

Universidad Católica de Santa María

**Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y
Biotecnológicas**

Escuela profesional de Ingeniería Biotecnológica



**EVALUACIÓN Y DETERMINACIÓN DE COLORANTES AZOICOS MEDIANTE LA
APLICACIÓN DE ULTRASONIDO COMO MÉTODO ALTERNATIVO EN EL
TEÑIDO DE FIBRAS DE ALPACA**

Tesis presentada por los Bachilleres:

Serrano Ollancaya, Oscar Anthony

Vilcapaza Condori, Gustavo Enrique Franco

Para optar el Título profesional de:

Ingeniero Biotecnólogo

Asesor:

M.Sc. Ortiz Romero, Derly David

Arequipa – Perú

2023

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA BIOTECNOLOGICA

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 01 de Septiembre del 2023

Dictamen: 007331-C-EPiB-2023

Visto el borrador del expediente 007331, presentado por:

2017202771 - SERRANO OLLANCAYA OSCAR ANTHONY

2017602931 - VILCAPAZA CONDORI GUSTAVO ENRIQUE FRANCO

Titulado:

**EVALUACIÓN Y DETERMINACIÓN DE COLORANTES AZOICOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE
ULTRASONIDO COMO MÉTODO ALTERNATIVO EN EL TEÑIDO DE FIBRAS DE ALPACA**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

**29213630 - CARDENAS GARCIA JAIME DANTE
DICTAMINADOR**



**29440909 - MOLINA RODRIGUEZ FREDY NICOLAS
DICTAMINADOR**



**29728642 - VALDIVIA CARPIO WILLY ANIBAL
DICTAMINADOR**



EVALUACIÓN Y DETERMINACIÓN DE COLORANTES AZOICOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ULTRASONIDO COMO MÉTODO ALTERNATIVO EN EL TEÑIDO DE FIBRAS DE ALPACA

INFORME DE ORIGINALIDAD

4%

INDICE DE SIMILITUD

5%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

1%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

www.mdpi.com

Fuente de Internet

2%

2

repositorio.unaj.edu.pe

Fuente de Internet

1%

3

repositorio.unsaac.edu.pe

Fuente de Internet

1%

4

archive.org

Fuente de Internet

1%

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Apagado

AGRADECIMIENTO

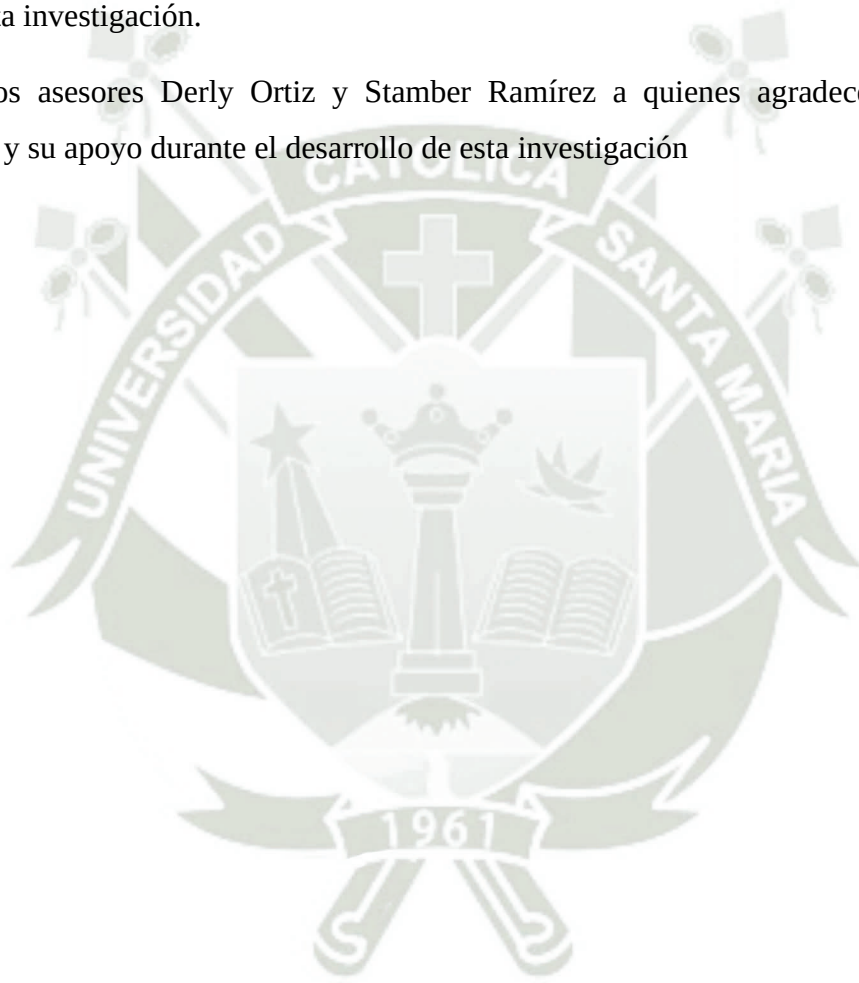
A nuestras familias, por brindarnos apoyo incondicional, amor, paciencia, comprensión, perseverancia y constante aliento que necesitamos para culminar nuestra carrera.

A la Universidad Católica de Santa María y nuestra facultad que nos brindaron la oportunidad de formar parte de ellos.

A la Universidad Tecnológica del Perú por brindarnos sus instalaciones y recursos para llevar a cabo esta investigación.

A nuestros asesores Derly Ortiz y Stamber Ramírez a quienes agradecemos su infinita paciencia y su apoyo durante el desarrollo de esta investigación

Gustavo y Oscar



RESUMEN

La presente investigación consistió en evaluar el efecto del ultrasonido en el teñido de calidades de fibras de alpaca Baby, Fleece y Huarizo. Dos colorantes azoicos de aplicación textil, Rojo Synozol K3BS y Azul Novacron FN-BN, fueron usados. Se validó el método analítico para determinar la concentración de los colorantes por espectrofotometría UV-Visible, el cual presentó una linealidad y sensibilidad adecuadas. Se realizó el teñido por el método de agotamiento convencional (CN) a 92 °C y el método de agotamiento asistido por ultrasonido (US) a 60, 70 y 80 °C. Se determinaron los mejores parámetros del método de ultrasonido mediante el diseño factorial 3^2 para compararlo mediante la prueba F y t con el método convencional. Al producto final del teñido se le realizaron diferentes pruebas de solidez del color para evaluar la fijación del colorante en ambos métodos mediante imágenes digitales. El diseño factorial demostró que el teñido de la fibra Baby a 80 °C permitió maximizar el agotamiento de los colorantes. Es importante resaltar que el teñido con US agotó el colorante Rojo Synozol K3BS a los 20 minutos dando paso a un ahorro de tiempo en comparación a los 30 minutos estandarizados por el método CN. Adicionalmente, ambos métodos presentan solidez similar, la prueba F y t resultaron en un valor-p mayor a 0.05 para todas las fibras con un nivel de confianza del 95 % por lo que se concluye que no existe diferencia en el agotamiento de los colorantes en ambos métodos, los resultados fueron discutidos.

Palabras clave:

Absorción del colorante, ultrasonido, solidez del color, teñido por agotamiento.

ABSTRACT

The present investigation consisted of evaluating the effect of ultrasound on the dyeing of Baby, Fleece and Huarizo alpaca fiber qualities. Two azo dyes for textile application Synozol Red K3BS and Novacron Blue FN-BN were used. The analytical method to determine the concentration of the dyes by UV-Visible spectrophotometry was validated and it showed adequate linearity and sensitivity. Dyeing was performed by the conventional exhaustion method (CN) at 92 °C and the ultrasound-assisted exhaustion method (US) at 60, 70 and 80 °C. The best parameters of the ultrasound method were determined by factorial design 3^2 for comparison by F-test and t-test with the conventional method. The resulting dyeing product was exposed to different color fastness tests to evaluate the dye fixation in both methods using digital images. The factorial design showed that dyeing Baby fiber at 80 °C maximized dye exhaustion. It is important to highlight that dyeing with US exhausted Red Synozol K3BS dye after 20 minutes, resulting in a time saving compared to the 30 minutes standardized by the CN method. Additionally, both methods present similar fastness, the F-test and t-test resulted in a p-value greater than 0.05 for all fibers with a confidence level of 95 %, so it is concluded that there is no difference in the depletion of the dyes in both methods, the results were discussed.

Key words:

Dye uptake, ultrasound, color fastness, exhaust dyeing.

ÍNDICE

RESUMEN	iv
ABSTRACT.....	v
INTRODUCCIÓN	xviii
HIPÓTESIS.....	xx
OBJETIVOS	xxi
OBJETIVO GENERAL	xxi
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	xxi
CAPÍTULO I:	1
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. Alpaca	1
1.1.1. Alpaca Huacaya	2
1.1.2. Alpaca Suri.....	3
1.2. Fibra	3
1.3. Fibra de alpaca	4
1.4. Composición de la fibra de alpaca	5
1.4.1. Cutícula	5
1.4.2. Corteza	6
1.4.3. Médula	7
1.5. Propiedades de la fibra de alpaca.....	7
1.5.1. Propiedades físicas.....	7
1.5.1.1. Finura.....	7
1.5.1.2. Longitud.....	8
1.5.1.3. Lustre o Brillo.....	9
1.5.1.4. Higroscopia.....	9
1.5.1.5. Suavidad	9

1.5.1.6.	Resistencia	9
1.5.1.7.	Rizo y ondulación	9
1.5.1.8.	Rendimiento al lavado	9
1.5.1.9.	Elasticidad	10
1.5.1.10.	Conductividad térmica	10
1.5.2.	Propiedades Químicas.....	10
1.5.2.1.	Acción del agua sobre la fibra	10
1.5.2.2.	Acción de los álcalis sobre la fibra	11
1.5.2.3.	Acción de los ácidos sobre la fibra	11
1.5.2.4.	Acción de las sales metálicas sobre la fibra	11
1.5.2.5.	Acción de suavizantes y parafinado sobre la fibra	11
1.5.3.	Propiedades Biológicas	12
1.5.4.	Reacción al calor	12
1.6.	Procesos de industrialización de la fibra de alpaca.....	12
1.6.1.	Proceso de hilado	12
1.6.1.1.	Selección de calidad de fibra	12
1.6.1.2.	Apertura y Batido	13
1.6.1.3.	Lavado	14
1.6.1.4.	Secado.....	14
1.6.1.5.	Cardado.....	15
1.6.1.6.	Peinado	15
1.6.1.7.	Hilado	16
1.7.	Colorantes	16
1.7.1.	Grupo cromóforo	17

1.7.2.	Grupo auxocromo	17
1.8.	Clasificación de los colorantes.....	18
1.8.1.	Colorantes para fibras celulósicas.....	18
1.8.1.1.	Colorantes reactivos	19
1.8.1.2.	Colorantes directos	19
1.8.1.2.1.	Colorantes ácidos	19
1.8.1.2.2.	Colorantes básicos.....	20
1.8.1.3.	Colorantes índigos	20
1.8.1.4.	Colorantes sulfurosos	21
1.8.2.	Colorantes para fibras proteicas.....	21
1.8.2.1.	Colorantes azoicos	21
1.8.2.2.	Colorantes antraquinónicos	24
1.8.2.3.	Colorantes de triarilmetano	24
1.8.2.4.	Colorantes de ftalocianina	24
1.8.3.	Colorantes para fibras sintéticas	24
1.8.3.1.	Colorantes dispersos	24
1.9.	Proceso de teñido por agotamiento	24
1.9.1.	Etapas del proceso de teñido de fibras proteicas	25
1.9.1.1.	Disgregación.....	25
1.9.1.2.	Difusión	26
1.9.1.3.	Absorción.....	26
1.9.1.4.	Difusión en la fibra	26
1.9.1.5.	Fijación	27

1.9.2.	Factores que influyen en el proceso de teñido	28
1.9.2.1.	Tiempo de contacto	28
1.9.2.2.	Temperatura.....	28
1.9.2.3.	pH	28
1.9.2.4.	Relación de baño	29
1.9.2.5.	Mordentado.....	29
1.9.2.5.1.	Alumbre.....	30
1.9.2.5.2.	Ácido cítrico.....	30
1.10.	Ultrasonido.....	30
1.10.1.	Ultrasonido para teñido textil.....	30
1.11.	Control de calidad post-teñido: Solidez del color.....	31
1.11.1.	Pruebas de solidez del color.....	32
1.11.1.1.	Solidez al agua	32
1.11.1.2.	Solidez al agua caliente	32
1.11.1.3.	Solidez al agua de mar	32
1.11.1.4.	Solidez al lavado con jabón.....	32
1.11.1.5.	Solidez al lavado con detergente.....	33
1.11.1.6.	Solidez al manchado con base.....	33
1.11.1.7.	Solidez al manchado con ácido	33
1.11.2.	Evaluación del color	33
1.11.2.1.	Escala de grises	34
1.11.2.2.	Diferencia del color (ΔE) en el sistema CIELAB	35
CAPÍTULO II		37
2.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	37

2.1.	Lugar de ejecución.....	37
2.2.	Materiales.....	37
2.2.1.	Equipos	37
2.2.2.	Material biológico.....	37
2.2.3.	Materiales de laboratorio	37
2.2.4.	Reactivos.....	38
2.3.	Métodos.....	38
2.3.1.	Validación del método analítico para determinar la concentración de colorantes azoicos por espectrofotometría UV-Visible	38
2.3.1.1.	Selección de la longitud de onda de trabajo para cada colorante	38
2.3.1.2.	Preparación de soluciones patrón para cada colorante	39
2.3.1.3.	Obtención de las gráficas de calibración para cada colorante	40
2.3.1.4.	Evaluación de la linealidad del método	40
2.3.1.5.	Determinación del límite de detección y el método de cuantificación.....	41
2.3.2.	Realización del teñido de distintas fibras de alpaca por el método de agotamiento convencional y aplicando el método de ultrasonido.....	41
2.3.2.1.	Acondicionamiento de la muestra textil	41
2.3.2.2.	Preparación del colorante	42
2.3.2.3.	Teñido por agotamiento convencional	42
2.3.2.4.	Aplicación del método de ultrasonido en el teñido de fibras de alpaca	43
2.3.3.	Determinación de la concentración de los colorantes azoicos en los distintos métodos de teñido por espectrofotometría UV-Visible.....	44
2.3.4.	Evaluación y comparación el color de las distintas fibras de alpaca mediante diversas pruebas de solidez del color	44

2.3.4.1.	Solidez del color al agua (ISO 105-E01).....	45
2.3.4.2.	Solidez del color al agua de mar (ISO 105-E02).....	45
2.3.4.3.	Solidez al agua caliente (ISO 105-E08:1994)	45
2.3.4.4.	Solidez del color al lavado con jabón (ISO 105-C10:2006).....	45
2.3.4.5.	Solidez del color al lavado con detergente (AATCC TM 61-2010).....	45
2.3.4.6.	Solidez del color a las manchas de ácidos (Norma ISO 105-E05:2010)....	46
2.3.4.7.	Solidez del color a las manchas de álcalis (Norma ISO 105-E06:2006)....	46
2.3.4.8.	Evaluación del cambio de color a través de imágenes digitales.....	46
2.4.	Operacionalización de las variables.....	47
2.5.	Diseño experimental para determinación de las condiciones óptimas del método de ultrasonido.....	47
2.6.	Análisis estadístico para comparar del método convencional y ultrasonido	49
CAPÍTULO III.....		50
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	50
3.1.	Validación del método analítico para determinar la concentración de colorantes azoicos por espectrofotometría UV-Visible	50
3.1.1.	Selección de la longitud de onda de trabajo para cada colorante	50
3.1.2.	Preparación de soluciones patrón para cada colorante	51
3.1.3.	Obtención de las gráficas de calibración para cada colorante	51
3.1.4.	Evaluación de la linealidad del método	53
3.1.5.	Determinación del límite de detección y el método de cuantificación	55
3.2.	Realización del teñido de distintas fibras de alpaca por el método de agotamiento convencional y aplicando el método de ultrasonido	56
3.2.1.	Acondicionamiento de la muestra textil	56
3.2.2.	Preparación del colorante.....	58

3.2.3. Teñido por agotamiento convencional.....	59
3.2.4. Aplicación del método de ultrasonido en el teñido de fibras de alpaca.....	61
3.3. Determinación de la concentración de los colorantes azoicos en los distintos métodos de teñido por espectrofotometría UV-Visible	62
3.4. Diseño experimental para determinación de las condiciones óptimas del método de ultrasonido.....	65
3.5. Análisis estadístico para comparar del método convencional y ultrasonido	70
3.6. Evaluación y comparación el color de las distintas fibras de alpaca mediante diversas pruebas de solidez del color	73
3.6.1. Evaluación del cambio de color a través de imágenes digitales	74
CONCLUSIONES	82
RECOMENDACIONES.....	84
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
ANEXOS	95

