

La anisotropía y la estructura fibrosa de la lana

Por Laura Abarzuza, estudiante de la UNED (Grado en Química).

Anisotropía: dicho de un medio o un cuerpo, que posee propiedades distintas según la dirección en que se mide.
(Adaptado y traducido de ZTH Elhuyar, 2019).

La *sokatira* (en euskera *tirar de la sogá*) es un deporte rural muy popular. Su práctica se extiende a zonas de la cornisa cantábrica, regiones del norte de Escocia, Irlanda, India o Estados Unidos. En este juego, dos equipos se colocan en posiciones opuestas y tiran de una larga sogá por sus extremos, en un reto de fuerza. La sogá está marcada en el centro, de forma que, desde el equilibrio, por la fuerza ejercida por ambos equipos, se alcance la distancia estipulada para ganar, en la dirección del juego. Quien sobrepasa la marca, gana la partida.



Figura 1. Mujeres tirando de la sogá en la Feria de Pushkar, India. (Tomado de Wikipedia).

La cuestión es, ¿qué pasaría si tiráramos con la misma fuerza, en lugar de en la dirección del eje de la cuerda, en dirección perpendicular a esta? Seguramente nos daríamos un buen golpe contra el suelo, porque la cuerda se rompería.

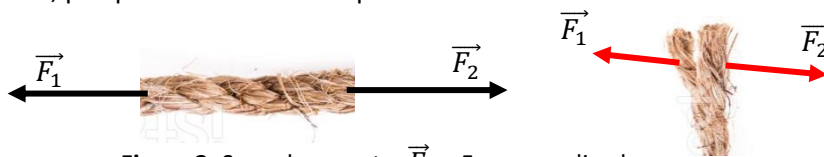


Figura 2. Soga de esparto. \vec{F}_i = Fuerzas aplicadas.

Este ejemplo ilustra de forma *macroscópica* las propiedades anisotrópicas de la sogá. Si hiciéramos un *zoom* sobre ella, podríamos ver cómo las fibras de la sogá se tensionan, estrechan y alargan en el primer caso y cómo se separan en el segundo.

La naturaleza de la sogá puede ser variada -esparto, polietileno, algodón, lana, etc.- y cada componente, en función de su naturaleza y de cómo estén estructuradas las moléculas en su interior, tendrá propiedades mecánicas diferentes, es decir, aguantará la tensión más o menos tiempo.

En el caso de la lana, si ampliáramos la zona más aún, a nivel microscópico o nanoscópico, veríamos la misma la estructura interna que la sogá protegida dentro de matrices y capas, como se muestra en la figura 3.

El modelo más extendido de la estructura de la lana es el propuesto en 1972 por Bruce Fraser, Tom MacRae y colaboradores (Popescu y Höcker, 2007; SCIRO, 2015) que se muestra en la figura 3, donde se exponen, a distintos niveles (sin escala), los elementos que forman la fibra.

