadas en regeneración cutánea, cicatrización de heridas crónicas y aplicaciones dérmicas especializadas [25], [8], [26]. Asimismo, sistemas más avanzados como biotintas fotocurables, andamios impresos en 3D y parches con microagujas amplían el uso de estas proteínas hacia la liberación controlada de fármacos, la bioimpresión celular y la regeneración de tejidos complejos, incluyendo hueso y membrana timpánica [34], [22], [35].

b. *Aplicaciones agrícolas*

Un segundo grupo relevante corresponde a aplicaciones agrícolas, donde los residuos queratínicos se valorizan como fertilizantes orgánicos, películas de acolchado y sistemas de liberación de nutrientes. Hidrolizados de queratina obtenidos a partir de lana ovina y pelo animal han demostrado estimular el crecimiento vegetal y mejorar la disponibilidad de nitrógeno en el suelo, ofreciendo alternativas sostenibles a fertilizantes convencionales [12], [19], [34].

También se ha sugerido transformar las fibras de lana residuales en películas biodegradables y como sustitutos parciales de las fibras de madera en papel y cartón. Desarrollar materiales agrícolas de este tipo, reduce los impactos ambientales, por su capacidad de biodegradarse y liberar gradualmente nutrientes al suelo [19].

c. *Envases, embalajes y materiales sostenibles*

Las aplicaciones en envases y embalajes biodegradables constituyen otra línea destacada. Estos materiales se emplean en películas flexibles, bioplásticos y materiales de embalaje con requerimientos mecánicos moderados, donde la biodegradabilidad, la barrera UV y las propiedades antioxidantes resultan críticas [12], [27], [28], [29].

d. *Industria textil y acabados funcionales*

Una fracción creciente de los estudios se orienta hacia aplicaciones textiles, donde la queratina se utiliza como agente funcional para mejorar la teñibilidad, la hidrofiliidad, la protección UV y mejor resistencia mecánica. Ejemplos representativos incluyen la cationización de algodón mediante hidrolizados de queratina y el acabado funcional de poliéster

con queratina extraída de lana y plumas, sin el uso de sales o reactivos agresivos [3], [20].

Además, al incorporar la queratina extraída de fibras proteicas en fibras híbridas de PVA demuestra su potencial para el desarrollo de fibras textiles funcionales con estabilidad térmica y propiedades mecánicas ajustables [30].

e. *Aplicaciones industriales*

Los biomateriales derivados de fibras proteicas también encuentran aplicaciones en materiales industriales y ambientales, como espumas técnicas, paneles aislantes ligeros y sistemas de amortiguación acústica. En estos casos, la queratina actúa como biorrelleno funcional, aportando flexibilidad, capacidad de reticulación y compatibilidad con matrices sostenibles, incluyendo redes orgánico-inorgánicas [40], [36].

Asimismo, se reportan aplicaciones emergentes en filtración de agua y dispositivos electrónicos orgánicos, particularmente en sistemas basados en nanofibras y películas delgadas de α -queratina, ampliando el alcance de estos materiales a sectores de alta tecnología [41].

f. *Cosmética, nutrición y usos especializados*

Finalmente, se identifican aplicaciones en cosmética y nutrición, donde la sericina y la queratina hidrolizada se emplean en parches cosméticos, productos de cuidado de la piel y formulaciones con propiedades hidratantes, antioxidantes y antiinflamatorias [42], [37]. Paralelamente, la hidrólisis ácida de residuos ricos en α -queratina ha permitido la obtención de aminoácidos esenciales destinados a suplementos nutricionales, como BCAA (isoleucina, leucina y valina) para consumo humano y animal [43].

V. DISCUSIÓN

Entre 2020 y 2025, la producción científica sobre biomateriales derivados de residuos proteicos evidencia una etapa de desarrollo, en el que el interés se centra principalmente en aplicaciones biomédicas, mientras que otras aplicaciones siguen siendo limitadas [8]. Se refleja un sesgo en la orientación del campo, donde los criterios de biocompatibilidad y funcionalidad clínica han predominado sobre aspectos clave como la escalabilidad, el costo y la aplicabilidad industrial.