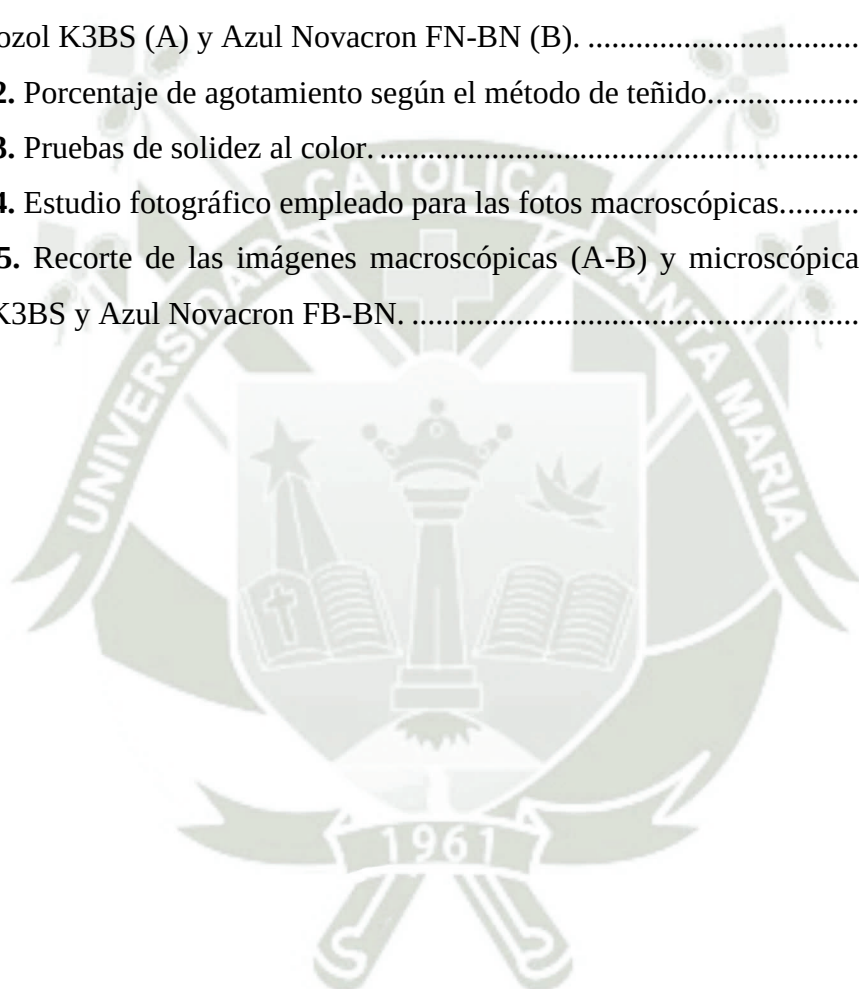
ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación taxonómica de la alpaca.	1
Tabla 2. Composición elemental de la fibra de alpaca.	5
Tabla 3. Clasificación de la fibra de alpaca.	8
Tabla 4. Longitud de diferentes calidades de fibra de alpaca.	8
Tabla 5. Ejemplos de grupos cromóforos.	17
Tabla 6. Ejemplos de grupos auxocromos.	18
Tabla 7. Características de Rojo Synozol K3BS.....	22
Tabla 8. Características de Azul Novacron FN-BN.....	23
Tabla 9. Indicadores de solidez.....	35
Tabla 10. Preparación de soluciones patrón de colorante Rojo Synozol K3BS.	39
Tabla 11. Preparación de soluciones patrón de colorante Azul Novacron FN-BN.	39
Tabla 12. Variables de investigación.	47
Tabla 13. Diseño cribado para determinar condiciones óptimas en el teñido con ultrasonido.	47
Tabla 14. Libro de datos del diseño factorial 3^2	48
Tabla 15. Soluciones patrón de colorante Rojo Synozol K3BS.	51
Tabla 16. Soluciones patrón de colorante Azul Novacron FN-BN.....	52
Tabla 17. Información sobre la ecuación lineal y el coeficiente de correlación para los colorantes.	54
Tabla 18. LOD y LOQ de los colorantes.	56
Tabla 19. Medición de la concentración de la solución madre de teñido de los colorantes. ..	59
Tabla 20. Parámetros para obtener el máximo porcentaje de agotamiento.	68
Tabla 21. Coeficiente de regresión para el porcentaje de agotamiento.	69
Tabla 22. Prueba F y t para la comparación del método convencional y ultrasonido a 80 °C.	71
Tabla 23. Calificación de solidez de acuerdo con el cambio de color ΔE	76
Tabla 24. Resultados de la evaluación macroscópica del grado de solidez del color a las diferentes pruebas.	78
Tabla 25. Prueba t pareado para la comparación del método convencional y ultrasonido a 80 °C.	79

ÍNDICE DE FIGURAS

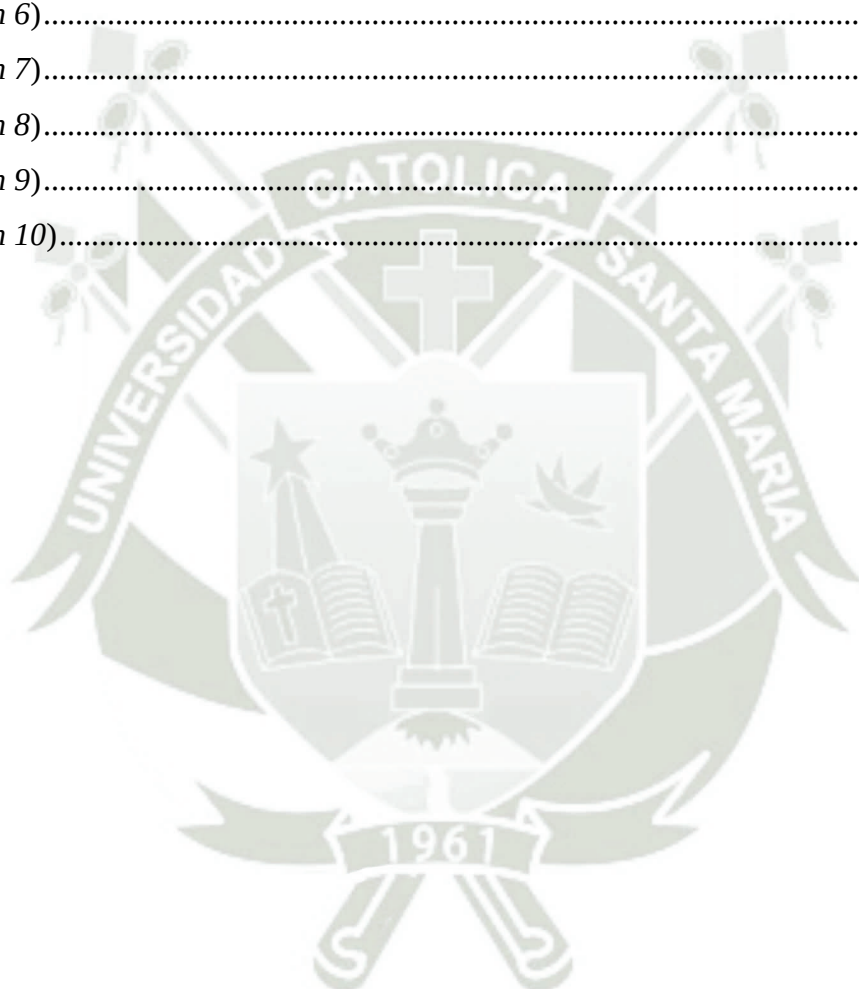
Figura 1. Alpaca Huacaya.....	2
Figura 2. Alpaca Suri.....	3
Figura 3. Concentración geográfica de la producción de fibra de alpaca en Perú.....	4
Figura 4. Vista del corte transversal de una fibra de lana.....	5
Figura 5. Corte esquemático de una fibra de alpaca.....	6
Figura 6. Categorización de las fibras de acuerdo con el tipo de médula.....	7
Figura 7. Esquema general del proceso de teñido: 1. Disgregación, 2. Difusión en el baño, 3. Absorción, 4. Difusión en la fibra, 5. Fijación.....	25
Figura 8. Disgregación de los colorantes.....	26
Figura 9. Migración y penetración del colorante dentro de la fibra.....	27
Figura 10. Estructura del ácido cítrico.....	30
Figura 11. Escala de grises para evaluar el cambio de color.....	34
Figura 12. Diferencia de color entre muestra y un estándar.....	36
Figura 13. Proceso de teñido por agotamiento asistido por ultrasonido.....	44
Figura 14. Barrido espectral de Rojo Synozol K3BS y Azul Novacron FN-BN, respectivamente dentro del rango ultravioleta visible (UV-VIS).....	50
Figura 15. Soluciones patrón de los colorantes.....	51
Figura 16. Grafica de calibración para la determinación de Rojo Synozol K3BS (A) y Azul Novacron FN-BN (B).....	53
Figura 17. Fibras de alpaca: Huarizo (izquierda), Fleece (medio), Baby (derecha).....	56
Figura 18. Esquema del acondicionamiento de las fibras de alpaca.....	57
Figura 19. Lavado y enjuague de fibra de alpaca antes del teñido.....	57
Figura 20. Esquema de la preparación de los colorantes.....	58
Figura 21. Preparación de la solución madre de los colorantes.....	58
Figura 22. Preparación de la solución de teñido para el método convencional.....	59
Figura 23. Teñido convencional de fibra de alpaca.....	60
Figura 24. Producto final del teñido por agotamiento.....	61
Figura 25. Preparación de la solución de teñido para el método con ultrasonido.....	61
Figura 26. Teñido asistido con ultrasonido de fibra de alpaca.....	62
Figura 27. Medición de la absorbancia de la cinética del teñido.....	62

Figura 28. Porcentaje de agotamiento del proceso asistido por ultrasonido (US) a diferentes temperaturas y el proceso convencional (CN). Fibra Baby (A-B), Fleece (C-D) y Huarizo (E-F) teñidas con Rojo Synozol K3BS y Azul Novacron FN-BN.....	64
Figura 29. Gráfica de Pareto de Rojo Synozol K3BS (A) y Azul Novacron FN-BN (B).	66
Figura 30. Gráfica de efectos principales de Rojo Synozol K3BS (A) y Azul Novacron FN-BN (B).....	67
Figura 31. Gráfico de contorno de la superficie de respuesta estimada para el agotamiento de Rojo Synozol K3BS (A) y Azul Novacron FN-BN (B).	68
Figura 32. Porcentaje de agotamiento según el método de teñido.....	73
Figura 33. Pruebas de solidez al color.	74
Figura 34. Estudio fotográfico empleado para las fotos macroscópicas.....	75
Figura 35. Recorte de las imágenes macroscópicas (A-B) y microscópicas (C-D) de Rojo Synozol K3BS y Azul Novacron FB-BN.	77



ÍNDICE DE ECUACIONES

(Ecuación 1).....	40
(Ecuación 2).....	40
(Ecuación 3).....	40
(Ecuación 4).....	40
(Ecuación 5).....	41
(Ecuación 6).....	41
(Ecuación 7).....	41
(Ecuación 8).....	49
(Ecuación 9).....	49
(Ecuación 10).....	49



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Concentración residual de los colorantes en el teñido de fibra de alpaca Baby.	95
Anexo 2. Concentración residual de los colorantes en el teñido de fibra de alpaca Fleece. ...	97
Anexo 3. Concentración residual de los colorantes en el teñido de fibra de alpaca Huarizo..	99
Anexo 4. Coordenadas $L^*a^*b^*$ para la evaluación macroscópica de la fibra de alpaca Baby.	101
Anexo 5. Coordenadas $L^*a^*b^*$ para la evaluación macroscópica de la fibra de alpaca Fleece.	107
Anexo 6. Coordenadas $L^*a^*b^*$ para la evaluación macroscópica de la fibra de alpaca Huarizo.	113
Anexo 7. Coordenadas $L^*a^*b^*$ para la evaluación microscópica de la fibra de alpaca Baby...	119
Anexo 8. Coordenadas $L^*a^*b^*$ para la evaluación microscópica de la fibra de alpaca Fleece.	125
Anexo 9. Coordenadas $L^*a^*b^*$ para la evaluación microscópica de la fibra de alpaca Huarizo.	131
Anexo 10. Resultados de la evaluación microscópica del grado de solidez del color a las diferentes pruebas.	137

INTRODUCCIÓN

La industria textil enfrenta el desafío de desarrollar métodos de teñido más eficientes y sostenibles para cumplir con las demandas actuales de producción responsable. El teñido textil es una de las industrias más contaminantes debido a la cantidad y composición de sus residuos¹. Además del consumo de grandes volúmenes de agua, energía y sustancias como sales, electrolitos, ácidos, bases, agentes niveladores, agentes penetrantes y agentes dispersantes que impactan el medio ambiente y la salud^{2,3}.

Los colorantes azoicos tienen propiedades ácidas y se utilizan para teñir fibras de poliamida y fibras proteicas⁴. Estos colorantes también pueden degradarse fácilmente mediante fotocátálisis.

El teñido convencional en Cusco tiene una larga historia y desempeña un papel importante en la cultura y economía local. Los artesanos de la región utilizan técnicas ancestrales y conocimientos transmitidos de generación en generación para lograr colores vibrantes y duraderos en prendas de alpaca⁵.

La fibra de alpaca, debido a sus características únicas, se ha utilizado ampliamente en la industria textil para producir prendas de alta calidad. El teñido de la fibra de alpaca es un proceso fundamental para agregar valor estético y comercial a estos productos⁶. En particular, el teñido de fibras naturales, como la fibra de alpaca, requiere enfoques innovadores que minimicen el impacto ambiental sin comprometer la calidad del color aplicado. Por lo tanto, es importante encontrar métodos que ayuden a reducir estos agentes en la etapa de teñido⁷.

En la fabricación textil actual, se informa cada vez más que la energía ultrasónica puede acelerar reacciones químicas y físicas mediante el fenómeno de cavitación⁸. El uso de ultrasonido permite una transferencia de masa relativamente rápida y uniforme (el objetivo principal en el proceso de teñido textil) que de otra manera se podría lograr a temperaturas más altas, tiempos de procesamiento más largos y/o mayor consumo de auxiliares químicos⁹. En

este contexto, el uso de ultrasonido puede ayudar a mejorar la eficiencia del proceso de teñido, reduciendo la necesidad de productos químicos agresivos y disminuyendo el consumo de recursos, sin comprometer la calidad y autenticidad de los colores obtenidos ¹⁰.

Por otro lado, los estudios reportan ahorros de energía, procesos más respetuosos con el medio ambiente y también una producción mayor del rendimiento de color en comparación con las técnicas de teñido convencionales ^{9, 11}. Sustratos textiles teñidos asistidos por ultrasonido incluyen yute, bambú, lyocell, fibras de lino, poliéster, pelo de cabra, nylon, lana de oveja, telas acrílicas, seda, algodón y acetato de celulosa ^{8-10, 12-20} con una variedad de colorantes textiles que incluyen colorantes reactivos, colorantes dispersos, colorantes naturales y colorantes básicos ^{8, 16, 20}.

El objetivo principal de este estudio es evaluar la efectividad del ultrasonido como un método alternativo en el teñido de fibra de alpaca con colorantes azoicos, considerando las especificidades del teñido convencional en Perú. Se realizarán experimentos en los que se aplicará ultrasonido durante diferentes etapas del proceso de teñido, teniendo en cuenta los conocimientos y técnicas tradicionales utilizadas por los artesanos locales. Los resultados de este estudio proporcionarán una evaluación integral de la aplicación del ultrasonido como método alternativo en el teñido de fibra de alpaca con colorantes azoicos, considerando las particularidades del teñido convencional en Cusco. Estos hallazgos contribuirán al conocimiento existente en el campo del teñido textil, permitiendo el desarrollo de enfoques más sostenibles y eficientes en la producción de prendas de alpaca respetando las tradiciones locales y las técnicas convencionales.

HIPÓTESIS

Dado que existen investigaciones en donde aplican ultrasonido para diversos procesos industriales textiles, es probable que dicho método aplicado a fibras de alpaca pueda reemplazar al proceso convencional que actualmente utilizan las empresas textiles en Perú.



OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar y determinar colorantes azoicos mediante la aplicación de ultrasonido como método alternativo en el teñido de distintas fibras de alpaca.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Validar el método analítico para determinar la concentración de colorantes azoicos por espectrofotometría UV-Visible
2. Realizar el teñido de distintas fibras de alpaca por el método de agotamiento convencional y aplicando el método de ultrasonido
3. Determinar la concentración de los colorantes azoicos en los distintos métodos de teñido por espectrofotometría UV-Visible
4. Evaluar y comparar el color de las distintas fibras de alpaca mediante diversas pruebas de solidez del color.

CAPÍTULO I:

1. MARCO TEÓRICO

1.1. 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 ²¹. A continuación, la Tabla 1 presenta la información taxonómica de la *Vicugna pacos* (Alpaca doméstica).

Tabla 1. Clasificación taxonómica de la alpaca.

Reino	Animalia
Filo	Chordata
Subfilo	Vertebrata
Clase	Mammalia
Orden	Artiodactyla
Suborden	Tylopoda
Familia	Camélidos
Tribu	Lamini
Género	<i>Vicugna</i>
Especie	<i>Vicugna pacos</i>

Nota: Extraído de ²¹

Existen dos razas de alpaca; Suri y Huacaya; de las cuales el 92.3 % de la población alpaquera es de raza Huacaya y 7.7 % de raza Suri ²². Las dos razas presentan fibras con pigmentación natural (blanco, negro y castaño), siendo la fibra blanca la más preciada con mayor proporción (aproximadamente el 30%) ²³.

Burga y Chavez²⁴ afirmaron que debido a la demanda del mercado universal, las entidades compradoras exigieron más fibra Huacaya y color blanco, prestaron menos atención a la fibra Suri ya que es muy difícil de teñir e incluso menos atención a todos los colores de fibra restantes.

Choque y colaboradores²⁵ también afirman que dado el alto valor de la fibra de alpaca y la gran demanda de fibra de Huacaya y de color blanco, es lógico suponer que las distorsiones de la

cría durante las eras de la conquista de América, la época del virreinato y los inicios de la república alteraron la genética de la alpaca. En las provincias con mayor población de alpacas (Puno, Cusco y Arequipa), tanto la Cordillera Oriental como la Occidental muestran buena calidad de fibra y una tendencia hacia el blanco.

La cría de alpacas en el sector ganadero es una de las actividades más importantes económicamente que se desarrolla en la población andina que vive a más de 4000 m.s.n.m y que además tiene un alto nivel de pobreza ²⁶.

1.1.1. Alpaca Huacaya

Como lo describieron Hoffman y Fowler²⁷, la alpaca Huacaya representa el 90% del vellón de alpaca procesado en Perú. Se caracteriza por presentar fibras cortas y rizadas (aproximadamente 24 – 29.9 μm) ²⁸. A primera vista la apariencia morfológica de la alpaca Huacaya es corpulenta, robusta y con vellones largos y esponjosos que recubren todo el cuerpo, el vellón conformado con fibras más cortas y con una apariencia esponjosa ²³ (Figura 1).



Figura 1. Alpaca Huacaya.

Nota: Extraído de ⁶

Debido a que las mechas se mantienen perpendiculares al cuerpo se generan los rizos, la presencia de ondulaciones, no manifiesta un carácter fuerte porque la luz no cubre a lo largo de la fibra uniformemente debido a las ondulaciones ²⁹.

1.1.2. Alpaca Suri

Se caracteriza por ser sensible al medio ambiente donde vive por eso las fibras de alpaca Suri representan fibras más largas, finas y suaves ²⁶. La apariencia física de este animal es refinada, estilizada y finamente estampada con líneas angulares. Su lomo está cubierto por un vellón que cae a ambos lados de su cuerpo, dejando al descubierto la columna vertebral (Figura 2). Fenotípicamente, Suri presenta mayor dominancia sobre Huacaya ³⁰.



Figura 2. Alpaca Suri.

Nota: Extraído de ³¹

1.2. Fibra

Como lo describieron Pineda Serna y Jara ³², los filamentos atados que se encuentran en hilos y telas se conocen como fibras y se pueden clasificar en minerales, artificiales, vegetales o animales. La fibra puede ser 500 a 1000 veces más largo en términos de longitud a diámetro, incluyendo su suavidad, tamaño y flexibilidad, esto lo hace increíblemente útil. Las primeras fibras utilizadas en la historia de los textiles fueron proporcionadas por la propia naturaleza, pero a pesar de unas 500 especies, muy pocas tienen un uso industrial práctico.