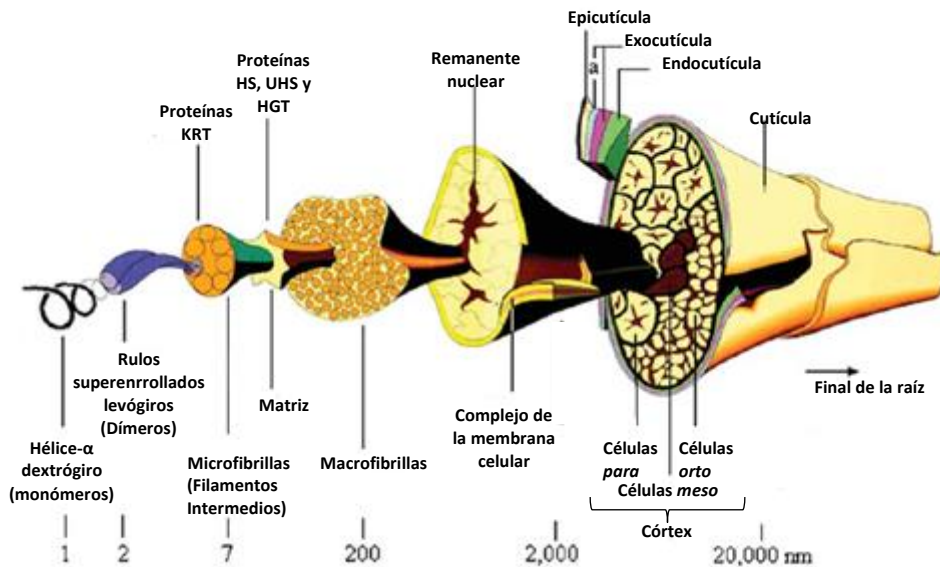


Figura 3. Adaptación del Modelo de *telescopio* (Popescu y Höcker, 2007): diagrama esquemático de la fibra de lana merina (CSIRO) basado en el dibujo de Bruce Fraser de 1972¹.

Las propiedades mecánicas de una cuerda se deben pues a la disposición de las fibras que la componen, pero, además, si estas fibras se enrollan de forma ordenada, la propia estructura mejora estas propiedades, ayudando por contacto, a mantenerse unida y no romperse. La estabilidad termodinámica tiene mucho que ver en este asunto.

A nivel macroscópico el efecto anisotrópico de la estructura también afecta a determinadas propiedades medibles como, por ejemplo, la velocidad de propagación de la luz polarizada a través de la fibra. Como se observa en la figura 4, si hacemos pasar luz polarizada a través de la lana bajo polarizadores cruzados, los cambios en la velocidad de la luz (*índice de refracción, n*) dan lugar a diferentes efectos ópticos.

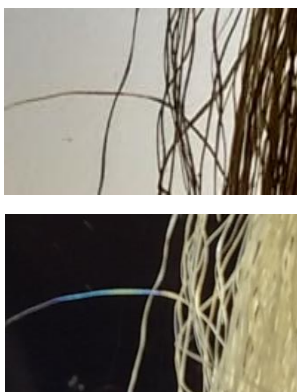


Figura 4. Fibras de lana sobre una fuente de luz blanca y dos pantallas polarizadas colocadas en dirección paralela (arriba) y perpendicular (*polarización cruzada*, abajo). En esta última se observa cómo se transmite [luz polarizada](#) a través de la lana; los cambios en la velocidad de propagación de la luz (*índice de refracción, n*) se reflejan también en fenómenos ópticos debidos a la [Birrefringencia](#) o *doble refracción*.

¹ Proteínas KRT, queratinas (*keratin*); Proteínas KAP, proteínas asociadas a queratinas (*Keratin Associated Proteins*); Proteínas HS, proteínas tipo KAP de alto contenido en azufre (*Hight Sulphur*); Proteínas UHS, proteínas tipo KAP de muy alto contenido en azufre (*Ultra High Sulphur*); Proteínas HGT, proteínas tipo KAP de alto contenido en aminoácidos de glicina y tirosina (*High Glycine Tyrosine*).

Estos efectos ópticos son consecuencia de los cambios de la dirección de la luz refractada e indican que las moléculas están conformadas en planos ordenados, y estas familias de planos, orientadas en distintas direcciones. Factores como la longitud de onda incidente, la temperatura, la presión o la concentración de los componentes influyen de forma importante en estas propiedades ópticas (Hernanz, A. et al., 2003).

La lana presenta esta anisotropía en distintas propiedades, la absorción de moléculas es otra de ellas. El agua, por ejemplo, puede ser absorbida por la lana en grandes cantidades y de forma muy rápida; esta absorción, además de hacer que su peso aumente, hace que la fibra se expanda longitudinalmente (2%) y transversalmente, tanto que su diámetro puede hincharse hasta más de un 15% en condiciones ambientales muy húmedas (Cruz et al., 2016).