En cuanto a los procesos de extracción, la hidrólisis alcalina se posiciona como el método más utilizado por su fácil implementación, alta eficiencia y escalabilidad. Esto es especialmente evidente en la investigación centrada en aplicaciones textiles y de recubrimientos [12], [3]. No obstante, aunque su impacto ambiental ha sido ampliamente señalado como una limitación, este análisis sugiere que dicha problemática debe ser evaluada desde una perspectiva más integral. En comparación con métodos alternativos más ecológicos, como la extracción hidrotermal en aguas subcríticas o el uso de líquidos iónicos recuperables, estos últimos implican altos costos energéticos asociados al calentamiento y mantenimiento de condiciones operativas,

además de un bajo nivel de madurez tecnológica y limitada escalabilidad [19], [20], [22]. En este sentido, la hidrólisis alcalina mantiene una ventaja competitiva en contextos industriales, donde los costos operativos pueden ser más determinantes que el uso de reactivos.

Un aspecto crítico poco abordado, es la condición real de los residuos proteicos, como es la lana, estos residuos suelen presentar altos niveles de contaminación, enredo y degradación, de manera que incrementa los costos asociados a su acondicionamiento (lavado, clasificación y tratamiento). Además, rara vez es considerada en estudios de laboratorio. Por tanto, la valorización de estos materiales no debería evaluarse únicamente en función de sus propiedades finales, sino considerando el balance global del proceso, incluyendo consumo de agua, energía y costos operativos, e integrando herramientas de análisis de ciclo de vida para una evaluación real.

Dichas evaluaciones son importantes, particularmente en aplicaciones biomédicas que presentan mayores exigencias sanitarias y de trazabilidad de sus materias primas. En contraste, estos residuos de menor calidad podrían encontrar una aplicación más viable en sectores como el textil, empaques, recubrimientos o sustitutos de papel y cartón, donde los requisitos técnicos son diferentes y el impacto ambiental positivo puede ser significativo.

En relación con las técnicas de procesamiento, el electrohilado se consolida como el método predominante para la obtención de biomateriales, especialmente en aplicaciones biomédicas, debido a la generación de estructuras con alta porosidad y área superficial [8], [24]. Sin embargo, su uso refuerza el enfoque biomédico dominante. Asimismo, la incorporación de polímeros sintéticos como PCL y PVA mejora las propiedades mecánicas [23], [15], pero introduce limitaciones en términos de biodegradabilidad, evidenciando una tensión entre desempeño y sostenibilidad. Por otro lado, el moldeo por colada representa una alternativa más accesible para la obtención de películas proteicas y bioplásticos, aunque presenta alta variabilidad en sus propiedades mecánicas y térmicas [13], [32]. Si bien estos materiales tienen potencial como sustitutos de plásticos convencionales, su menor resistencia sigue siendo una limitación técnica relevante.

Con respecto a las materias primas, la lana de oveja se consolida como la principal fuente de biomateriales proteicos [6]. No obstante, esta concentración sugiere una subutilización de otras fuentes, como residuos de fibras de menor calidad. La creciente incorporación de sistemas híbridos con proteínas o polisacáridos refleja una transición hacia materiales multifuncionales más complejos [7].

En este contexto, resulta relevante considerar estrategias que no solo se centren en la obtención de queratina (fracción hidrolizada), sino también en el aprovechamiento integral de subproductos, como los residuos sólidos no hidrolizados, compuestos por fibras degradadas, cuya valorización representa una oportunidad aún poco explorada. En este sentido, el desarrollo de biomateriales a partir de estas fracciones residuales para aplicaciones no críticas —como

elementos textiles funcionales, etiquetas o materiales biodegradables de corta vida útil con capacidad de reincorporación al suelo— constituye una estrategia prometedora dentro de la economía circular [44].

En conjunto, el presente estudio no solo identifica tendencias y limitaciones en la literatura, sino que aporta una visión crítica orientada a la aplicabilidad industrial, destacando que la sostenibilidad de los biomateriales depende de la optimización integral del proceso, desde el acondicionamiento del residuo hasta su uso final. Esta aproximación permite replantear la valorización de residuos proteicos como una alternativa condicionada también por factores tecnológicos, económicos y regulatorios.

VI. CONCLUSIONES

Los residuos de fibra proteica, en particular la lana de oveja, constituyen una fuente amplia y versátil para la obtención de biomateriales. Los estudios analizados evidencian avances significativos en las técnicas de extracción y procesamiento con propiedades específicas.