En la naturaleza, las fibras discontinuas se definen como fibras de longitud finita, como 1 mm para la fibra de asbesto y 350 mm para ciertos tipos de lana. Las fibras de longitud infinita se pueden producir químicamente, de forma similar a los hilos producidos en los capullos de gusanos de seda; estos filamentos se pueden cortar para parecerse a las fibras naturales.

1.3. Fibra de alpaca

Sus colores naturales son una alternativa natural a las fibras teñidas ³³. Los fabricantes de textiles pagan por encima del precio regular por la fibra de alpaca blanca o sin teñir, pero la teñida tiene un gran descuento. Las fibras blancas ofrecen flexibilidad de color a los procesadores y consumidores, mientras que las fibras pigmentadas oscuras limitan el teñido a tonos claros o neutros ³⁴. El blanqueo es una posible solución para aclarar los colores, de modo que se puedan hacer telas coloridas a partir de estas fibras de alpaca marrón.

Su textura, calidez, resistencia, hipoalergenicidad, ligereza y suavidad, son características que la hacen pertenecer a las fibras de lujo, junto al cashmere y mohair ³⁵.

Perú es el principal productor de fibra de alpaca, ³⁶ le sigue Bolivia, Chile, Nueva Zelanda, Australia y América del Norte ³⁴. De acuerdo con el IV Censo Nacional Agropecuario 3.685.500 alpacas se concentraban en Puno, Cuzco y Arequipa ³⁷ (Figura 3).



Figura 3. Concentración geográfica de la producción de fibra de alpaca en Perú.

Nota: Extraído de ³⁸

1.4. Composición de la fibra de alpaca

El análisis elemental determina su composición CHONS (Tabla 2). El azufre es necesario para sintetizar aminoácidos como cistina y metionina, los cuales son fundamentales para la formación de queratina, el componente principal de la fibra de alpaca ³⁹.

Tabla 2. Composición elemental de la fibra de alpaca.

Elemento	%
Carbono	50
Oxígeno	20
Nitrógeno	18
Hidrógeno	7
Azufre	5

Nota: Extraído de ³⁹

Sus estructuras internas incluyen las células cuticulares, células corticales y región medular ⁴⁰,

⁴¹ (Figura 4)

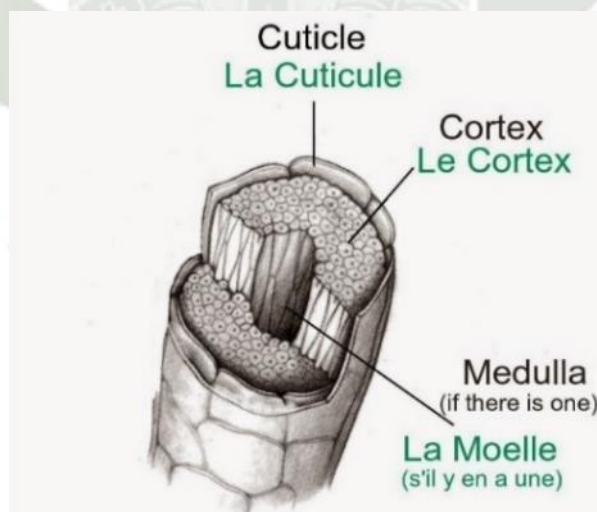


Figura 4. Vista del corte transversal de una fibra de lana.

Nota: Extraído de ⁴²

1.4.1. Cutícula

Las células corticales internas y células cuticulares externas conforman la fibra de alpaca. Hay tres capas subagrupadas de cada cutícula: exocutícula, endocutícula y epicutícula. El mayor

contenido de cistina se encuentra en la exocutícula. La reticulación del ácido de cistina en la exocutícula protege la fibra y reduce la penetración del colorante en la célula cortical. Las células endocuticulares son más susceptibles al ataque químico por el bajo contenido de cistina y son digeribles por enzimas. Las células de la epicutícula tienen una membrana hidrofóbica delgada, la cual es relativamente inerte químicamente. Esta membrana resistente es la última parte de la fibra a disolver durante el tratamiento con reactivos como ácidos, álcalis, enzimas proteolíticas y agentes reductores u oxidantes ³⁴.

1.4.2. Corteza

La corteza está formada por queratina que contiene células en forma de fibrillas y restos citoplasmáticos y nucleares rodeados por un complejo de membrana celular. La queratina se agrega en macrofibrillas y dentro de estas está presente un complejo de microfibrillas-matriz. Las microfibrillas están formadas por proteínas en una configuración de hélice alfa rodeadas por una matriz amorfa rica en cistina ⁴³.

Las células corticales constituyen el 90 % de la fibra y confiere sus propiedades como durabilidad, buena elasticidad y capacidad de retención del calor ³⁹. Su división en orto-córtex (de pocos residuos nucleares) y para-cortex (de grandes residuos nucleares) (Figura 5), le confiere ondulación natural de la fibra ⁴⁴.

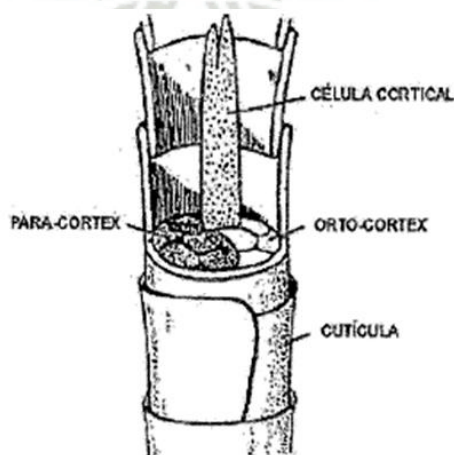


Figura 5. Corte esquemático de una fibra de alpaca.

Nota: Extraído de ³⁹

1.4.3. Médula

La medulación se genera por la queratinización de las células corticales provocando un espacio lleno de aire. Las fibras se clasifican según la médula como completa, fraccionada y sin médula

⁴² (Figura 6). Este fenómeno suele ser más frecuente en fibras gruesas ³⁹.

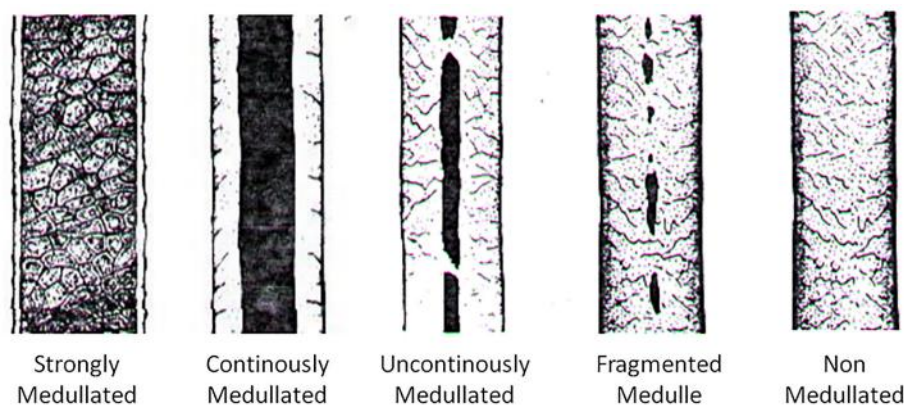


Figura 6. Categorización de las fibras de acuerdo con el tipo de médula.

Nota: Extraído de ⁴¹

1.5. Propiedades de la fibra de alpaca

1.5.1. Propiedades físicas

1.5.1.1. Finura

La fibra de alpaca está caracterizada por ser una de las fibras que presenta más finura en el mundo. De acuerdo con la Norma Técnica Peruana 2014:231.301 la fibra de alpaca se clasifica en función a su finura y longitud de mecha promedio mínima que va desde ~20 μm (Baby) hasta la máxima ~31 μm (Huarizo) ⁴⁴.

La norma establece que aproximadamente el 20% de la producción de fibra corresponde a alpaca Huarizo, que es una fibra más gruesa con un diámetro de 18 a 23 μm . El 46% corresponde a fibra de alpaca Medium Fleece, que es semifina con un diámetro de 26,5 a 29 μm . El 22% corresponde a fibra de alpaca Fleece, que es fina con un diámetro de 23 a 26,5 μm y por último, solo el 12% está compuesto por fibra Baby, que es extrafina con un diámetro menor a 23,1 μm) ²⁶.

A continuación, la Tabla 3 presenta los diámetros de la fibra para su clasificación.

Tabla 3. Clasificación de la fibra de alpaca.

Clasificación	Diámetro (μm)
Baby	18 – 23
Fleece	23 – 26,5
Medium Fleece	26,5 – 29
Huarizo	29 – 31,5
Gruesa	> 31,5

Nota: Extraído de ²⁶

1.5.1.2. Longitud

Al igual que la finura es una propiedad de gran relevancia, ya que influye en las cualidades de fabricación del material textil ^{45, 46}, la longitud desempeña un papel crucial en términos de límite de hilado y propiedades mecánicas de los productos manufacturados, como el hilo y la tela. Cuanto más larga sea la fibra, más finos y robustos serán los hilos fabricados a partir de dicho material. La longitud varía desde los 7 cm a los 28 cm en alpaca Suri ³⁹. Las fibras ubicadas en la línea media y superior presentan las mayores longitudes, mientras que las fibras en la zona interior de las extremidades y el cuello tienen longitudes más cortas.

A continuación, la Tabla 4 presenta las longitudes de vellón en la fibra de alpaca.

Tabla 4. Longitud de diferentes calidades de fibra de alpaca.

Clasificación	Longitud (mm)
Baby Alpaca	65
Fleece	70
Medium Fleece	70
Huarizo	70
Gruesa	70

Nota: Extraído de ⁴⁷

1.5.1.3. Lustre o Brillo

Las fibras blancas deben presentar lustra o brillo como signo de un normal crecimiento ⁴⁶. Este rasgo varía según la raza; Huacaya es de brillo plateado similar a la lana mediana, en contraste con Suri, que tiene un brillo dorado. Esta propiedad es el resultado de luz refractada en la cutícula ⁴⁸.

1.5.1.4. Higroscopia

Propiedad de absorber y retener vapor de agua. La Huacaya es más higroscópica que la Suri ⁴⁶, ⁴⁹.

1.5.1.5. Suavidad

La fibra es suave al tacto ³¹, una correcta alimentación y cuidado en la limpieza de la alpaca será necesaria para esta característica ⁴⁶.

1.5.1.6. Resistencia

Esta fuerza se refiere a la capacidad de una fibra para resistir tirones y roturas cuando se aplica una fuerza específica ⁵⁰, se mide generalmente en decitex ³⁹. La resistencia en la fibra es mayor en las alpacas de tipo Huacaya que en la fibra de las alpacas Suri ⁴⁸.

1.5.1.7. Rizo y ondulación

Es una característica que se basa en estrategias de selección y mejora del rebaño. El diámetro de la fibra se encuentra vinculado a las fibras rizadas, y estas presentan propiedades de fibra superiores en comparación con las fibras no rizadas, gracias a su elasticidad y capacidad de torsión hilado ⁴⁶.

1.5.1.8. Rendimiento al lavado

Se refiere al porcentaje de peso seco de la fibra obtenido después de eliminar las impurezas y lavarla, en comparación con el peso seco bruto inicial de la fibra esquilada ⁴⁶.

1.5.1.9. Elasticidad

La elasticidad o elongación de una fibra es la longitud máxima que una fibra puede estirar o alargar cuando se aplica una fuerza específica y luego esta vuelve a su estado original. La elasticidad en la fibra suele ser mayor en las alpacas Suri que en la fibra de las alpacas Huacaya⁵⁰.

1.5.1.10. Conductividad térmica

Es la propiedad para retener el calor y por la que las personas sienten calor cuando usan ropa hecha con hilo de alpaca. Esto se debe a la medulación dentro de las fibras y la presencia de microsacos de aire, que actúan como un excelente aislante y hacen que la prenda sea más liviana⁵⁰.

1.5.2. Propiedades Químicas

1.5.2.1. Acción del agua sobre la fibra

La fibra de alpaca exhibe enlaces de hidrógeno, así como enlaces iónicos entre los grupos carboxilo (COO^-) y amino (NH_3^+) de los aminoácidos en las cadenas laterales. Estos enlaces desempeñan un papel crucial en la estabilización de la estructura de la queratina en su estado seco. Sin embargo, cuando la queratina absorbe agua (hasta un 34% de su peso seco), estos enlaces se rompen⁵¹.

En entornos acuosos, las fibras son más propensas a sufrir daño químico debido a la capacidad de las cadenas de proteínas para ionizarse y atraer moléculas ácidas y alcalinas de menor tamaño. La alcalinidad es más perjudicial para las fibras que las condiciones de acidez. La lana bien lavada tiene un pH de 9-10 para extractos acuosos en medios ligeramente alcalinos, y las temperaturas no suelen superar los 50 °C, por lo que no se producen cambios significativos en las fibras durante este proceso⁵².

1.5.2.2. Acción de los álcalis sobre la fibra

La fibra de alpaca muestra una alta afinidad hacia los álcalis, los cuales pueden hidrolizar la queratina y romper los enlaces polipeptídicos presentes en la fibra ⁵³. El grado de degradación está directamente relacionado con la concentración de iones OH^- presentes ⁵⁴. Cuando se utilizan álcalis fuertes, como el hidróxido de sodio, la fibra experimenta una degradación completa, este proceso conlleva una disminución en la resistencia de la fibra, un cambio de color hacia tonalidades amarillentas y una textura más áspera, lo que resulta en una depreciación de su calidad comercial ³⁹. Por ello, es importante tener en cuenta este parámetro en los análisis a la fibra de alpaca.

1.5.2.3. Acción de los ácidos sobre la fibra

La fibra de alpaca no se ve afectada por ácidos diluidos, incluyendo ácidos orgánicos volátiles como el fórmico y el acético. Sin embargo, los ácidos concentrados como el sulfúrico, clorhídrico y nítrico pueden dañar la estructura de la fibra de alpaca ^{49, 54}.

1.5.2.4. Acción de las sales metálicas sobre la fibra

Las sales metálicas en solución pueden ocasionar la formación de sales básicas, como el sulfato de aluminio, sulfato ferroso y sulfato de cromo, cuando entran en contacto con las fibras proteicas. Estas sales se descomponen a la temperatura de ebullición para formar hidróxidos metálicos y sales básicas que impregnan los poros de las fibras y quedan libres en la solución de ácido mineral ⁵¹.

1.5.2.5. Acción de suavizantes y parafinado sobre la fibra

Es de importancia considerar la acción de suavizantes, ya que el contenido de aceite del parafinado puede impedir la difusión del colorante e impedir o impedir el bobinado y teñido del hilo, como también considerar el suavizado ya que debido a su naturaleza higroscópica y lubricante, estas fibras facilitan el deslizamiento suave de la fibra dentro de la estructura del hilo, pudiendo deformar y arrugar la fibra ⁵⁵.

1.5.3. Propiedades Biológicas

Como menciona Manso⁵⁶ las propiedades biológicas pueden ser afectadas tanto por microorganismos como por insectos. Aunque las fibras de alpaca son generalmente resistentes al ataque bacteriano y al daño causado por los insectos, a veces pueden aparecer manchas en los tejidos. Para prevenir esto, se recomienda el uso de productos químicos específicos. Además, estos productos ayudan a evitar la emisión de olores desagradables debido a la exudación de ceras naturales en las prendas ⁵⁴.

1.5.4. Reacción al calor

Las fibras de proteína no se dañan incluso a temperaturas de ebullición y, en condiciones normales, las propiedades originales de las fibras se restauran rápidamente. A una temperatura de 130 °C, se descompone desprendiendo vapores de amoníaco y adquiere una tonalidad amarillenta. A una temperatura de 170 °C libera vapores de azufre ya 300 °C se carboniza ⁵⁴.

1.6. Procesos de industrialización de la fibra de alpaca

1.6.1. Proceso de hilado

Según Adot⁵⁷ el hilado es la agrupación de una masa de fibras las cuales forman una estructura cilíndrica que se caracteriza por presentar bastante longitud. Estas fibras varían en grosor, pudiendo ser más gruesas o delgadas, sienten determinado por el título del hilado. El proceso de hilado yace en el período Neolítico, entre 7000 y 2000 a.C., donde se desarrolló el conocimiento técnico de hilado y tejido ⁴³.

Para realizar el hilado se consideran previamente las siguientes etapas:

1.6.1.1. Selección de calidad de fibra

Primero se realiza un método de recolección de la fibra en centros de acopio directamente desde las organizaciones alpaqueras para su posterior clasificación de acuerdo con el diámetro, longitud, color ^{39, 54}.

Las prendas hechas con fibras de menor diámetro son altamente confortables en comparación con aquellas fabricadas con fibras que superan los 30 μm , porque los extremos de las fibras sobresalen de la superficie del hilo. Son relativamente gruesos, pero cuanto más flexibles son estos hilos, menos probable es que causen picazón ²².

Para la selección, el vellón se divide en varias calidades. Las áreas dorsales y laterales del animal albergan fibras de excelente calidad y de diámetro reducido. Las fibras más gruesas son las de menor calidad, por otro lado, se concentran principalmente en el pecho, las extremidades y la cara ³⁹. Las características de la fibra de alpaca pueden variar en función de la raza, la edad, la alimentación y el manejo a los que se haya sometido. Para determinar la calidad de una prenda se evalúa la fibra en función del número y la longitud de las fibras, sin que esto implique su durabilidad. Fibras de cualquier longitud y diámetro pueden ser igualmente resistentes y duraderas ⁵⁸.

Por otro lado, la distribución interna de ambas variedades de fibra de alpaca se realiza mediante un sistema de recolección o recepción de la fibra, de acuerdo con la gestión establecida. Los pequeños productores son reclutados a través de intermediarios y sufren un exceso de intermediación. Esto se refleja finalmente en la mala calidad de los productos que llegan a los centros de clasificación de las instalaciones industriales ⁵⁹.

También, Illa y Tairo³⁹ en su investigación tomaron en cuenta la categorización por grupos de calidad como criterio de selección de fibras a teñir: Por finura, longitud y color.

1.6.1.2. Apertura y Batido

El batido se realiza en el batidor y El objetivo es minimizar la presencia de impurezas orgánicas no relacionadas con proteínas en las fibras, evitando su contaminación. Este tipo de equipo también crea un grado de apertura, pero ese no es el objetivo principal ⁵⁷. Se recomienda secar previamente la tela para eliminar la mayor cantidad posible de material que no sea fibra.