El agua hace que las propiedades mecánicas de la lana varíen en comparación con las mismas fibras secas. Si recordamos que la lana se compone de proteínas, y que estas son largas cadenas de aminoácidos, podemos tener una idea de cuáles serán los sitios de unión del agua a las fibras de lana; desde los enlaces peptídicos hasta los residuos aminoácidos cargados o polares pueden ser buenos aceptores de estas moléculas. La propia estructura de la lana se compone de pequeñas *microfibrillas* de proteínas de queratina o KRT (del inglés *Keratin*) incrustadas en una matriz, también proteica, que a su vez forman *macrofibrillas*, unos filamentos de aproximadamente 200 nm dentro de las propias células que componen la lana (Popescu y Höcker, 2007). Esta matriz, sin embargo, está compuesta de proteínas no tan ordenadas, las denominadas proteínas asociadas a queratina (KAP, *Keratin Associated Proteins*) cuyos componentes no permiten estructuras tan ordenadas como las de las KRT (hélices- α superenrolladas) y absorben la humedad en el interior de sus huecos más hidrofílicos, aumentando el diámetro de la fibra, hinchando la lana en la dirección ecuatorial más que en la dirección longitudinal, y distorsionando la estructura interna de la fibra (Cruz et al., 2016). En la figura 5 se muestra esquemáticamente la estructura de la lana y los distintos lugares de unión de las moléculas de agua (W).

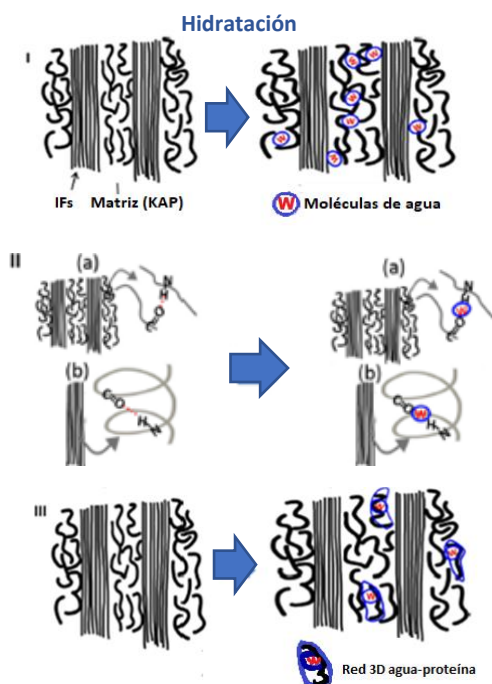


Figura 5. Diagramas esquemáticos de la interacción del agua propuesta para las *macrofibrillas*: En (I) el agua actúa como puente en los enlaces cruzados y en el hinchamiento, de forma que aumenta la distancia entre las proteínas de la matriz; En (II) el agua puede colarse en los enlaces de hidrógeno de las cadenas de proteínas de la matriz (KAP) o en las queratinas filamentosas con estructura helicoidal (KRT); En (III) el agua se introduce en la matriz, formando redes tridimensionales de proteína-agua (Wang et al., 2016)

El agua puede enlazarse entre las cadenas y actuar como un agente de hinchamiento, reducir el entrecruzamiento y el espaciado entre las cadenas (Fig. 5-I); puede introducirse en los enlaces de hidrógeno de la estructura secundaria que estabiliza la molécula dando holgura o aumentando la movilidad de las proteínas (Fig. 5-II, a); o puede formar una red tridimensional de moléculas de agua, que funciona como plastificante, reduciendo la rigidez y aumentando la movilidad de la estructura molecular de la matriz (fig. 5-III). En algunos estudios sobre componentes de filamentos de queratina sin presencia de matriz, se observa que estos filamentos son también sensibles a la humedad (Fig. 5-II, b), aumentando la capacidad de absorción en comparación con estas mismas estructuras insertadas en la matriz (Wang et al., 2016).

El gráfico 1 corresponde a las propiedades mecánicas de las fibras de lana cuando se han sometido a distintos porcentajes de absorción de humedad relativa (RH). Estas gráficas muestran cómo varía su elasticidad, el módulo de Young, el límite elástico, la zona plástica o el punto de rotura.