Sin embargo, el desarrollo del campo presenta desequilibrios importantes. La fuerte concentración en aplicaciones biomédicas contrasta con el limitado avance en sectores industriales y textiles, lo que evidencia una oportunidad clara para la diversificación de aplicaciones. Asimismo, aunque la combinación con polímeros y la modificación química permiten mejorar las propiedades de los biomateriales, también introducen desafíos relacionados con la sostenibilidad, la biodegradabilidad y la reproducibilidad.

El presente estudio aporta de manera concreta la identificación de brechas críticas entre investigación y aplicación industrial, destacando la necesidad de evaluar no solo el desempeño del material, sino también la viabilidad del proceso en su conjunto. En particular, se resalta la importancia de considerar factores como el acondicionamiento del residuo, el consumo de recursos y la escalabilidad tecnológica.

Se recomienda orientar futuras investigaciones hacia:

- El desarrollo de métodos de extracción sostenibles y escalables.
- La incorporación de análisis de ciclo de vida y evaluaciones tecnoeconómicas.
- La exploración de aplicaciones en sectores como el textil o empaques.
- El aprovechamiento integral de todas las fracciones del residuo.
- La estandarización de metodologías para la evaluación de propiedades y biodegradabilidad.

Una de las principales limitaciones de esta investigación es la escasez de estudios enfocados en aplicaciones textiles e industriales y el acceso limitado a algunos artículos en texto completo pudo afectar la exhaustividad de la revisión.

Adicionalmente, la alta heterogeneidad en metodologías de extracción y caracterización dificulta la comparación directa entre estudios. Finalmente, el predominio de investigaciones a escala de laboratorio y la ausencia de

evaluaciones integrales de sostenibilidad limitan la comprensión de la escalabilidad de los biomateriales en contextos industriales.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Esta investigación fue financiada por la Universidad Católica San Pablo (UCSP) Arequipa, Perú, y el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) del Perú, a través del Programa Nacional de Investigación Científica y de Estudios Avanzados (PROCIENCIA), con contrato No PE501095927-2025-PROCIENCIA.

REFERENCIAS

- [1] F. Tardini, “Los biomateriales como camino alternativo en el área del diseño,” *Cuaderno del Centro de Estudios en Diseño y Comunicación*, no. 191, pp. 263–276, mayo 2023, ISSN: 1668-0227.
- [2] J. Rajvanshi, M. Sogani, A. Kumar, and S. Arora, “Biomaterials: A sustainable solution for a circular economy,” *Engineering Proceedings*, vol. 59, no. 1, p. 133, 2023, doi: 10.3390/engproc2023059133.
- [3] M. O. Bulut and K. Akçali, “Sustainable cationic cotton with keratin hydrolysate,” *Fibers and Polymers*, vol. 25, pp. 3021–3033, 2024, doi: 10.1007/s12221-024-00164-1.
- [4] N. Urraca Rocha, A. Macrae, and A. M. Mazotto, “Advances and perspectives in the utilization of protein waste in the textile industry: A sustainable approach for the future,” *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 43, p. e01277, 2025, doi: 10.1016/j.susmat.2025.e01277.
- [5] S. Feroz, N. Muhammad, J. Ratnayake, and G. Dias, “Keratin-based materials for biomedical applications,” *Bioactive Materials*, vol. 5, no. 3, pp. 496–509, 2020, doi: 10.1016/j.bioactmat.2020.04.007.
- [6] J. Szczecina, E. Szczepanik, J. Barwinek, P. Szatkowski, M. Niemiec, A. I. Zhakypbekovich, and E. Molik, “Sheep wool as biomass: Identifying the material and its reclassification from waste to resource,” *Energies*, vol. 18, no. 19, Art. no. 5185, 2025, doi: 10.3390/en18195185.
- [7] S. Mattiello, A. Guzzini, A. Del Giudice, C. Santulli, M. Antonini, G. Lupidi, and R. Gunnella, “Physico-chemical characterization of keratin from wool and chicken feathers extracted using refined chemical methods,” *Polymers*, vol. 15, no. 1, Art. no. 181, 2023, doi: 10.3390/polym15010181.
- [8] C. Gaidău, M. Stanca, D. Simion, M. D. Berechet, and C.-A. Alexe, “Collagen and keratin hydrolysates as valuable additives for renewable new products in circular economy,” *Revista de Pielărie Încălțăminte*, vol. 24, no. 4, 2024, doi: 10.24264/lfj.24.4.2.
- [9] T. Schiller and T. Scheibel, “Bioinspired and biomimetic protein-based fibers and their applications,” *Communications Materials*, vol. 5, Art. no. 56, 2024.
- [10] L. Vega Zavaleta, L. Tellez Monzón, C. Nieto Aravena, M. F. Césare Coral, N. Vega Zavaleta, R. Vargas Parker, and L. Visitación Figueroa, “Aplicación de residuos sólidos hidrolizados del proceso de pelambre enzimático como fuente de aminoácidos libres en el crecimiento de plántulas de maíz,” *Saber y Hacer: Revista de Ingeniería de la USIL*, vol. 1, no. 2, pp. 22–33, 2014.
- [11] B. Mishra, Y. K. Mohanta, C. N. Reddy, S. D. M. Reddy, S. K. Mandal, R. Yadavalli, and H. Sarma, “Valorización de biorresiduos agroindustriales para biomateriales: un enfoque innovador de bioeconomía circular,” *Economía Circular*, vol. 2, no. 3, Art. no. 100050, 2023, doi: 10.1016/j.cec.2023.100050.
- [12] M. D. Berechet, D. Simion, M. Stanca, C.-A. Alexe, C. Chelaru, and M. Răpă, “Keratin hydrolysates extracted from sheep wool with potential use as organic fertilizer,” *Revista de Pielărie Încălțăminte*, vol. 20, no. 3, 2020, doi: 10.24264/lfj.20.3.5.
- [13] K. Mosnáčková, A. Opálková Šišková, A. Kleinová, M. Danko y J. Mosnáček, “Properties and degradation of novel fully biodegradable PLA/PHB blends filled with keratin,” *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 21, no. 24, art. no. 9678, 2020, doi: 10.3390/ijms21249678.