1.6.1.3. Lavado

El lavado permite limpiar impurezas como tierra, polvo y grasa ³⁹. Las fibras se pasan primero a través de una tarjeta de apertura para eliminar la suciedad y luego se pasan por un tamiz para su eliminación. Luego, la tela limpia se coloca en la tina de una lavadora, se utiliza una solución de detergente y agua a una temperatura de 60 °C. y pH 8 – 8.5 , se guía y se mantiene entre las tinas mediante rodillos exprimidores y se lava, permitiendo eliminar los últimos restos de suciedad y grasa, dejando atrás las fibras ⁶⁰. En procesos industriales, el lavadero consta de cinco baños de lavado, una abridora con dos cilindros empujadores, un cargador y un secadero ⁵⁷.

Para lavar las fibras de alpaca se utiliza la misma lavadora que se utiliza para lavar la lana, pero se deben ajustar las concentraciones de jabones industriales debido a la baja cantidad de grasa presente en las fibras de alpaca ⁴⁸.

Una vez que las fibras han sido lavadas, las impurezas y el nivel de fieltro dentro de ellas pueden causar roturas y afectar la eficiencia de las etapas de procesamiento posteriores. Esto es relevante durante el proceso de cardado, donde se busca minimizar el daño a la fibra. Por esta razón, en los procesos de lavado se toman medidas para evitar cualquier daño significativo durante el cardado ⁶¹.

1.6.1.4. Secado

Luego del lavado, se procede con el secado, el secado es otro proceso costoso ya que requiere mucha energía. La tela seca va a una habitación donde reposa por lo menos 10 horas. Después del descanso, se agrega lubricante a las fibras. Los líquidos antiestáticos evitan que la estática afecte negativamente las propiedades de procesamiento ⁴⁸.

Los métodos más comunes para el secado es el secado al medio ambiente, que consiste en exponer las fibras al sol y el secado con aire caliente, que es empleado a escalas mayores donde se usa niquelinas o quemadores ³⁹.

1.6.1.5. Cardado

El cardado es el proceso de tirar repetidamente de una fibra rápidamente, de modo que si la fibra se recupera rápidamente del tirón, puede resistir el próximo tirón ⁵⁷.

Los principales objetivos del cardado de la fibra de alpaca son:

- Separar cada fibra individualmente, estas se arreglan para su paralelización y entrega de una manera uniforme, posteriormente se realiza el peinado para conseguir la uniformidad en su totalidad ⁶²,
- eliminar mecánicamente la mayoría de las impurezas (como rebabas y otras materias vegetales) que pueden afectar la apariencia final del hilo y
- “formar una cinta en forma de cuerda de peso y grosor definidos” ³⁴.

Después de eliminar las impurezas, comienza el proceso de cardado real. En este proceso, la cuajada se abre y las fibras se agrupan en pacas y se extraen en forma de tiras al pasar por la máquina de cardado. Este proceso produce un producto llamado Sliver y un subproducto conocido como bajo carda. Durante el cardado, se produce una pérdida promedio de fibra entre 4 – 7 % ⁶³.

1.6.1.6. Peinado

Para producir el hilo de alpaca de alta calidad requerido para el comercio de hilo peinado, el material fibroso debe tener ciertas características, como la ausencia de fibras muy cortas (menos de 15 mm) y sin impurezas como nudos o materia vegetal. Es necesario un proceso de cardado para obtener una cinta con las propiedades requeridas para la producción de hilo peinado ⁵⁷. El objetivo principal del peinado debe ser:

- Eliminar fibras cortas, fibras muy enredadas, como neps y desechos residuales ³⁴ y
- disponer las restantes fibras largas más o menos paralelas y al mismo tiempo combinarlas en cinta continua. Esta cinta es muy importante para la producción de hilos peinados finos y resistentes ³⁴.

1.6.1.7. Hilado

La hilatura se conoce como el giro de una vuelta que se convierte en una masa de fibras y permite dar resistencia al hilo. Esto tiene que hacerse hasta cierto punto, ya que torcer demasiado endurecerá el hilo y desafilará la prenda. La dirección del hilo afectará la textura de la tela ⁶⁴.

En este proceso, se elaboran hilos de diferentes calidades, colores y tipos. Los tops se preparan para someterse a una serie de máquinas continuas que tienen el propósito de dar fuerza y resistencia al top y que se presentan en conos de unos 73 kg de peso ^{26, 57}.

Los tops preparadas y colocadas correctamente pasan por una máquina llamada continua donde son especialmente estiradas y torcidas para obtener finalmente un hilo de bobina. El propósito del hilado es lograr la resistencia, tenacidad y grosor requeridos para un hilo en particular ⁵⁷.

1.7. Colorantes

Un colorante es la sustancia que modifica el color original de una fibra mediante penetración y difusión uniforme ⁶⁵. A fin de que un colorante sea eficaz, es necesario que se adhiera de manera sólida a la fibra y que mantenga su color intacto a pesar del lavado o la exposición a la luz ⁶⁶.

Son solubles en medio ácido y básico, debido a su inestabilidad electrónica, estos compuestos son capaces de absorber energía a una longitud de onda dada ³⁹.

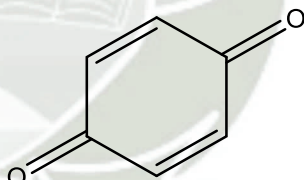
La estructura química de un colorante requiere la presencia de dos grupos funcionales para su funcionamiento adecuado. Los cromóforos se encargan de la absorción de la luz y los auxocromóforos se encargan del anclaje al sustrato a colorear, en otras palabras, es capaz de asegurar la fijación de la molécula del colorante. ⁵⁸. Existen por lo menos dos grupos presentes en la absorción de luz: el grupo cromóforo y el grupo auxocromo ³⁹.

1.7.1. Grupo cromóforo

Responsable de la absorción de luz, y son los grupos que se encuentran en dicho sistema los que generan el color. La presencia de más de un grupo es necesaria para que el color sea perceptible, y a medida que aumenta el número de estos grupos, la intensidad del color se incrementa ⁶⁷. Todos ellos son compuestos con electrones que resuenan a cierta frecuencia, por lo que absorben y repelen la luz, lo que combinado con anillos insaturados (como el benceno o el antraceno) aumentan la captación de radiación, pero estos compuestos resultantes aún no se consideran colorantes propiamente dichos. Para que sean considerados colorantes, es necesario que contengan grupos auxocrómicos en sus moléculas. Estos grupos auxocrómicos son responsables de la fijación del colorante al sustrato teñido, pudiendo unirse a la molécula del colorante y, en algunos casos, potenciando la función de los cromóforos ⁶⁸.

En la Tabla 5 se presentan algunos ejemplos de grupos cromóforos.

Tabla 5. Ejemplos de grupos cromóforos.

Grupo	Estructura
Quinona	
Azo	$N=N$
Nitroso	$N=O$
Compuestos nitrosos	$O-N=O$
Doble enlace carbono	$C=C$
Aldehídos, cetonas	$C=O$

Nota: Extraído de ⁶⁷

1.7.2. Grupo auxocromo

Son grupos de átomos cargados positivamente o radicales libres que tienen la propiedad de potenciar el efecto de los cromóforos dentro de la misma molécula de una sustancia, dando una

intensificación en el color. Refuerzan la acción de un cromóforo actuando de fijadores al sustrato cuando se tiñe. Dependiendo del pH que se use pueden ser catiónicos o aniónicos ⁶⁷.

A continuación, en la Tabla 6 se presentan los grupos auxocromos más comunes.

Tabla 6. Ejemplos de grupos auxocromos.

Grupo	Estructura
Sulfónico	-SO ₃ H
Carboxílico	-COOH
Hidroxílico	-OH
Acetílico	-COCH ₃
Amínico	-NH, -NHR, -NR ₂

Nota: Extraído de ⁶⁷

1.8. Clasificación de los colorantes

Los colorantes comerciales se pueden clasificar por estructura, color y método de aplicación. A la hora de dar la nomenclatura del sistema de estructura química, existe cierta complejidad, la clasificación basada en la aplicación suele ser beneficiosa ⁶⁹. Según Ghaly y colaboradores ⁷⁰, la industria textil produce y está clasificado en tres tipos de fibras; celulósicas, proteicas y sintéticas. Slama y colaboradores ⁷¹ clasificaron a los colorantes de acuerdo a la naturaleza de la fibra a teñir. En los siguientes puntos se toma la clasificación por el método de aplicación al que están sujetos por el tipo de fibra.

1.8.1. Colorantes para fibras celulósicas

De origen vegetal como el lino, algodón, ramio, rayón, lyocell y cáñamo. Ghaly y colaboradores ⁷⁰ mencionaron algunos de los colorantes utilizados para teñir las fibras de celulosa: los colorantes reactivos (remazol, proción MX y cibacrón F), los colorantes directos (rojo congo, amarillo directo 50 y marrón directo 116), los colorantes naftólicos (amarillo rápido GC, escarlata rápido R y azul rápido B) y los colorantes índigo (blanco índigo, púrpura tirio y carmín índigo).

1.8.1.1. Colorantes reactivos

Los colorantes reactivos son la clase principal de colorantes para fibras de celulosa y funcionan bien con algunas fibras proteicas. Los colorantes reactivos se definían anteriormente como aquellos capaces de formar enlaces covalentes de azufre, oxígeno y nitrógeno con las fibras sobre las que se aplican ⁷⁰.

Se caracterizan por una alta pigmentación, efecto permanente, facilidad de uso en un amplio rango de temperatura y versatilidad por sus grupos reactivos capaces de enlazar con la mayoría de las fibras celulósicas y algunas fibras proteicas ^{72, 73}.

1.8.1.2. Colorantes directos

Son aquellos que tienen grupos polares ($-\text{NH}_3^+$, $-\text{SO}_3^-$, etc.), pueden aplicarse directamente a la solución y adherirse a las fibras mediante interacciones electrostáticas o formación de sales. Los colorantes aniónicos que tienen una afinidad específica por las fibras de celulosa se denominan comúnmente colorantes directos ⁷⁴.

Tienden a permanecer como solubles en lugar de formar enlaces con fibras celulósicas y algunas fibras sintéticas. Se les combina con sales aniónicas como Na_2SO_4 o NaCl para mejorar sus capacidades de unión a telas ⁷⁵.

Una de las ventajas de los colorantes directos es que son los más baratos de entre todos los tipos de colorantes ⁷⁰, en este grupo se encuentran:

1.8.1.2.1. Colorantes ácidos

Son aniónicos, solubles en agua, aplicable a tejidos de nailon, lana, seda y acrílico modificado, tienen un punto isoeléctrico de 4.6, adquieren carga positiva a pH más bajo y liberan aniones y sales del colorante. También se utiliza en papel, cuero, impresión de inyección de tinta, alimentos y cosméticos ⁷³.

Se caracterizan por la presencia de uno o más grupos sulfónicos. La afinidad de los aniones ácidos por la lana depende no solo de la composición química, sino también del tamaño

molecular y del número de grupos de ácido sulfónico $-SO_3H$. Está clasificado según su afinidad con la lana en baños ácidos. Los colorantes ácidos se encuentran entre los colorantes nitro (antralanos), los trifenilmetanos, las pirazolonas, las antraquinonas y los colorantes mono y diazo ¹⁹.

1.8.1.2.2. Colorantes básicos

Se consideran colorantes catiónicos solubles en agua. Cuando se disuelven en agua, forman una sal catiónica coloreada. Estas sales catiónicas reaccionan con la superficie aniónica del sustrato. Estos colorantes son efectivos para fibras acrílicas ⁷⁰.

Se aplica a papel, nailon modificado y poliéster. Estos colorantes ahora se usan en lana, seda y algodón tanino-mordentado cuando el brillo del tono era más importante que la solidez a la luz y al lavado. Las principales clases químicas son oxazinas, tiazinas, cianinas, diazahemicianinas, hemicianinas, triarilmetanos y acridinas. Algunos colorantes básicos son bioactivos y se usan médicamente como conservantes. Los colorantes básicos han demostrado ser colorantes fuertes para fibras acrílicas ⁷³.

Las fibras de celulosa se pueden teñir con colorantes básicos, pero las fibras deben tratarse previamente con una sustancia ácida (taninos) para fijarlas, por lo que los colorantes básicos para algodón se conocen como colorantes de tanino ⁷⁴.

1.8.1.3. Colorantes índigos

Tienen el cromóforo indigoide, son poco solubles en agua. El color índigo o azul oscuro pertenece a la clase de colorantes de tina y no es originalmente soluble en agua, pero se vuelve soluble después de la reducción alcalina ⁷¹.

Tras una reducción alcalina pasan a su forma soluble o también llamada forma *leuco*. El teñido ocurre en esta forma, luego este se oxida con la exposición al aire y regresa a su forma insoluble o también llamada forma *ceto* para asegurar la unión del colorante a la tela. Se utiliza principalmente en el teñido de mezclilla azul ^{76, 77}.

1.8.1.4. Colorantes sulfurosos

Son colorantes poliméricos insolubles en agua que contienen azufre como parte integral del cromóforo o como enlace a la cadena polimérica (-S-S-) ⁷¹.

Son de una clase pequeña pero importante debido a sus excelentes propiedades colorantes, fácil aplicación y bajo costo. Pertenecen a los colorantes del tipo tina; por lo tanto, se usa sulfito de sodio para pasar de su forma *ceto* a su forma *leuco* para teñir ^{78, 79}.

Se utilizan especialmente para fibras de celulosa y se aplican a soluciones en forma reducida que, una vez absorbidas por la fibra, son reoxidadas por el aire u otros agentes oxidantes, quedando adherido el colorante insoluble ⁷⁴.

1.8.2. Colorantes para fibras proteicas

Son consideradas todas las fibras obtenidas de fuentes animales como la seda, cachemira, angora, mohair y lana. Debido a que son sensibles a pH alto, se tiñen con colorantes ácidos solubles en agua y obtienen colorantes insolubles en las fibras ⁸⁰. Una reacción química entre el colorante y la fibra forma una molécula de colorante insoluble dentro de la fibra ⁷⁰.

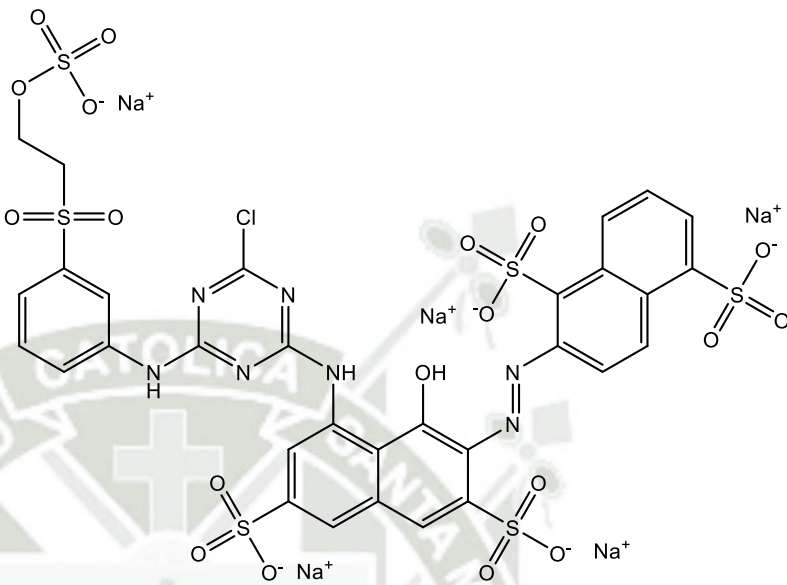
Los colorantes ácidos incluyen los azoicos como el grupo más importante, seguido de colorantes de antraquinona, triarilmetano y ftalocianina ^{81, 82}.

1.8.2.1. Colorantes azoicos

Ocupan 60 – 70 % de los colorantes sintéticos por su versatilidad, efectividad de teñido, fácil uso, alta estabilidad e intensidad de color ^{83, 84}. De estructura cromófora (-N=N-) aseguran su solubilidad al agua y unión a la fibra ^{85, 86}. Pueden ser monoazo, diazo o poliazo dependiendo del número de grupos azo en su estructura. Estos grupos están unidos a compuestos aromáticos o heterocíclicos por un lado y a grupos heterocíclicos insaturados, carboxilos, sulfonilos, o alifatos del otro lado ^{87, 88}.

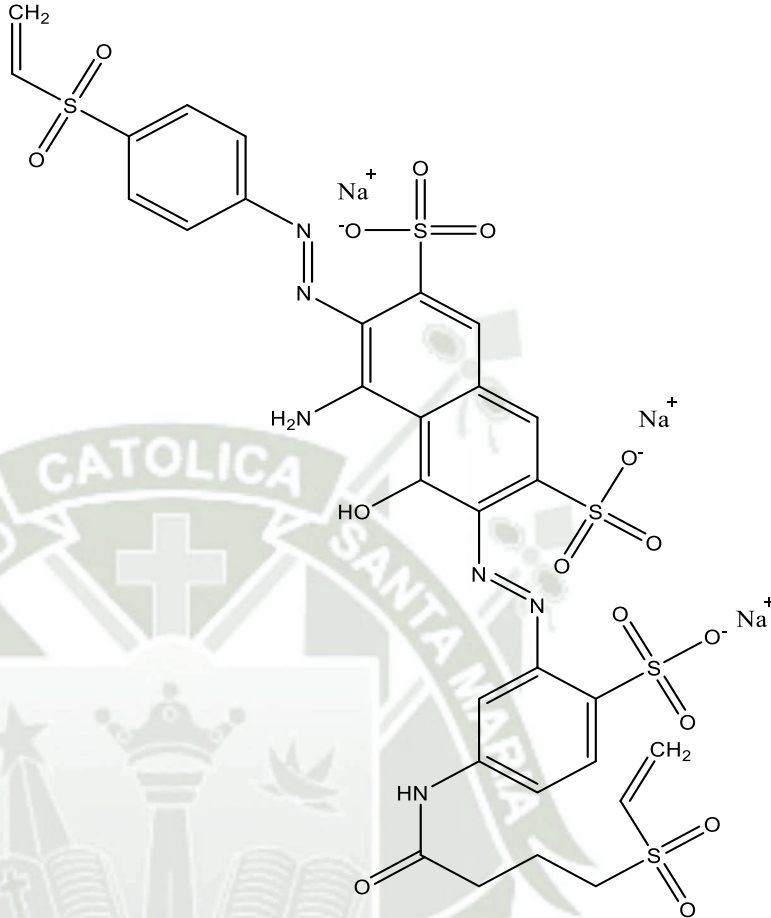
A este grupo pertenecen los colorantes Rojo Synozol K3BS (Tabla 7) y Azul Novacron FN-BN (Tabla 8).