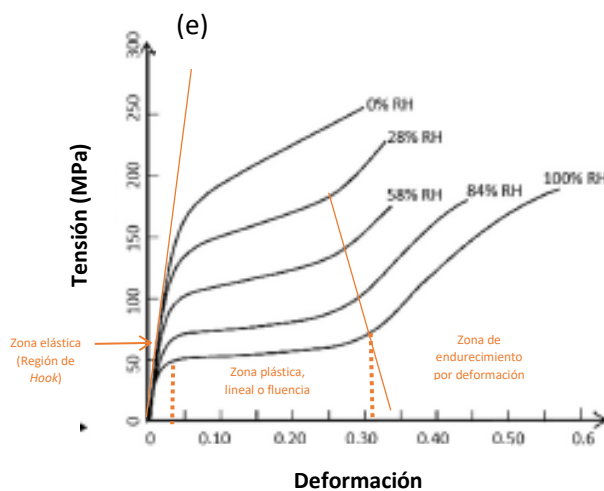


Gráfico 1. Curvas de tensión-deformación para la lana merina con la misma microestructura inicial en función de la humedad absorbida (Wang et al., 2016).

La importancia del medio en relación al comportamiento estructural de las proteínas es esencial; y recíprocamente, la estructura de la proteína resulta esencial tanto en su comportamiento de adsorción, como en su comportamiento elástico, plástico o resistencia, y en sus propiedades en general.

Como se puede observar en este gráfico 2, las propiedades mecánicas de los productos de queratina dependen tanto de las microestructuras que presentan sus componentes, diferentes en los casos de la lana, cabello, plumas, uñas, escamas, barbas o picos, como de las condiciones ambientales a las que están expuestas.

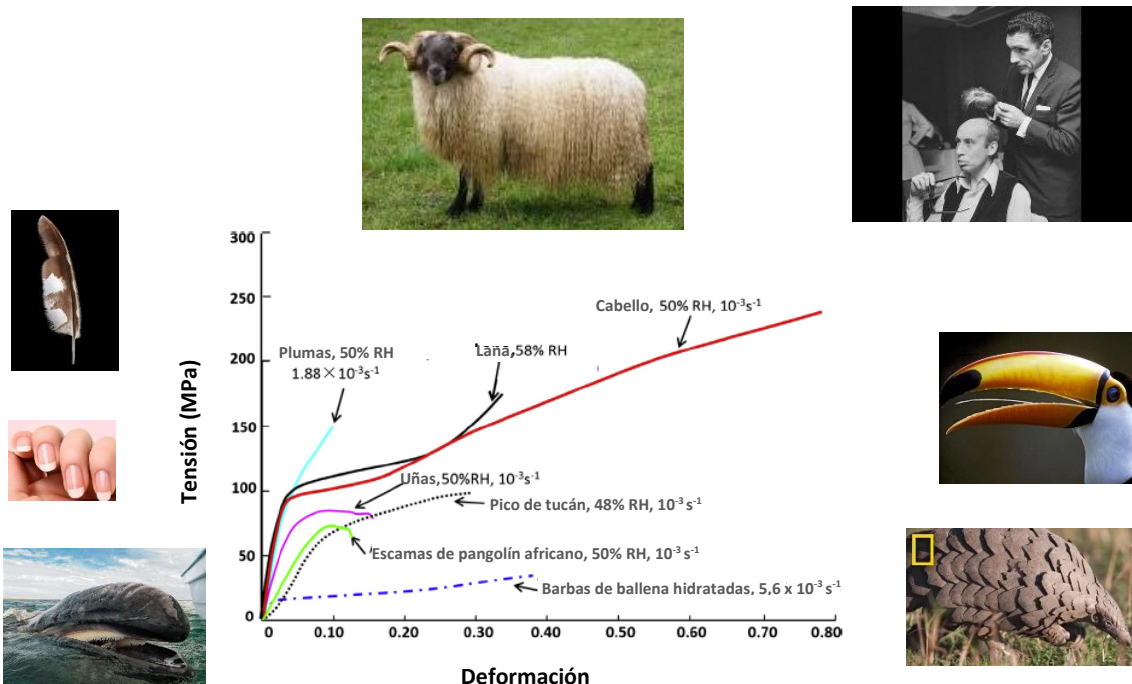


Gráfico 2. Curvas de tensión-deformación para distintos productos de queratina con distintas microestructuras según la humedad absorbida (Wang et al., 2016). Fotos de CONFELAC, *Muy interesante* y *National Geographic*.