- [14] M. D. Berechet, C. Găidău, D. Simion y C. Șendrea, "Keratin hydrolysate from wool by-products as an additive for dyeing bovine leathers," *Revista de Pielărie Încălțăminte (Leather and Footwear Journal)*, vol. 23, no. 3, 2023, doi: 10.24264/lfj.23.3.1.
- [15] G. Suarato, M. Contardi, G. Perotto, J. A. Heredia-Guerrero, F. Fiorentini, L. Ceseracci, C. Pignatelli, D. Debellis, R. Bertorelli, and A. Athanassiou, "From fabric to tissue: Recovered wool keratin/polyvinylpyrrolidone biocomposite fibers as artificial scaffold platform," *Materials Science and Engineering: C*, vol. 116, art. no. 111151, 2020, doi: 10.1016/j.msec.2020.111151.
- [16] X. Ye, J. Yuan, Z. Jiang, S. Wang, P. Wang, Q. Wang, and L. Cui, "Thiol-ene photoclick reaction: An eco-friendly and facile approach for preparation of MPEG-g-keratin biomaterial," *Engineering in Life Sciences*, vol. 20, no. 1, pp. 17–25, 2020, doi: 10.1002/elsc.201900105.
- [17] X. Wang, Z. Shi, Q. Zhao, and Y. Yun, "Study on the structure and properties of biofunctional keratin from rabbit hair," *Materials*, vol. 14, no. 2, p. 379, 2021, doi: 10.3390/ma14020379.
- [18] D. J. Trojanowska, G. Suarato, C. Braccia, A. Armirotti, F. Fiorentini, A. Athanassiou, and G. Perotto, "Wool keratin nanoparticle-based micropatterns for cellular guidance applications," *ACS Applied Nano Materials*, vol. 5, no. 10, 2022, doi: 10.1021/acsanm.2c03141.
- [19] P. Bhavsar, T. Balan, G. Dalla Fontana, M. Zoccola, A. Patrucco, and C. Tonin, "Sustainably processed waste wool fiber-reinforced biocomposites for agriculture and packaging applications," *Fibers*, vol. 9, no. 9, Art. no. 55, 2021, doi: 10.3390/fib9090055.
- [20] L. Fras Zemljič, M. Čolnik, D. Fakin, T. Pušić, V. Bračko, T. Kraševac Glaser, and M. Škerget, "Eco-friendly functional finishes of polyester fabric using keratin from wool and feather wastes," *Progress in Organic Coatings*, vol. 194, Art. no. 108616, 2024, doi: 10.1016/j.porgcoat.2024.108616.
- [21] T. K. Maity, N. Singh, P. Vaghela, A. Ghosh, S. Singh, P. B. Shinde, R. A. Sequeira, and K. Prasad, "Efficient isolation of keratin from protein-rich waste biomass: A practical approach to minimize environmental impact and valorize waste biomass," *Sustainable Environment Research*, vol. 32, Art. no. 42, 2022, doi: 10.1186/s42834-022-00142-3.
- [22] S. Feroz, N. Muhammad, R. Ullah, U. Nishan, P. Cathro, and G. Dias, "Mechanical properties and *in vitro* biocompatibility assessment of biomimetic dual layered keratin/hydroxyapatite scaffolds," *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 11, Art. no. 1304147, 2023, doi: 10.3389/fbioe.2023.1304147.
- [23] Cruz-Maya, A. Varesano, C. Vineis, and V. Guarino, "Comparative study on protein-rich electrospun fibers for *in vitro* applications," *Polymers*, vol. 12, no. 8, Art. no. 1671, 2020, doi: 10.3390/polym12081671.