Tabla 7. Características de Rojo Synozol K3BS.

Estructura química	
Estructura molecular	$C_{31}H_{19}ClN_7Na_5O_{19}S_6$
Número de registro CAS	93050-79-4
Nombre Índice de Color (C.I.)	Rojo reactivo 195
Cromóforo	Monoazo
Peso molecular ($g \cdot mol^{-1}$)	1136.31

Nota: Extraído de ⁸⁹

Tabla 8. Características de Azul Novacron FN-BN.

Estructura química	
Estructura molecular	$C_{30}H_{25}N_6Na_3O_{15}S_5$
Número de registro CAS	198153-83-2
Nombre Índice de Color (C.I.)	Azul reactivo 230
Cromóforo	Diazo
Peso molecular ($g \cdot mol^{-1}$)	938.85

Nota: Extraído de ⁹⁰

1.8.2.2. Colorantes antraquinónicos

Esta categoría ha sido ampliamente usada en la industria textil, en colorantes rojos en particular. Solubles en agua, dan colores brillantes y excelentes propiedades de solidez ⁹¹. Su estructura puede unirse a colorantes azoicos ^{92,93}.

1.8.2.3. Colorantes de triarilmetano

Tiñen lana y seda por su solubilidad en agua y amplia e intensa gama de colores. Son indicadores de teñido cuando se forman dos grupos de ácido sulfónico (SO_3H^+) en lugar de un solo grupo auxocromo en su estructura ^{70,94}.

1.8.2.4. Colorantes de ftalocianina

Sintetizados con reacciones entre 1,4-dicianobenceno y átomos metálicos (níquel, cobalto, cobre, etc.) para producir tonos verdes y azules. Sus propiedades incluyen la consistencia del color a la luz, resistencia a la oxidación, solubilidad en agua y estabilidad química ^{95,96}.

1.8.3. Colorantes para fibras sintéticas

Telas de spandex, poliéster, acrílico, poliamida, poliacetato, polipropileno, ingeo y acetato. Como resultado de su amplia gama de aplicaciones, se utilizan en el 60 % de la producción de fibra global. Estas fibras se tiñen con colorantes directos, básicos y dispersos ^{97,98}.

1.8.3.1. Colorantes dispersos

Son los colorantes más pequeños e insolubles en agua, pero de mayor estabilidad a altas temperaturas. Las soluciones de tintura son mezclas de colorantes en polvo y agentes dispersantes ⁹⁹⁻¹⁰¹.

1.9. Proceso de teñido por agotamiento

El teñido es la interacción de la fibra con el medio acuoso del colorante, en el cual tiene lugar una reacción química, en la cual los iones del colorante se difunden en la fibra, pero en las condiciones adecuadas reaccionan y se adhieren, compartiendo con largas moléculas forma nuevos derivados del color mediante la unión de fibra dentro de fibra ³⁹.

El teñido de las fibras textiles con colorantes se realiza en el baño de teñido. Se habla de una buena calidad de teñido cuando la coloración es permanente, es decir, el colorante no se desprende a los agentes que se expone el ser humano. El proceso de teñido se divide en diferentes etapas donde el colorante se difunde en una fase líquida hasta llegar a la fase sólida para llegar a la fibra ¹⁰² como se muestra en la Figura 7.

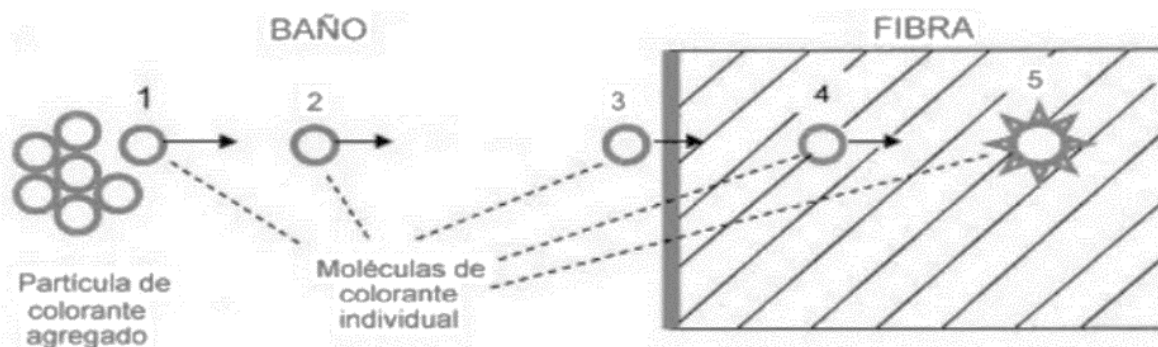


Figura 7. Esquema general del proceso de teñido: 1. Disgregación, 2. Difusión en el baño, 3. Absorción, 4. Difusión en la fibra, 5. Fijación.

Nota: Extraído de ⁴²

1.9.1. Etapas del proceso de teñido de fibras proteicas

1.9.1.1. Disgregación

Las sales por usar y el colorante se encuentran en el líquido en sus formas simples, formando agregados moleculares. Los agregados están sometidos a equilibrios fisicoquímicos específicos que dependen en cada caso de las especies presentes en el sistema ³⁹. Dependiendo del baño, se equilibra en forma de moléculas o micelas (agregados de muchas moléculas altamente solubles) (Figura 8) o finos polvos dispersos (microcristales de moléculas colorantes poco solubles). Cabe recalcar que los colorantes deben ser solubles o dispersables en agua ⁵⁵.

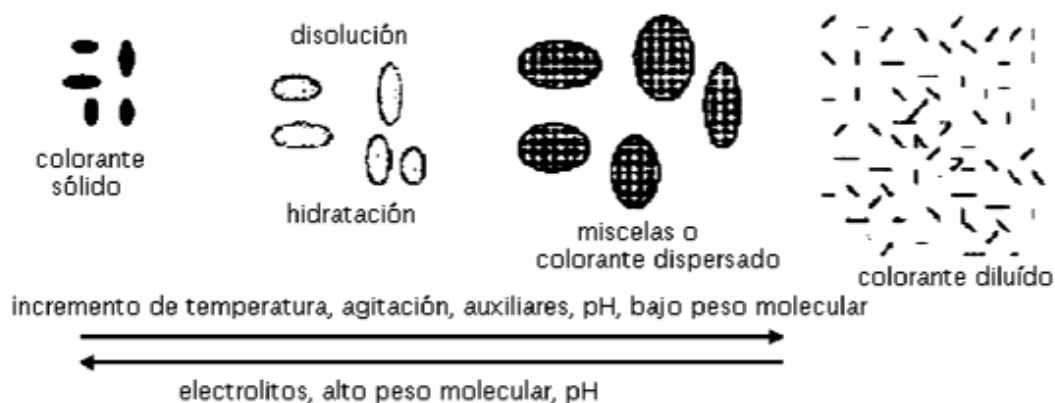


Figura 8. Disgregación de los colorantes.

Nota: Extraído de ⁵⁵

1.9.1.2. Difusión

Las moléculas del colorante que se encuentra en el seno del líquido del baño de teñido se mueven hasta las zonas próximas de la superficie de la fibra por difusividad debido a los gradientes de concentración ³⁹.

1.9.1.3. Absorción

El colorante que se encuentra en la superficie se absorbe dependiendo de la afinidad a la fibra ³⁹. La rápida absorción de colorantes sobre la superficie del sustrato reduce la concentración de colorante cerca de las fibras, lo que ralentiza la tasa de absorción. La correcta tasa de cambio del baño en contacto con la fibra permite la máxima concentración de colorante en sus inmediaciones. En esta etapa se forman enlaces químicos por el efecto de afinidad.

Las reacciones de absorción suelen ser lo suficientemente rápidas como para no afectar la cinética de tinción y, a menudo, se ralentizan o ajustan a valores óptimos (temperatura, pH, excipientes) para evitar una distribución desigual de la tinción. La afinidad, la temperatura (posiblemente el valor de pH y/o los auxiliares) afectan las interacciones termodinámicas, afectan los equilibrios de reacción y determinan el agotamiento del baño de teñido ⁵⁵.

1.9.1.4. Difusión en la fibra

Es el tramo más lento del teñido, es muy importante ya que marca el tiempo de impregnación que es fundamental para una solidez óptima. Como se representa en la Figura 9, las moléculas

de colorante en la superficie de la fibra comienzan a difundirse en la estructura macromolecular formada por la fibra, muchas veces tiende a penetrar dentro de las fibras a través de sus zonas amorfas, distribuirse homogéneamente y fijarse continuamente ⁵⁵.

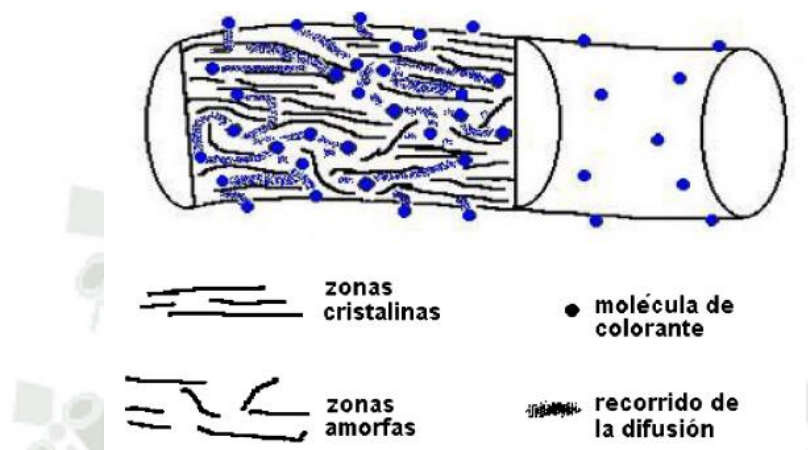


Figura 9. Migración y penetración del colorante dentro de la fibra.

Nota: Extraído de ⁵⁵

La difusión se acelera a concentraciones más altas. Las velocidades de teñido más altas solo se pueden lograr con una concentración saturada del colorante y con la presencia de adyuvantes que promuevan el hinchamiento de la fibra. Se necesita tiempo suficiente para que el colorante penetre bien, este es un requisito previo para la máxima robustez ⁵⁵. Esta difusión líquido-sólido depende del tamaño molecular de las especies que se difunden y la naturaleza de la estructura interna de la fibra ¹⁰³.

1.9.1.5. Fijación

Finalmente, se produce la unión de las fibras y colorantes que componen la fijación. El proceso de teñido requiere ciertas condiciones que permitan que el colorante penetre completamente en la fibra sin dañar la estructura interna de la fibra. Hay dos principios para que el colorante tenga una buena fijación; por la afinidad entre el colorante y la fibra y por la impregnación de la fibra ³⁹.

Un mayor tiempo de residencia a alta temperatura acelera la fijación, pero esto deriva un mayor costo. El control adecuado de las etapas de adsorción y difusión, con el colorante distribuido

uniformemente en cada momento del proceso de tintura, puede eliminar la necesidad de una etapa de transición, lo que genera costos significativos en eficiencia y calidad. En el caso de los colorantes dispersos, las fluctuaciones térmicas severas y la falta de solvente coloidal protector pueden promover el crecimiento de cristales de colorante, que pueden alojarse o precipitarse en el material, causando defectos en el colorante y reducción de la resistencia al frotamiento. La agitación excesiva (bombeo) o el pH incorrecto pueden provocar inestabilidad en la dispersión ⁵⁵.

1.9.2. Factores que influyen en el proceso de teñido

El proceso de teñido de fibras textiles se ve influenciado por diversos factores que deben tenerse en cuenta. A continuación, se describen en detalle estos factores a considerar durante el proceso.

1.9.2.1. Tiempo de contacto

El tiempo de contacto tiene que ver con el agotamiento en el baño de teñido, junto con la temperatura determinan la difusión que habrá del colorante hacia la fibra, el tiempo es importante para saber cuándo termina cada etapa de teñido y optimizar tiempos para obtener un teñido de calidad ³⁹. Para el teñido de fibras de alpaca se tiene un tiempo establecido de 20 – 60 minutos ⁵⁸.

1.9.2.2. Temperatura

Incrementar la temperatura reduce el tiempo ya que aumenta la movilidad de las moléculas favoreciendo su absorción, por lo que es importante mantener controlado este parámetro ³⁹.

De ella depende la correcta homogenización del colorante es importante para obtener una alta solidez del color ³⁹.

1.9.2.3. pH

El potencial de hidrógeno es importante en la etapa de agotamiento, es importante trabajar con un pH adecuado que tenga poder de agotamiento y reacción del colorante con la fibra ¹⁰⁴. El

valor de pH óptimo es un adecuado entre el valor establecido por la naturaleza del colorante ³⁹,
¹⁰⁴.

1.9.2.4. Relación de baño

Es la proporción de la masa del material a procesar y el volumen del baño utilizado. La cantidad de volumen de baño necesarios para procesar una determinada masa de fibra se refiere a la relación de baño. Por ejemplo, al teñir 1 g de fibra, si la relación del baño es 1/25, se requieren 25 ml de baño de colorante. Los procesos que requieren mayor relación de baño requieren una mayor cantidad de sustrato, esto significa que aumentará el consumo de agua. Además, el consumo de energía también aumenta, ya que se necesita más energía (electricidad, vapor, diesel) para calentar un tanque de mayor volumen) ⁵⁵.

1.9.2.5. Mordentado

Es una práctica habitual empleada en el teñido tradicional. La utilización de sales solubles como el aluminio, el cobre, el hierro y el estaño favorece la adhesión del colorante a las fibras, lo que influye en la tonalidad según el metal utilizado. Además, mejora la durabilidad del color frente a la exposición a la luz y al lavado frecuente ⁶⁶.

Se encuentran 3 tres tipos de Mordentado: El premordentado, donde las fibras se ponen en una solución acuosa que contiene un mordiente, se hierven durante un cierto período de tiempo y luego se tiñen las fibras; el mordentado directo, en el que las fibras se introducen en un baño de tintura al mismo tiempo que el mordiente y; el postmordentado, en el que las fibras preteñidas se introducen en la mezcla que contiene una determinada porción de mordentado y se hierven durante cierto periodo de tiempo ¹⁰². ácido clorhídrico o muriático, ácido acético, ácido fórmico, cloruro de estaño y sulfato de sodio son algunas de las sales utilizadas como mordentes, pero los más usados en el teñido convencional es el alumbre y el ácido ³⁹.

1.9.2.5.1. Alumbre

El alumbre se utiliza ampliamente como mordiente para teñir fibras queratínicas con colorantes polifenólicos para obtener colores brillantes y resistencia al lavado ¹⁰⁵. Demasiado alumbre hará que las fibras se vuelvan pegajosas ³⁹.

1.9.2.5.2. Ácido cítrico

El ácido cítrico (2-hidroxi-1,2,3- propanotricarboxílico) (Figura 10) es otro modificador que suele realzar los colores y darles cierto brillo en el teñido convencional. También se usa para ajustar el pH en el proceso de teñido ¹⁰⁶.

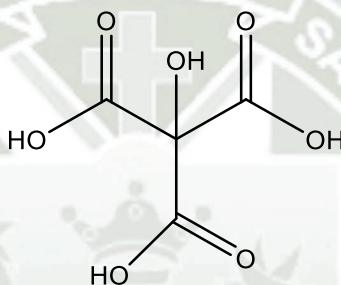


Figura 10. Estructura del ácido cítrico.

Nota: Extraído de ¹⁰⁶

1.10. Ultrasonido

El ultrasonido está definido como una serie de ondas mecánicas debido a la vibración de un cuerpo elástico, la frecuencia con las que trabaja el ultrasonido está por encima de la capacidad de audición del ser humano. El ultrasonido es usado ampliamente en muchos campos, siendo el de la medicina el más común; este campo tiene propósito diagnóstico y terapéutico, el ultrasonido también posee campo en la industria donde se usan equipos que son empleados para detectar objetos y medir distancias ¹⁰⁷.

1.10.1. Ultrasonido para teñido textil

El uso del ultrasonido hacia el sector textil es una tecnología en la que puede tener buenos resultados en el teñido de fibras textiles. Las mejoras en el teñido se asignan al fenómeno de la cavitación. La cavitación se puede definir como la creación, el crecimiento y el colapso de

microburbujas llenas de gas o cavidades en un líquido. Este proceso de cavitación es la razón principal de los impactos químicos y físicos de los ultrasonidos en sistemas líquido-líquido o sólido-líquido.

El ultrasonido presenta un efecto de minimización, brindando los mismos o mejores resultados que los enfoques existentes actualmente, pero en condiciones con un requerimiento menor, como una temperatura más baja y una concentración más baja de los químicos empleados. El uso de la irradiación ultrasónica como una fuente de energía renovable y respetuosa con el medio ambiente ha experimentado un aumento significativo, debido a las múltiples ventajas que ofrece, como limpieza u homogeneización de materiales, aceleración de reacciones físicas y químicas, menora de la solidez al lavado y menor costo de energía.

La irradiación ultrasónica se puede emplear de manera eficaz para humedecer los procesos textiles, como el lavado, el desencolado, el descrudado, el blanqueo y la mercerización de las fibras de algodón. También puede ser utilizado para tratamientos enzimáticos y decoloración de colorantes textiles en efluentes ⁷⁸.

1.11. Control de calidad post-teñido: Solidez del color

La Asociación Estadounidense de Químicos y Coloristas Textiles (AATCC) define la solidez del color como la capacidad de un material para mantener sus propiedades cromáticas sin cambios significativos, así como para evitar la transferencia de color a materiales adyacentes, cuando se expone a los diversos entornos a los que pueda estar sometido durante su procesamiento, análisis, almacenamiento y uso ^{108, 109}. Podemos sintetizarlo como la propiedad de la fibra de retener el color.

1.11.1. Pruebas de solidez del color

1.11.1.1. Solidez al agua

Este método de ensayo se emplea para determinar la resistencia al agua de telas e hilos que han sido teñidos, estampados o tienen un color distinto. Se utiliza agua destilada o desionizada porque el agua mineral (agua del grifo) varía en su composición ¹¹⁰.

Una muestra de tela se sumerge en agua, se exprime y se sitúa entre dos placas en un aparato de prueba, siguiendo la presión indicada. La muestra se seca y los cambios de color en la fibra se evalúan por comparación con la escala de grises o por instrumentación ¹¹¹.

1.11.1.2. Solidez al agua caliente

Se emplea para medir la resistencia de hilos y fibras estampadas o teñidas al agua caliente. Esta prueba determina el grado de sobremancha que puede ocurrir si la prenda se deja en agua caliente. En la prueba se usa agua destilada ¹¹².