La anisotropía de la lana es de gran interés, como hemos visto, en la absorción de moléculas, en las propiedades ópticas y mecánicas, así como en las superficiales, térmicas o eléctricas, pero también lo es en la propagación de éstas.



Figura 6. Izquierda: Rotura producida por la fisura perpendicular al eje de la cuerda y su propagación. Derecha: Estructura interna de una cuerda de escalada. (Fotografías tomadas Wikipedia, de David J. Fred).

La anisotropía de la lana aumenta la propagación de las fisuras en la dirección de la tensión. Si por fricción una cuerda se rompe perpendicularmente a la dirección de la tensión aplicada, la rotura de la fibra es inminente, debido a la desestabilización de las fuerzas que la mantienen unida.

Por esta razón, las cuerdas más resistentes, se componen de trenzas de fibras orientadas en varias direcciones, de forma que la rotura, o la tensión que la produce, pueda frenarse con el impacto contra una *pared* oblicua a ella, como puede ser una fibra en otra dirección.

El manejo de microestructuras proteínicas dispuestas estratégicamente y la estabilidad de sus componentes conformando estas microestructuras es la clave para mejorar sus propiedades. Así, estudiar el comportamiento de la lana conforme a estas propiedades *anisotrópicas* controlando las variables fisicoquímicas ambientales puede ser un buen punto de partida para acercarnos a conocer las *estructuras funcionales* de este biomaterial.

Los ejemplos recogidos en estas páginas dan una idea de la amplitud de las características de las fibras y de que, el estudio de las propiedades estructurales de la lana es un gran campo abierto, que trata de comprender tanto las estructuras polipeptídicas en sí mismas, como las condiciones ambientales que pueden mejorar estas nano, micro y macroestructuras.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la profesora Dra. Mercedes de la Fuente del departamento de C.C. y T.T. Fisicoquímicas de la UNED por la ayuda y guía en este proyecto, así como a las entidades Fundación Bancaria “La Caixa”, Fundación Caja Navarra y UNED-Pamplona por su promoción y financiación.

BIBLIOGRAFÍA

- Cruz, C. F., Costa, C., Gomes, A. C., Matamá, T., y Cavaco-Paulo, A. (2016). Human Hair and the Impact of Cosmetic Procedures: A Review on Cleansing and Shape-Modulating Cosmetics. *Cosmetics*, 3(3), 26. <https://doi.org/10.3390/cosmetics3030026>
- Hernanz Gismero, Antonio, Izquierdo Sañudo, María Cruz, Navarro Delgado, Raquel, Peral Fernández, Fernando, Senent Pérez, Salvador, y Troitiño Núñez, María Dolores. (2003). *Técnicas instrumentales fisicoquímicas* (UNED). Madrid.
- Popescu, C., y Höcker, H. (2007). Hair: the most sophisticated biological composite material. *Chemical Society Reviews*, 36(8), 1282-1291. <https://doi.org/10.1039/b604537p>
- SCIRO. (2015). Unravelling the structure of the wool fibre and other keratins. Recuperado 14 de noviembre de 2018, de <https://csiropedia.csiro.au/wool-fibre-structure/>
- UNED y UPM. (2000). Crista-Mine. Recuperado 14 de marzo de 2019, de https://www2.uned.es/cristamine/crist_opt/cropt_micr_anisot.htm
- Wang, B., Yang, W., McKittrick, J., y Meyers, M. A. (2016). Keratin: Structure, mechanical properties, occurrence in biological organisms, and efforts at bioinspiration. *Progress in Materials Science*, 76, 229–318. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.06.001>