- [24] M. Răpă, C. Găidău, L. M. Stefan, E. Matei, M. Niculescu, M. D. Berechet, M. Stanca, C. Tablet, M. Tudorache, R. Gavrilă, C. Predescu, and R. Vidu, "New nanofibers based on protein by-products with bioactive potential for tissue engineering," *Materials*, vol. 13, no. 14, Art. no. 3149, 2020, doi: 10.3390/ma13143149.
- [25] D. O. Sanchez Ramirez, I. Cruz-Maya, C. Vineis, C. Tonetti, A. Varesano, and V. Guarino, "Design of asymmetric nanofibers-membranes based on polyvinyl alcohol and wool-keratin for wound healing applications," *Journal of Functional Biomaterials*, vol. 12, no. 4, Art. no. 76, 2021, doi: 10.3390/jfb12040076.
- [26] M. Răpă, C. Găidău, L. M. Stefan, A. Lazea-Stoyanova, M. D. Berechet, A. Iosageanu, E. Matei, V. Jankauskaitė, C. Predescu, V. Valeika, A. Balčiūnaitienė, and S. Cupara, "Donkey gelatin and keratin nanofibers loaded with antioxidant agents for wound healing dressings," *Gels*, vol. 10, no. 6, Art. no. 391, 2024, doi: 10.3390/gels10060391.
- [27] J. Nam, Y. Hyun, S. Oh, J. Park, H.-J. Jin, and H. W. Kwak, "Effect of cross-linkable bacterial cellulose nanocrystals on the physicochemical properties of silk sericin films," *Polymer Testing*, vol. 97, Art. no. 107161, 2021, doi: 10.1016/j.polymertesting.2021.107161.
- [28] R. Wang, "Performance and structure evaluation of Gln-Lys isopeptide bond crosslinked USYK-SPI bioplastic film derived from discarded yak hair," *Polymers*, vol. 14, no. 12, Art. no. 2471, 2022, doi: 10.3390/polym14122471.
- [29] J. R. M. Haroub Alshehhi, N. Wanasingha, R. Balu, J. Mata, K. Shah, N. K. Dutta, and N. Roy Choudhury, "3D-printable sustainable bioplastics from gluten and keratin," *Gels*, vol. 10, no. 2, Art. no. 136, 2024, doi: 10.3390/gels10020136.
- [30] O. Bayanmunkh, B. Baatar, N. Tserendulam, K. Boldbaatar, C. Radnaabazar, T. Khishigjargal, E. Norov, and B. Jambaldorj, "Fabrication of wet-spun wool keratin/poly(vinyl alcohol) hybrid fibers: Effects of keratin concentration and flow rate," *ACS Omega*, vol. 8, no. 13, 2023, doi: 10.1021/acsomega.2c08364.
- [31] S. Bekar, T. Sezgin Arslan, and Y. E. Arslan, "Development of ductile-sticky bone fillers from biodegradable hydrolyzed wool-keratin and silk fibroin," *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 309, 2400144, 2024, doi: 10.1002/mame.202400144.
- [32] P. Farshi, R. Salarian, M. Rabiee, S. Alizadeh, M. Gholipourmalekabadi, S. Ahmadi, and N. Rabiee, "Design, preparation, and characterization of silk fibroin/carboxymethyl cellulose wound dressing for skin tissue regeneration applications," *Polymer Engineering & Science*, vol. 62, pp. 2741–2749, 2022, doi: 10.1002/pen.26057.
- [33] S. N. Yildiz, T. Sezgin Arslan, and Y. E. Arslan, "Organic-inorganic biohybrid films from wool-keratin/jellyfish-collagen/silica/boron via sol-gel reactions for soft tissue engineering applications," *Biomedical Materials*, vol. 19, no. 2, Art. no. 025032, 2024, doi: 10.1088/1748-605X/ad2557.
- [34] J.-X. Li, S.-X. Zhao, and Y.-Q. Zhang, "Silk protein composite bioinks and their 3D scaffolds and *in vitro* characterization," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 23, no. 2, Art. no. 910, 2022, doi: 10.3390/ijms23020910.