Se enrolla una muestra del tejido junto con los tejidos adyacentes alrededor de una varilla de vidrio, luego se somete a un tratamiento con agua caliente y se seca. La variación de color del espécimen y la tinción de los tejidos adyacentes se evalúan mediante la escala de grises de referencia ¹¹³.

1.11.1.3. Solidez al agua de mar

Este procedimiento se emplea para evaluar la resistencia de los colores en tejidos impresos y teñidos que serán expuestos y permanecerán sumergidos en agua de mar ¹¹².

La muestra se introduce en una solución salina, se le extrae el exceso de líquido y se somete a presión en un dispositivo de prueba de dos placas. Se seca al ambiente y el cambio de color se evalúa por comparación con la escala de grises o por instrumentación ¹¹⁴.

1.11.1.4. Solidez al lavado con jabón

Esta prueba pretende reflejar el efecto de un proceso de lavado con jabón o con jabón y soda en la fibra teñida. La muestra se enjuaga en agua y se seca a temperatura ambiente. Se analiza

la variación de color de la muestra con el tejido original mediante escala de grises o instrumentación ¹¹⁵.

1.11.1.5. Solidez al lavado con detergente

Los procesos de lavado convencional o lavado industrial dependen principalmente de las telas utilizadas para fabricar la prenda y de las normas estandarizadas para ello. Un ejemplo sería utilizar un ciclo de lavado delicado para prendas de lana, tejidos especiales y prendas delicadas, mientras que se emplea un ciclo de lavado más intenso para camisas de algodón y uno aún más vigoroso para la ropa de trabajo ¹¹⁶.

Las operaciones se llevan a cabo utilizando una reducida relación de baño de agua con detergente y una cantidad adecuada de esferas de acero. Los cambios en el color de la muestra se evalúan con una escala de grises de referencia ^{55, 110}.

1.11.1.6. Solidez al manchado con base

Las muestras se empapan o recubren con reactivos hechos con equipo de laboratorio simple. Se evalúa visual o instrumentalmente el cambio de color del tejido cuando está húmedo y después del secado ¹¹⁷.

1.11.1.7. Solidez al manchado con ácido

La solución ácida se deja caer sobre la muestra y la superficie de la muestra se frota ligeramente con una varilla de vidrio para asegurar que la muestra penetre. El cambio de color del tejido cuando está húmedo y después del secado se evalúa visual o instrumentalmente con la escala de grises ¹¹⁸.

1.11.2. Evaluación del color

El espectrofotómetro de reflectancia y el colorímetro se utilizan para comúnmente para medir el color directamente en la fibra ⁵⁵. Luo y colaboradores ¹¹⁹ desarrollaron y validaron un método que consiste en capturar imágenes digitales para evaluar la solidez del color.

1.11.2.1. Escala de grises

Los expertos textiles, una vez terminadas las pruebas de solidez utilizan una plantilla de escala de grises, la cual permite comparar cambios de tono y/o decoloración de las fibras teñidas ³⁹.

En la Figura 11, se muestra esta escala, donde cada grado se compone de dos áreas bien definidas. La zona izquierda representa el color original del objeto (en tono de gris neutro), mientras que la zona derecha representa el color resultante después del procesamiento (también en tono de gris neutro) ⁵⁵.

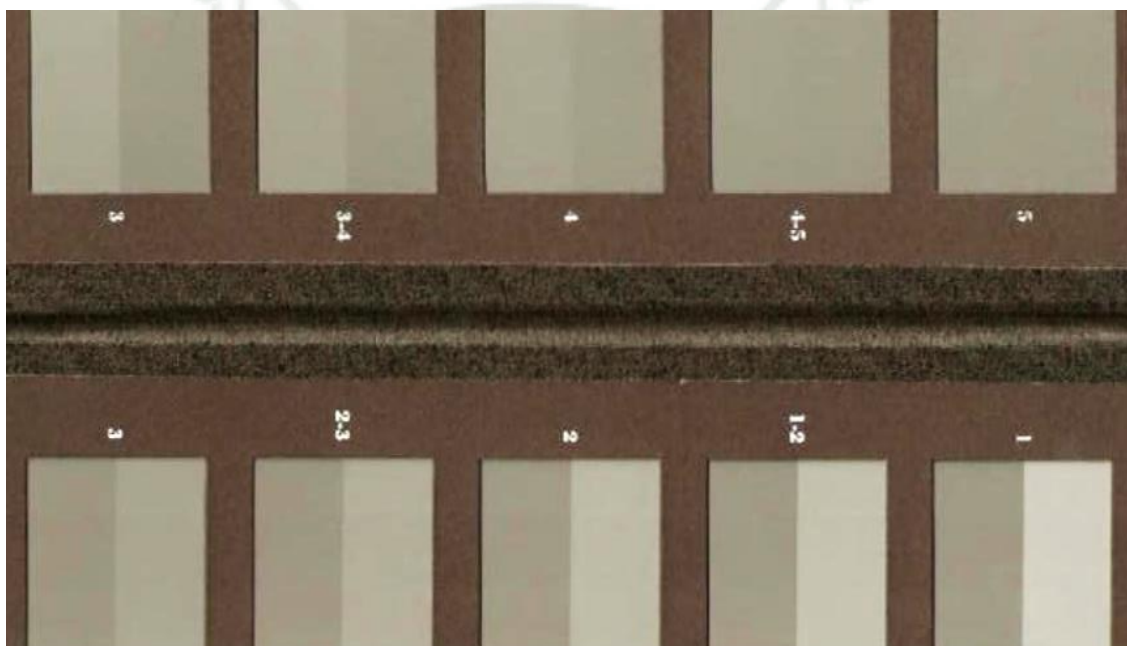


Figura 11. Escala de grises para evaluar el cambio de color.

Nota: Extraído de ⁵⁵

La solidez del color se expresa en un número adimensional llamado "índice de solidez". Estos números van del 1 al 5 (Tabla 9) y su calificación es una comparación, correspondiente a una escala de grises de valores de luz donde el gris se muestra como el gris base o punto de partida ⁵⁵.

Tabla 9. Indicadores de solidez.

Valoración	Denominación	Teñido
5	Excelente	No se destiñe
4	Muy buena	Se destiñe un poco
3	Buena	Se destiñe sensiblemente
2	Regular	Se destiñe fuertemente
1	Malo	Se destiñe muy fuertemente

Nota: Extraído de ¹¹⁶

1.11.2.2. Diferencia del color (ΔE) en el sistema CIELAB

La representación del color de un objeto mediante una notación numérica es conocida como un modelo de color. La Comisión Internacional de Iluminación (CIE) ha definido coordenadas CIE XYZ, CIE L^*C^*h , y CIE $L^*a^*b^*$, con el fin de lograr una comunicación y expresión objetiva del color, se utiliza ampliamente el espacio de color $L^*a^*b^*$, también conocido como CIELAB. Este espacio de color se ha convertido en uno de los más populares para evaluar la paleta cromática de los objetos debido a su capacidad para establecer una relación constante entre los valores de color y la percepción visual humana. Investigadores y fabricantes lo emplean para evaluar de manera precisa los atributos de color, identificar discrepancias y cuantificar con precisión los resultados para otros ¹²⁰.

La exploración de un espacio de color uniforme nos permite evaluar las diferencias de color midiendo la distancia que divide los puntos cromáticos en ese espacio ⁵⁵. La diferencia total del color (ΔE) se calcula a través del sistema CIELAB que incluye las diferencias de las siguientes variables independientes: L^* (Luminosidad), a^* (escalas rojo/verde) y b^* (escalas amarillo/azul) que nos indican ΔE (Figura 12) ¹²⁰.

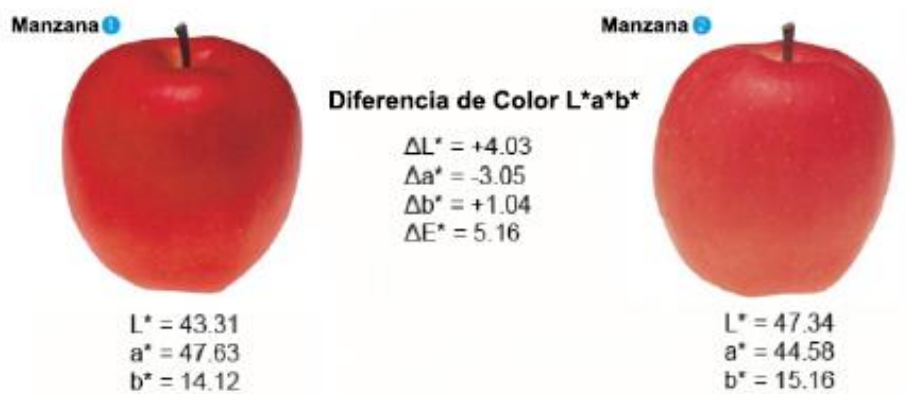


Figura 12. Diferencia de color entre muestra y un estándar.

Nota: Extraído de ¹²⁰



CAPÍTULO II

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Lugar de ejecución

El laboratorio y tienda local de venta de fibra, hilo y tela de alpaca se ubican en Arequipa, Perú.

La investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Calidad de Aguas de la Universidad Tecnológica del Perú sede Arequipa.

2.2. Materiales

2.2.1. Equipos

- Espectrofotómetro UV/Vis ThermoFisher Scientific modelo GENESYS 150
- Baño de ultrasonido de 40 KHz 100 W BIOBASE® UC-20A
- Campana extractora de gases BIOBASE® FH1200
- Microscopio binocular AmScope SME-F8BH
- Cámara digital para microscopio MU500-HS
- Cámara digital Canon EOS Rebel T7
- Balanza analítica Mettler Toledo ME204

2.2.2. Material biológico

- Fibras de alpaca: Huarizo, Fleece y Baby.

2.2.3. Materiales de laboratorio

- Micropipetas de 2-20 μ L, 20-200 μ L y 100-1000 μ L.
- Beakers de 50 mL, 100 mL y 250 mL
- Fiolas de 10, 50, 100, 250 y 1000 mL
- Pipetas graduadas de 1,5 mL y 10 mL
- Pipetas volumétricas de 10 y 15 mL
- Probetas de 25, 50 y 100 mL
- Erlenmeyers de 250 mL

- Celdas de cuarzo de 1 cm
- Asa de Digrafsky
- Lunas de reloj
- Pesa filtro
- Baguetas
- Espátula

2.2.4. Reactivos

- Colorante Azul Novacron FN-BN
- Colorante Rojo Synozol K3BS
- Alumbre
- Agua destilada
- Ácido cítrico
- Cloruro de sodio
- Hidróxido de amonio
- Ácido acético glacial
- Detergente en polvo
- Jabón de glicerina neutro

2.3. Métodos

2.3.1. Validación del método analítico para determinar la concentración de colorantes azoicos por espectrofotometría UV-Visible

2.3.1.1. Selección de la longitud de onda de trabajo para cada colorante

La longitud de onda de máxima absorción $\lambda_{\max}$ (nm) se midió usando un espectrofotómetro UV-Visible con la opción de “Barrido”, la configuración de la corrida espectral fue desde 200 hasta 800 nm.

2.3.1.2. Preparación de soluciones patrón para cada colorante

Se preparó soluciones patrón para ambos colorantes a partir de una solución stock de 50 mg.L^{-1} de Rojo Synozol K3BS y una solución stock de 200 mg.L^{-1} de Azul Novacron FN-BN para preparar concentraciones de 2.5; 5; 10 ; 20; 30; 40 y 50 mg.L^{-1} . El volumen usado de la solución stock y de agua destilada se presentan en la Tabla 10 y Tabla 11. Se registró la absorbancia medida en el espectrofotómetro. Para el blanco se usó agua destilada.

Tabla 10. Preparación de soluciones patrón de colorante Rojo Synozol K3BS.

Patrón	Solución stock de 50 mg.L^{-1} de Rojo Synozol K3BS (mL)	Agua destilada (mL)	Concentración final (mg.L^{-1})
1	0.5	9.5	2.5
2	1.0	9.0	5
3	2.0	8.0	10
4	4.0	6.0	20
5	6.0	4.0	30
6	8.0	2.0	40
7	10.0	0.0	50

Nota: Elaboración propia

Tabla 11. Preparación de soluciones patrón de colorante Azul Novacron FN-BN.

Patrón	Solución stock de 200 mg L^{-1} de Azul Novacron FN-BN (mL)	Agua destilada (mL)	Concentración final (mg.L^{-1})
1	0.125	9.875	2.5
2	0.25	9.75	5
3	0.5	9.50	10
4	1.0	9.00	20
5	1.5	8.50	30
6	2.0	8.00	40
7	2.5	7.50	50

Nota: Elaboración propia

2.3.1.3. Obtención de las gráficas de calibración para cada colorante

Se seleccionó el rango de soluciones de colorante que cumplan la Ley de Beer, que indica que la concentración del analito es directamente proporcional a su absorbancia. Las gráficas de calibración se realizaron por triplicado considerando las concentraciones finales de las Tabla 10 y Tabla 11.

2.3.1.4. Evaluación de la linealidad del método

La regresión lineal se calculó usando el método de mínimos cuadrados, que asume y encuentra algebraicamente una relación lineal directamente proporcional entre la absorbancia y la concentración ¹²¹.

$$y = a + bx \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$b = \frac{\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n}}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$a = \frac{\sum y_i - b \sum x_i}{n} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

- y es absorbancia,
- x es concentración,
- a es el intercepto y
- b es la pendiente.

Se evaluó el coeficiente de correlación lineal de Pearson r presentado en cuyo valor mayor a 0.99 tiene buenas aplicaciones prácticas.

$$r = \frac{\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n}}{\sqrt{\left(\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}\right) \left(\sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n}\right)}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

La presenta un término que termina siendo más confiable para la evaluación de la correlación lineal es la prueba estadística que permite el valor t . La cual se calculó de la siguiente manera:

$$t = \frac{|r|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

2.3.1.5. Determinación del límite de detección y el método de cuantificación

Se determinó el límite de detección (LOD) para conocer la cantidad mínima de analito que se puede detectar, pero que no necesariamente se cuantifica, utilizando la metodología propuesta.

$$\text{LOD} = \frac{y_B + 3S_{y/x}}{b} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

El límite de cuantificación (LOQ) se determinó con el objetivo de conocer la concentración más baja de analito que se puede calcular con precisión con este método.

$$\text{LOQ} = \frac{y_B + 10S_{y/x}}{b} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

- y_B es el resultado cuando x es cero,
- $S_{y/x}$ es la desviación estándar del resultado cuando x es cero,
- n es el número de datos
- b es la pendiente

2.3.2. Realización del teñido de distintas fibras de alpaca por el método de agotamiento convencional y aplicando el método de ultrasonido

La metodología para la obtención de fibras de alpaca teñidas por agotamiento y ultrasonido se basó por lo descrito por Babar y colaboradores, Illa y Tairo, Larik y colaboradores y Luque^{9, 10, 39, 122} que describen la técnica de agotamiento. Todos los tratamientos y mediciones se llevaron a cabo por triplicado.

2.3.2.1. Acondicionamiento de la muestra textil

Se adquirió 1 kg de tops de 3 clases de fibras de alpaca; Huarizo, Fleece y Baby de una empresa local. En todo el proceso se llevó a cabo 72 experimentos, de los cuales 18 fueron para el proceso convencional (92°C) y 54 para el proceso utilizando ultrasonido (60, 70 y 80°C), ya

considerando los 3 tipos de fibra, ambos tipos de colorantes y las repeticiones. Teniendo en cuenta que el peso de fibra para cada tratamiento no supera 1 g, se pesó y lavó 30 g de cada clase de fibra con el detergente neutro Extran® MA 02 al 2% durante 10 min a 60 °C, seguidamente se enjuagó en baño María a 40°C y posteriormente, se realizó un segundo enjuague con agua potable a chorro.

2.3.2.2. Preparación del colorante

Para mantener constante la concentración inicial en las pruebas de teñido, se hizo uso de una solución madre por colorante, previamente se realizaron 2 pruebas preliminares por triplicado con cada colorante para determinar la máxima absorción, donde se determinó una concentración de 1400 ppm para Rojo Synozol K3BS y 450 ppm para Azul Novacron FN-BN, para lo cual se pesó 1.40 g de Rojo Synozol K3BS y 0.45 g de Azul Novacron FN-BN y se diluyó cada colorante por separado con agua destilada en una fiola de 1 L. El contenido se trasvasó a recipientes de plástico de 1L.

2.3.2.3. Teñido por agotamiento convencional

De acuerdo con el método de teñido realizado por Illa y Tairo³⁹, se tiene por conocimiento el uso de alumbre y ácido cítrico como mordientes más usados en el teñido de fibras proteicas.

Las cantidades usadas de estos mordientes estuvieron en relación con el peso de la fibra a usar, siendo un 20% del peso para el alumbre y un 3.32% para el ácido cítrico, por lo cual, en una balanza analítica se pesó 0.2 g de alumbre y 0.0332 g de ácido cítrico debido a que el peso de la fibra para cada tratamiento fue de 1 g. Posteriormente, en un matraz de 50 mL se transfirió 25 mL de la solución de teñido y se añadió el ácido cítrico con el alumbre pesados anteriormente. La solución de colorante ya mordentada se homogeneizó en baño María con agua hirviendo durante 15 minutos, la relación de baño fue de 1:25 con un pH de 3,5.

Para el teñido convencional se tiñeron las 3 clases de fibras por triplicado con cada colorante, la fibra usada se pesó en la balanza analítica por separado. El teñido empezó al sumergir la

fibra en la solución de colorante homogeneizada y se retiró a los 30 minutos en los que se mantuvo en el Baño María, la temperatura de teñido fue 92°C. La fibra se enjuagó con agua potable a chorro y se secó a temperatura ambiente.

2.3.2.4. Aplicación del método de ultrasonido en el teñido de fibras de alpaca

Para este método, se trabajó con la misma metodología usada en el teñido convencional, con la variante de la aplicación del ultrasonido a diferentes temperaturas de acuerdo con lo descrito por Larik y colaboradores, Babar y colaboradores e Islam y Ke^{9, 10, 123} que trabajaron a temperaturas menores de ebullición, por ello, se seleccionaron las temperaturas de 60, 70 y 80 °C, ya que son las más utilizadas en los teñidos asistidos por ultrasonido. En un matraz de 25 mL se transfirió 25 mL de la solución de teñido con 0.0332 g de ácido cítrico y 0.2 g de alumbre, el peso de la fibra para cada tratamiento fue 1 g. Esta solución de colorante ya mordentada se homogeneizó en el baño maría del ultrasonido a 80°C durante 15 minutos y se sonicó por 2 minutos, la relación de baño fue de 1:25 con un pH de 3.5.

Para el teñido con ultrasonido se tiñeron las 3 clases de fibras por triplicado a las 3 temperaturas ya mencionadas con cada colorante, la fibra se pesó en la balanza analítica por separado.

El teñido empezó al sumergir la fibra en la solución de colorante homogeneizada, se programó el ultrasonido para realizarse a las temperaturas ya mencionadas y el tiempo de sonicación fue de 30 minutos.

La Figura 13 muestra el esquema de teñido con ultrasonido.

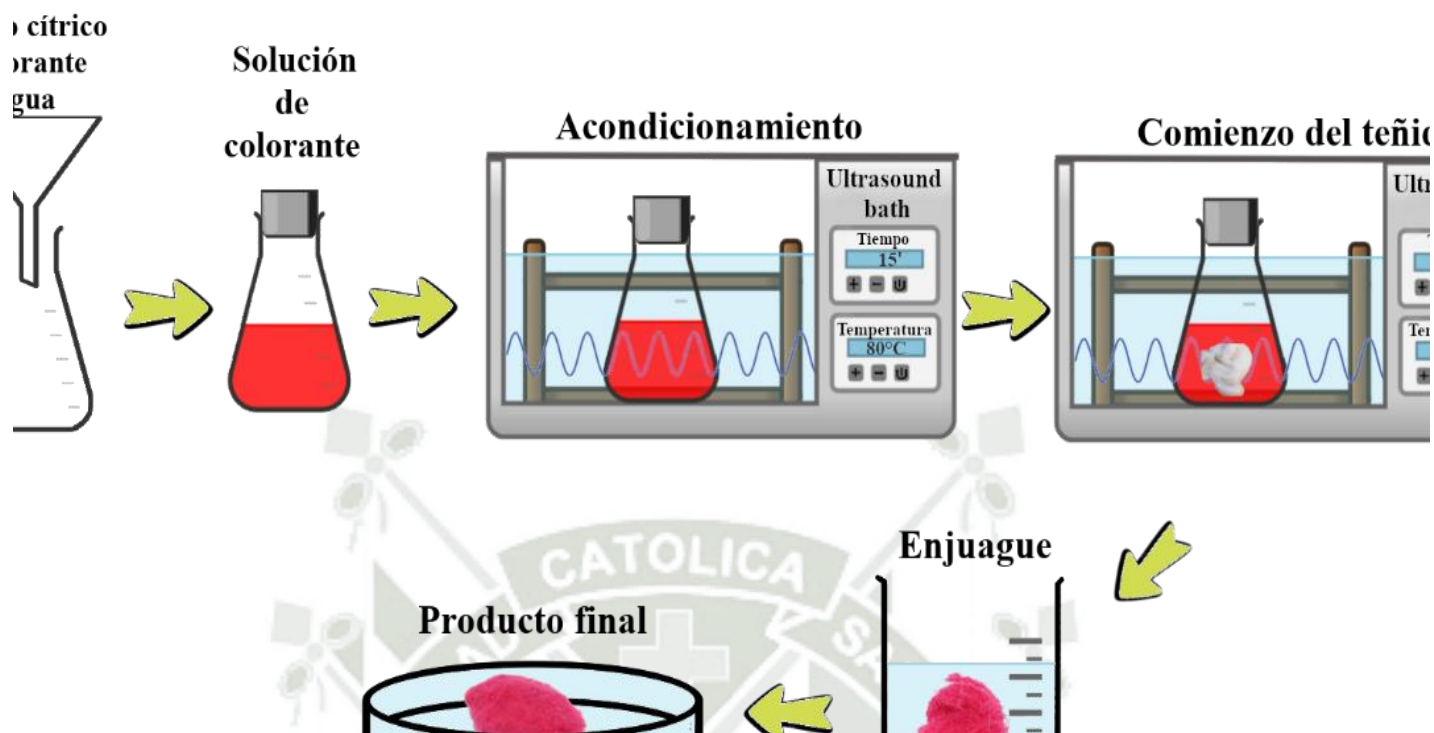


Figura 13. Proceso de teñido por agotamiento asistido por ultrasonido.

Nota: Elaboración propia

2.3.3. Determinación de la concentración de los colorantes azoicos en los distintos métodos de teñido por espectrofotometría UV-Visible

Durante el teñido, cada 5 minutos se tomó una alícuota del baño de teñido, de acuerdo a las concentraciones iniciales de los colorantes y al comportamiento del teñido, la concentración de la alícuota se ajustó para que se encuentre dentro del rango de cuantificación de la gráfica de calibración, por lo cual, alícuotas de 100 μL de Rojo Synozol K3BS y 200 μL de Azul Novacron FN-BN fueron seleccionados para determinar la concentración en el baño de teñido, cada alícuota se enrasó con agua destilada en una fiola de 5 mL, en total se tomaron 6 alícuotas por tratamiento y se midieron en el espectrofotómetro, se hizo uso de la ecuación de regresión lineal para obtener la concentración de colorante.

2.3.4. Evaluación y comparación el color de las distintas fibras de alpaca mediante diversas pruebas de solidez del color

La Organización Internacional de Normalización (ISO) y la Asociación Americana de Químicos Textiles y Coloristas (AATCC) (cuyas principales actividades son la elaboración de

normas técnicas internacionales) constan de diversas pruebas de solidez del color para fibras textiles de las cuales la ISO 105-E01, ISO 105-E02, ISO 105-E08, ISO 105-E08, ISO 105-C10, ISO 105-E05, ISO 105-E06 y la AATCC TM 61 fueron usadas en esta investigación para determinar la solidez del color. Según la norma las fibras pueden cortarse en cualquier tamaño conveniente, por lo cual cada muestra de fibra se recortó en partes iguales, teniendo cada una un peso de 0,1 g.

2.3.4.1. Solidez del color al agua (ISO 105-E01)

La muestra se colocó en una placa Petri de vidrio de 150 x 25 mm. Con ayuda de una bagueta y un asa de Digralsky para eliminar burbujas de aire se logró recubrirla con 40 mL de agua destilada. Luego de 30 minutos, la muestra se secó en la estufa a 38 °C por 4 horas.

2.3.4.2. Solidez del color al agua de mar (ISO 105-E02)

El procedimiento fue igual al de la solidez del color al agua, se reemplazó los 40 mL de agua por 40 mL de una solución de cloruro de sodio 30 g.L⁻¹.

2.3.4.3. Solidez al agua caliente (ISO 105-E08:1994)

La muestra se colocó en un beaker de 50 mL. Con ayuda de una bagueta se enrolló la fibra en 40 mL de agua a 70 °C ligeramente acidificada con ácido acético con un pH final de 6 ± 0.5 . Luego de 30 minutos en el baño María, la muestra se retiró, exprimió y secó a temperatura ambiente.

2.3.4.4. Solidez del color al lavado con jabón (ISO 105-C10:2006)

El procedimiento fue en baño María como la prueba de solidez al agua caliente, excepto que la muestra se colocó sin enrollar y la temperatura se mantuvo a 40 °C durante 30 minutos. La muestra.

2.3.4.5. Solidez del color al lavado con detergente (AATCC TM 61-2010)

La muestra se colocó en un beaker de 200 mL, se añadió 10 villas de 5 mm de diámetro, una pastilla magnética y 40 mL de una solución de detergente (0.37 %) a 40 °C. Luego de 45

minutos en el agitador magnético múltiple, la muestra se enjuagó 3 veces con agua a 40 °C y secó a temperatura ambiente.

2.3.4.6. Solidez del color a las manchas de ácidos (Norma ISO 105-E05:2010)

En la campana extractora de gases, la muestra se colocó en una placa Petri de vidrio de 150 x 25 mm. Con ayuda de una bagueta y un asa de Digrafsky para eliminar burbujas de aire se logró recubrirla con 40 mL de una solución de ácido acético glacial (300 g.L⁻¹). Luego de 2 minutos, la muestra se retiró y secó a temperatura ambiente.

2.3.4.7. Solidez del color a las manchas de álcalis (Norma ISO 105-E06:2006)

El procedimiento fue igual al de la prueba de solidez al ácido, en vez de este, se empleó 40 mL de hidróxido de amonio al 28 %.

2.3.4.8. Evaluación del cambio de color a través de imágenes digitales

Terminadas las pruebas de solidez se midió el grado de solidez mediante el método desarrollado por Luo y colaboradores¹¹⁹, que describe una nueva técnica basada en el uso de un sistema de cámara digital para evaluar la solidez del color en las fibras, la cámara es capaz de medir los colores de cada píxel de la imagen, para lo cual se utilizó una cámara Canon EOS Rebel T7 para evaluar la solidez macroscópicamente y un microscopio óptico AimScope del cual se hizo uso de su propia cámara para evaluar microscópicamente la solidez.

2.4. Operacionalización de las variables

Tabla 12. Variables de investigación.

Variables	Variable	Indicadores	Unidades
Independientes	– Calidad de fibra alpaca	– Fibra	– Adimensional
	– Temperatura del baño de teñido	– Temperatura	– °C
Dependientes	– Concentración del colorante en el baño de teñido	– Absorbancia	– Adimensional

Nota: Elaboración propia

2.5. Diseño experimental para determinación de las condiciones óptimas del método de ultrasonido

Para investigar los efectos de las variables que intervienen en un proceso de agotamiento, se realizó un diseño factorial de tres niveles 3^2 con tres repeticiones en cada punto. Las variables por estudiar fueron la temperatura y el tipo de fibra.

Tabla 13. Diseño cribado para determinar condiciones óptimas en el teñido con ultrasonido.

Variable	Nivel		
	Bajo	Medio	Alto
Temperatura (°C)	60	70	80
Tipo de fibra (cualitativo)	Huarizo	Fleece	Baby

Nota: Elaboración propia

Tabla 14. Libro de datos del diseño factorial 3²

Repetición	Temperatura (°C)	Fibra	Agotamiento (%) de Rojo Synozol K3BS	Agotamiento (%) de Azul Novacron FN-BN
1	60	Huarizo	39.15	41.44
1	70	Huarizo	56.83	62.59
1	80	Huarizo	93.23	92.09
1	60	Fleece	42.12	41.84
1	70	Fleece	68.73	71.75
1	80	Fleece	91.83	78.87
1	60	Baby	55.08	43.27
1	70	Baby	68.03	81.51
1	80	Baby	100.00	92.90
2	60	Huarizo	41.25	44.69
2	70	Huarizo	58.23	57.91
2	80	Huarizo	94.45	73.78
2	60	Fleece	39.85	47.13
2	70	Fleece	64.70	67.27
2	80	Fleece	99.18	95.34
2	60	Baby	48.25	49.37
2	70	Baby	71.88	72.76
2	80	Baby	100.00	91.27
3	60	Huarizo	38.27	46.73
3	70	Huarizo	57.88	61.57
3	80	Huarizo	95.68	94.32
3	60	Fleece	57.35	43.88
3	70	Fleece	64.00	69.51
3	80	Fleece	90.60	84.56
3	60	Baby	54.73	64.22
3	70	Baby	67.15	92.49
3	80	Baby	97.08	90.05

Nota: Elaboración propia

2.6. Análisis estadístico para comparar del método convencional y ultrasonido

Se realizó el análisis estadístico F y t para evaluar si existe diferencia o no entre el porcentaje de agotamiento de ambos métodos de teñido, para el análisis se consideró los parámetros óptimos del ultrasonido del diseño factorial.

Estadístico F:

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Estadístico t:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_p^2}{n_1} + \frac{s_p^2}{n_2}}} \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$s_p^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

- s_p^2 es la varianza agrupada
- s_1^2 es la varianza muestral del grupo ultrasonido
- s_2^2 es la varianza muestral del grupo convencional
- n_1 es el número de datos del grupo ultrasonido
- n_2 es el número de datos del grupo convencional.

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Validación del método analítico para determinar la concentración de colorantes azoicos por espectrofotometría UV-Visible

3.1.1. Selección de la longitud de onda de trabajo para cada colorante

Con la intención de cuantificar color se considera únicamente la región visible que va de 390 a 700 nm. La longitud de onda de trabajo del colorante Rojo Synozol K3BS fue de 542 nm, mientras que la del colorante Azul Novacron FN-BN fue de 592 nm. El barrido espectral de ambos colorantes se muestra en la Figura 14.

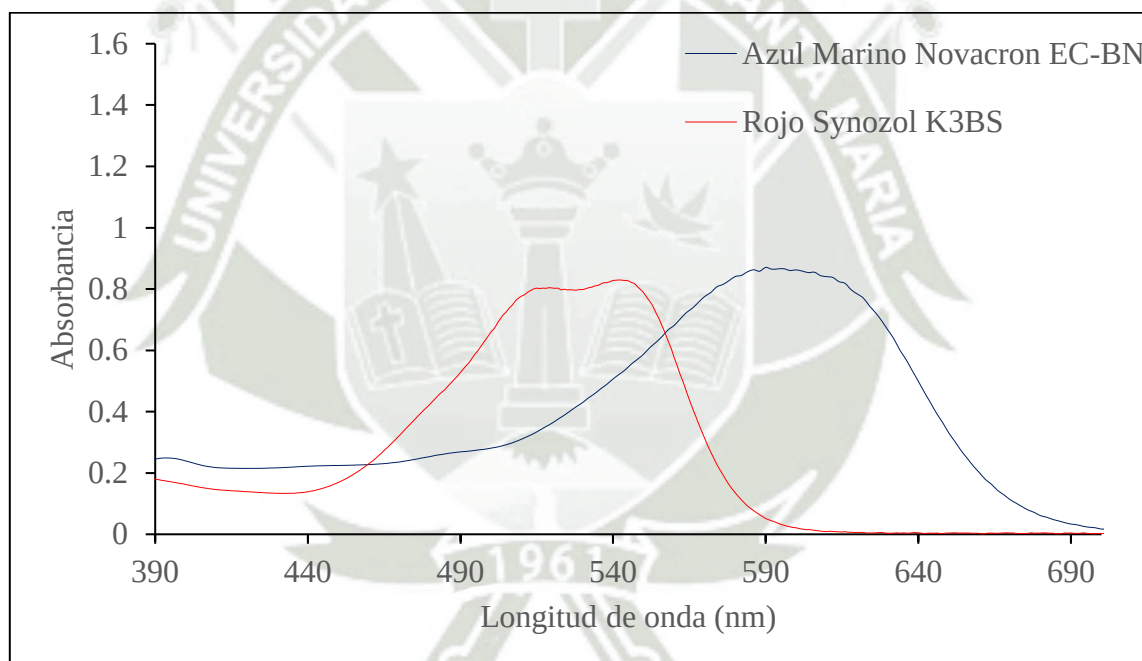


Figura 14. Barrido espectral de Rojo Synozol K3BS y Azul Novacron FN-BN, respectivamente dentro del rango ultravioleta visible (UV-VIS).

Nota: Elaboración propia

Lo cual está de acuerdo con lo reportado por Feuzer Matos y colaboradores¹²⁴ quienes evaluaron la eficiencia de remoción del colorante Rojo Reactivo 195 usando como longitud de onda trabajo $\lambda_{\text{max}} = 540$ nm. Revathi y colaboradores¹²⁵ también obtuvieron una longitud de onda máxima $\lambda_{\text{max}} = 542$ nm estudiando la remoción del colorante Rojo Reactivo 195 con quitosano.

3.1.2. Preparación de soluciones patrón para cada colorante

Las concentraciones finales de los patrones para ambos colorantes fueron 2.5; 5; 10; 20; 30; 40 y 50 mg.L⁻¹ (Figura 15). Se registró la absorbancia medida. Para el blanco se usó agua destilada.



Figura 15. Soluciones patrón de los colorantes.

Nota: Elaboración propia

3.1.3. Obtención de las gráficas de calibración para cada colorante

Las soluciones patrón se prepararon en tres días distintos, los resultados de las mediciones se muestran en la Tabla 15 y Tabla 16.

Tabla 15. Soluciones patrón de colorante Rojo Synozol K3BS.

Concentración (mg.L ⁻¹)	Absorbancia				Desviación estándar
	1	2	3	$\bar{x}$	
2.5	0.055	0.053	0.064	0.057	0.006
5	0.106	0.107	0.116	0.110	0.006
10	0.212	0.212	0.22	0.215	0.005
20	0.417	0.42	0.419	0.419	0.002
30	0.622	0.625	0.605	0.617	0.011
40	0.833	0.827	0.831	0.830	0.003
50	1.037	1.026	1.037	1.033	0.006

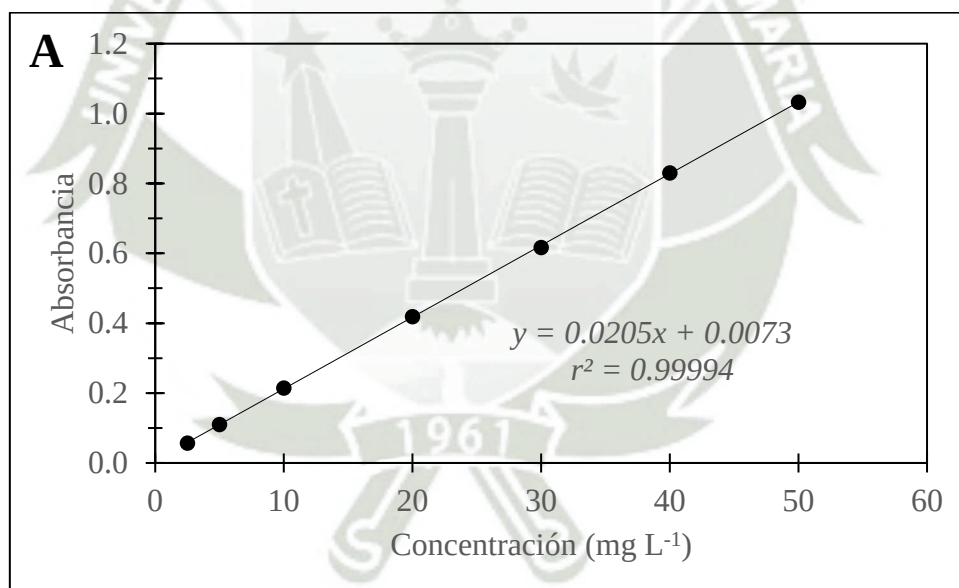
Nota: Elaboración propia

Tabla 16. Soluciones patrón de colorante Azul Novacron FN-BN.