- [35] T. Bedir, D. Baykara, R. Yildirim, A. C. Calikoglu Koyuncu, A. Sahin, E. Kaya, G. Bosgelmez Tinaz, M. A. Insel, M. Topuzogullari, O. Gunduz, C. B. Ustundag, and R. Narayan, "Three-dimensional-printed GelMA-KerMA composite patches as an innovative platform for potential tissue engineering of tympanic membrane perforations," *Nanomaterials*, vol. 14, no. 7, Art. no. 563, 2024, doi: 10.3390/nano14070563.
- [36] L. Abbà, M. Marcioni, L. Maddalena, G. Sanchez-Olivares, and F. Carosio, "Fire safe and sustainable lightweight materials based on layer-by-layer coated keratin fibers from tannery wastes," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 205, pp. 150–158, 2025, doi: 10.1016/j.jmst.2024.03.055.
- [37] E. B. Demiray, T. Sezgin Arslan, B. Derkus, and Y. E. Arslan, "A facile strategy for preparing flexible and porous hydrogel-based scaffolds from silk sericin/wool keratin by *in situ* bubble-forming for muscle tissue engineering applications," *Macromolecular Bioscience*, vol. 25, no. 2, Art. no. 2400362, 2025, doi: 10.1002/mabi.202400362.
- [38] B. Choi, S. Jeong, and Y. Park, "Exploring the potential of high value-added recycling of wool wastes with the aid of sustainable process design by DOZN™," *Journal of Natural Fibers*, vol. 22, no. 1, Art. no. 2508285, 2025, doi: 10.1080/15440478.2025.2508285.
- [39] W. Li, Y. Chen, and S. Zhang, "Hydrolysis of abandoned bovine hair by pulping spent liquor and preparation of degradable keratin-based sprayable mulch film," *BioResources*, vol. 15, no. 3, pp. 5058–5071, 2020.
- [40] D. Trojanowska, F. Monie, G. Perotto, A. Athanassiou, B. Grignard, E. Grau, T. Vidil, H. Cramail, and C. Detrembleur, "Valorization of waste biomass for the fabrication of isocyanate-free polyurethane foams," *Green Chemistry*, vol. 26, no. 14, 2024.
- [41] N. D. Tissera, R. N. Wijesena, N. Ludowyke, G. Priyadarshana, D. Dahanayake, R. M. de Silva, and K. M. N. de Silva, "Keratin protein nanofibers from merino wool yarn: A top-down approach for the disintegration of hierarchical wool architecture to extract α -keratin protein nanofibers," *RSC Advances*, vol. 14, no. 10, 2024.
- [42] Dragojlov, R. Aad, D. Ami, M. Mangiagalli, A. Natalello, and S. Vesentini, "Silk sericin-based electrospun nanofibers forming films for cosmetic applications: Preparation, characterization, and efficacy evaluation," *Molecules*, vol. 30, no. 3, Art. no. 715, 2025, doi: 10.3390/molecules30030715.
- [43] D. A. Firdaus, D. Andrianto, and N. Darmawan, "Amino acids isolation from α -keratin of Javanese goat (*Capra hircus*) hair and Garut sheep (*Ovis aries*) hair waste using acid hydrolysis method as BCAA supplement," *Jurnal Kimia Valensi*, vol. 10, no. 1, pp. 123–132, 2024, doi: 10.15408/jkv.v10i1.38146.
- [44] Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), *The Circularity Gap Report: Latin America and the Caribbean*, LC/TS.2023/128. Santiago, Chile: ECLAC, 2023.