Concentración (mg.L ⁻¹)	Absorbancia				Desviación estándar
	1	2	3	$\bar{x}$	
2.5	0.072	0.070	0.073	0.072	0.002
5	0.139	0.146	0.144	0.143	0.004
10	0.289	0.290	0.285	0.288	0.003
20	0.552	0.548	0.576	0.559	0.015
30	0.853	0.830	0.831	0.838	0.013
40	1.141	1.099	1.120	1.120	0.021
50	1.407	1.372	1.398	1.392	0.018

Nota: Elaboración propia

Las gráficas de calibración presentadas en la Figura 16 se construyeron con gráficas de dispersión cuyo eje X es la concentración promedio de los patrones y el eje Y, la absorbancia.



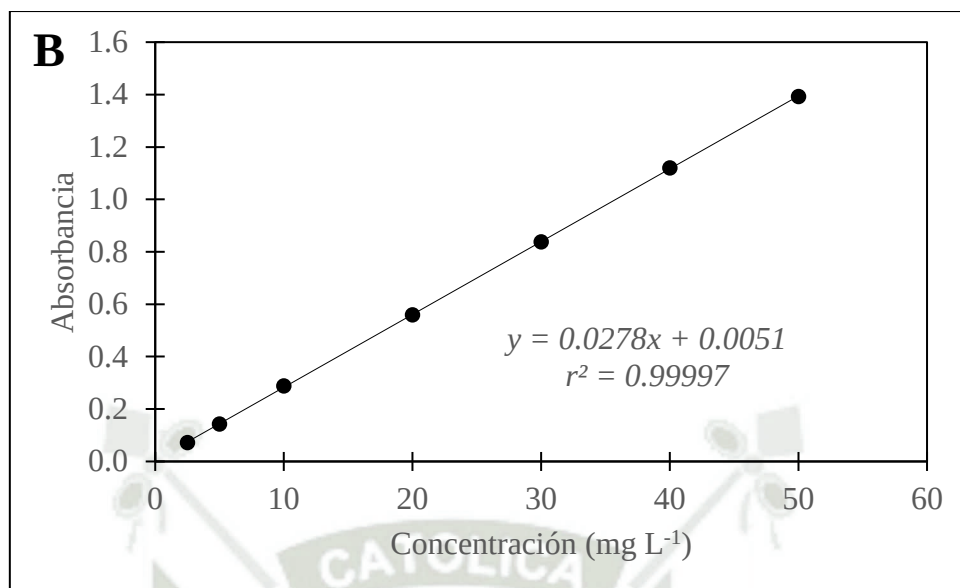


Figura 16. Gráfica de calibración para la determinación de Rojo Synozol K3BS (A) y Azul Novacron FN-BN (B).

Nota: Elaboración propia

3.1.4. Evaluación de la linealidad del método

Para Rojo Synozol K3BS:

$$b = \frac{114.5825 - \frac{157.5 * 3.281}{7}}{5531.25 - \frac{24806.25}{7}} = 0.0205$$

$$a = \frac{3.281 - 0.020508 * 157.5}{7} = 0.0073$$

Para Azul Novacron FN-BN:

$$b = \frac{154.495 - \frac{157.5 * 4.412}{7}}{5531.25 - \frac{24806.25}{7}} = 0.0278$$

$$a = \frac{4.412 - 0.027786 * 157.5}{7} = 0.0051$$

La Tabla 17 muestra la ecuación utilizada para la conversión de absorbancia en concentración.

Tabla 17. Información sobre la ecuación lineal y el coeficiente de correlación para los colorantes.

Colorante	Ecuación lineal	Coeficiente de correlación
Rojo Synozol K3BS	Concentración = (Absorbancia – 0.0073)/0.0205	$r^2 = 0.99994$
Azul Novacron FN-BN	Concentración = (Absorbancia – 0.0051)/0.0278	$r^2 = 0.99996$

Nota: Elaboración propia

Planteamiento de hipótesis:

H_0 = Las dos variables (Absorbancia y Concentración) están incorrelacionadas

H_1 = Las dos variables (Absorbancia y Concentración) están correlacionadas

Nivel de confianza

N.C. 95 % ($\alpha = 0.05$)

Cálculo del estadístico de prueba:

Para Rojo Synozol K3BS:

$$r = \frac{114.5825 - \frac{157.5 * 3.281}{7}}{\sqrt{\left(5531.25 - \frac{24806.25}{7}\right)\left(2.3738 - \frac{10.7649}{7}\right)}} = 0.99997$$

$$t_{exp} = \frac{|0.99997| * \sqrt{7 - 2}}{\sqrt{1 - 0.99994}} = 294.5602$$

Para Azul Novacron FN-BN:

$$r = \frac{154.495 - \frac{157.5 * 4.412}{7}}{\sqrt{\left(5531.25 - \frac{24806.25}{7}\right)\left(4.3154 - \frac{19.4657}{7}\right)}} = 0.99998$$

$$t_{exp} = \frac{|0.99998| * \sqrt{7 - 2}}{\sqrt{1 - 0.99996}} = 375.0399$$

Para ambos colorantes:

$$\text{Grados de libertad (g.l.)} = n - 1 = 7 - 1 = 6$$

$$t_{\text{tabla}} = (-2.447; 2.447)$$

Toma de la decisión:

$$t_{\text{exp}} \notin \text{rango } t_{\text{tabla}}$$

Rechazar H_0

Interpretación:

Hay evidencia estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95 % para rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa, es decir, existe una elevada correlación lineal entre absorbancia y concentración para ambos colorantes.

3.1.5. Determinación del límite de detección y el método de cuantificación

Para Rojo Synozol K3BS:

$$\text{LOD} = \frac{0.0073 + 3 * 0.001}{0.0205} \cdot \frac{1}{\sqrt{7}} = 0.19$$

$$\text{LOQ} = \frac{0.0073 + 10 * 0.001}{0.0205} \cdot \frac{1}{\sqrt{7}} = 0.32$$

Para Azul Novacron FN-BN:

$$\text{LOD} = \frac{0.0051 + 3 * 0.001}{0.0278} \cdot \frac{1}{\sqrt{7}} = 0.11$$

$$\text{LOQ} = \frac{0.0051 + 10 * 0.001}{0.0278} \cdot \frac{1}{\sqrt{7}} = 0.21$$

En el caso del colorante Rojo Synozol K3BS, el analito debe estar a una concentración por encima de 0.19 mg.L⁻¹ para ser detectado mas no cuantificado. Y a una concentración de 0.32 mg.L⁻¹ para que pueda ser cuantificado. El criterio es el mismo para el caso del colorante azul. Los limites se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. LOD y LOQ de los colorantes.

Colorante	LOD (mg.L ⁻¹)	LOQ (mg.L ⁻¹)
Rojo Synozol K3BS	0.19	0.32
Azul Novacron FN-BN	0.11	0.21

Nota: Elaboración propia

De acuerdo con la investigación de Ortiz Romero y Ramirez Revilla¹²¹ quienes trabajaron con el mismo colorante, presentaron valores de 0.29 mg.L⁻¹ para el límite de detección y un valor de 0.41 mg.L⁻¹ para el límite de cuantificación, esto debido a que en nuestra investigación se trabajó con concentraciones menores.

3.2. Realización del teñido de distintas fibras de alpaca por el método de agotamiento convencional y aplicando el método de ultrasonido

3.2.1. Acondicionamiento de la muestra textil

Se adquirió 3 clases de fibras de alpaca; Huarizo, Fleece y Baby de una empresa local, como se muestra en la Figura 17.



Figura 17. Fibras de alpaca: Huarizo (izquierda), Fleece (medio), Baby (derecha).

Nota: Elaboración propia

Como se puede observar en la Figura 18, las condiciones de lavado, enjuague y secado fueron las mismas para las 3 clases. Las fibras no se mezclaron en el proceso de acondicionamiento.

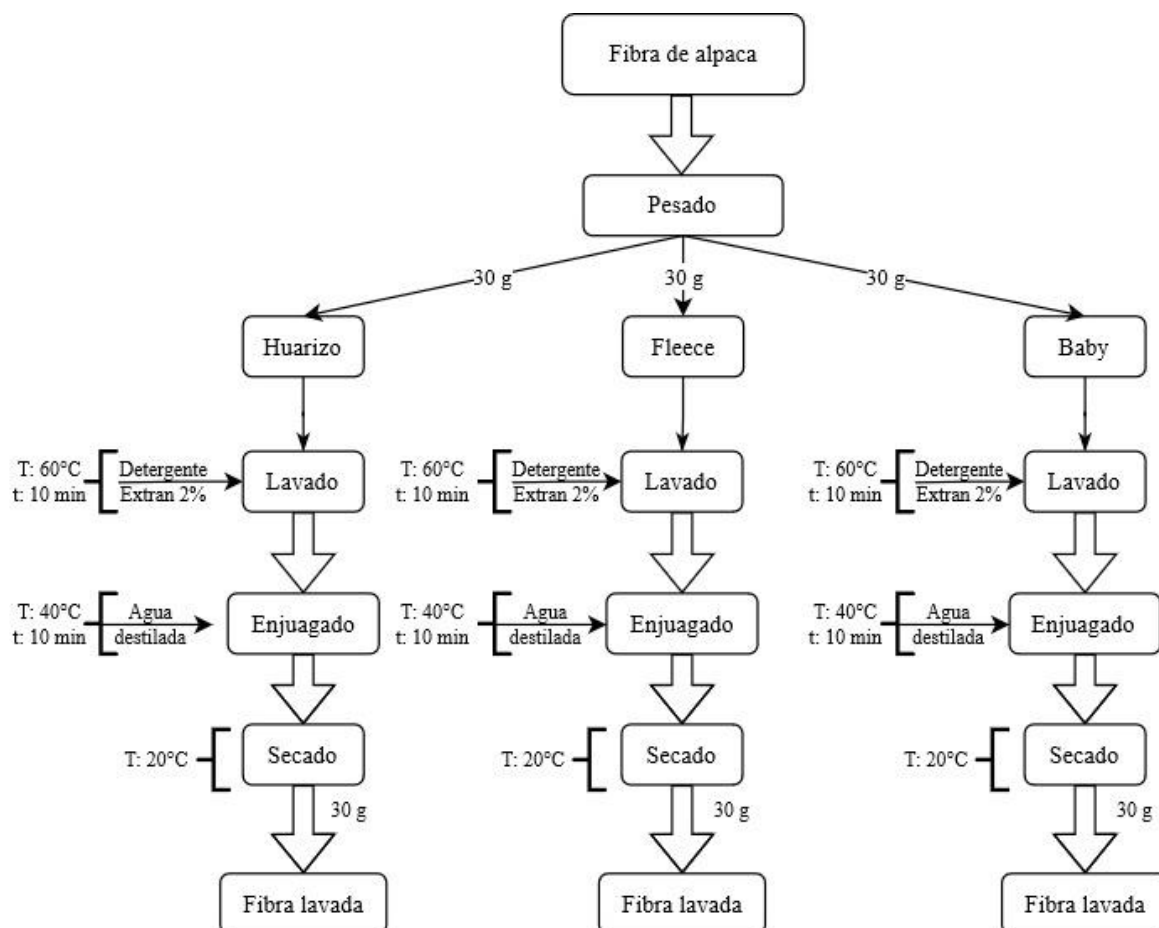


Figura 18. Esquema del acondicionamiento de las fibras de alpaca.

Nota: Elaboración propia

En el lavado de las tres fibras el agua se cambió para cada fibra, como se muestra en la Figura 19.



Figura 19. Lavado y enjuague de fibra de alpaca antes del teñido.

Nota: Elaboración propia

3.2.2. Preparación del colorante

Se preparó una solución de 1 L a 1400 y 450 ppm de Rojo Synozol K3BS y Azul Novacron FN-BN respectivamente. El esquema para obtener la solución madre de los colorantes se muestra en la Figura 20.

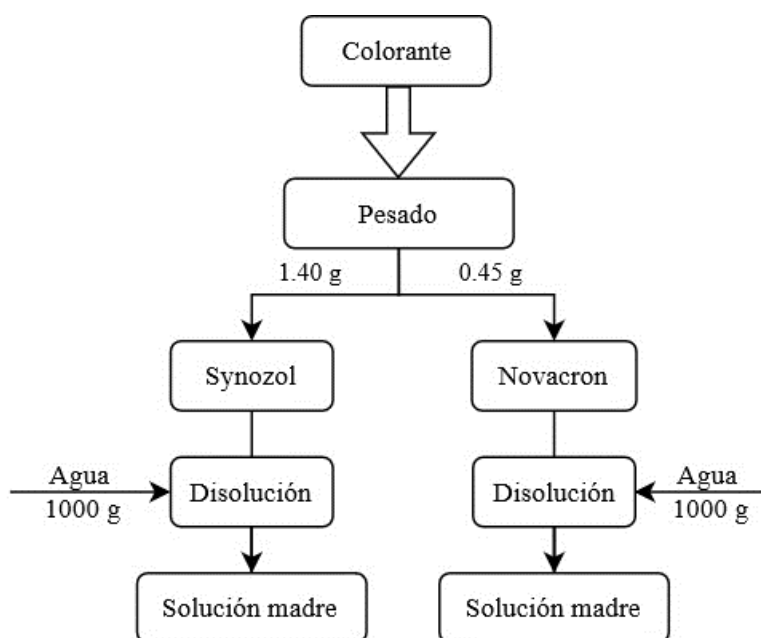


Figura 20. Esquema de la preparación de los colorantes.

Nota: Elaboración propia

La solución de los colorantes se homogenizó primero en una fiola de 1 L para luego trasvasarlos a recipientes de plástico de la misma capacidad y ser homogeneizados una vez más (Figura 21).

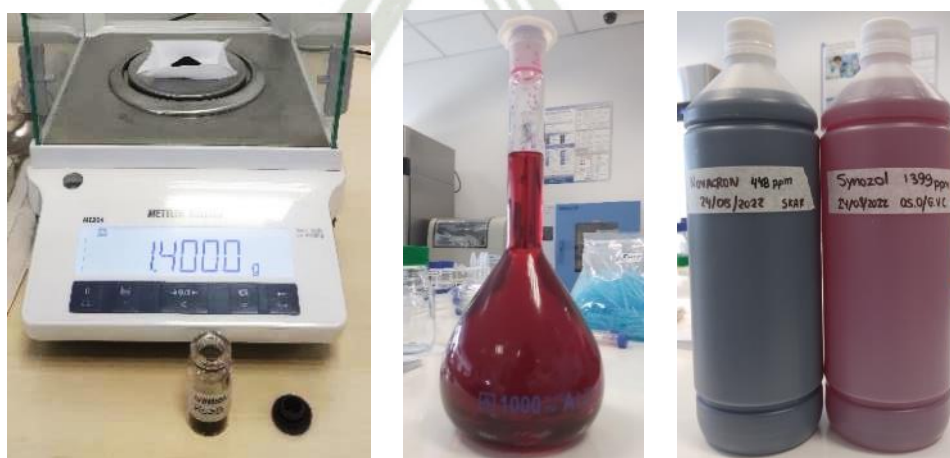


Figura 21. Preparación de la solución madre de los colorantes.

Nota: Elaboración propia

Para conocer la verdadera concentración de los colorantes se tomó una alícuota de 100 μL y se enrasó con agua destilada en una fiola de 10 mL. La Tabla 19 presenta las absorbancias del triplicado, se calculó una absorbancia promedio y esta se reemplazó en la ecuación de la Tabla 15, tomando en cuenta la dilución realizada. La verdadera concentración de la solución madre de Rojo Synozol K3BS y Azul Novacron FN-BN fue de 1393.66 y 442.09 ppm respectivamente.

Tabla 19. Medición de la concentración de la solución madre de teñido de los colorantes.

Colorante	Absorbancia				Concentración (mg.L^{-1})
	1	2	3	Promedio	
Rojo Synozol K3BS	0.294	0.292	0.293	0.293	1393.66
Azul Novacron FN-BN	0.129	0.130	0.126	0.130	442.09

Nota: Elaboración propia

3.2.3. Teñido por agotamiento convencional

Como se mencionó en el punto 2.3.2.3 el alumbre y ácido cítrico se homogeneizaron con la solución madre de los colorantes, en la Figura 22 se muestra una imagen representativa.



Figura 22. Preparación de la solución de teñido para el método convencional.

Nota: Elaboración propia

El baño María se preparó colocando una olla con agua en una de las hornillas de la cocinilla, la cual se ajustó a su máxima capacidad. Para mantener constante el nivel de agua del baño María, en la otra hornilla se colocó otra olla con agua calentando, se trasvasó agua hirviendo

de la olla de reserva a la olla del baño. Se usó 2 soportes universales que sostengan los matraces y no tengan contacto directo con la superficie de la olla y mantener homogéneo el baño. Para evitar la evaporación de la solución mordentada del colorante se colocaron tapas a los matraces (Figura 23). El cronometraje del teñido empezó al sumergir completamente la fibra. Cada 5 minutos se transfirió empleando una micropipeta una alícuota del baño de teñido a las fiolas, se enrasó y homogeneizó con agua destilada. Cumplido el tiempo de teñido, la fibra se retiró con ayuda de una pinza. La fibra se enjuagó con agua de caño a chorro y se secó a temperatura ambiente.



Figura 23. Teñido convencional de fibra de alpaca.

Nota: Elaboración propia

Una vez finalizado el teñido se extrajo la fibra del matraz y se secó a temperatura ambiente. El producto final se muestra en la Figura 24.



Figura 24. Producto final del teñido por agotamiento.

Nota: Elaboración propia

3.2.4. Aplicación del método de ultrasonido en el teñido de fibras de alpaca

Se mantuvo la proporción de mordientes y volumen de colorante con respecto al peso de la fibra, en la Figura 25 se muestra una imagen ilustrativa.



Figura 25. Preparación de la solución de teñido para el método con ultrasonido.

Nota: Elaboración propia

Como se mencionó en la metodología, el teñido con ultrasonido se llevó a cabo en el baño de ultrasonido, el proceso de agotamiento fue igual al del teñido convencional. El baño de ultrasonido permitió programar y mantener constante las temperaturas (Figura 26) ya mencionadas en el punto 2.3.2.4.



Figura 26. Teñido asistido con ultrasonido de fibra de alpaca.

Nota: Elaboración propia

3.3. Determinación de la concentración de los colorantes azoicos en los distintos métodos de teñido por espectrofotometría UV-Visible

Como se mencionó en el punto 2.3.3, en el apartado de metodología, se tomaron alícuotas del baño de teñido y se enrasaron en las fiolas, esto para que se encuentren dentro del rango cuantificable de las gráficas de calibración. Se transfirió el volumen de las fiolas a las celdas para medir su absorbancia (Figura 27).

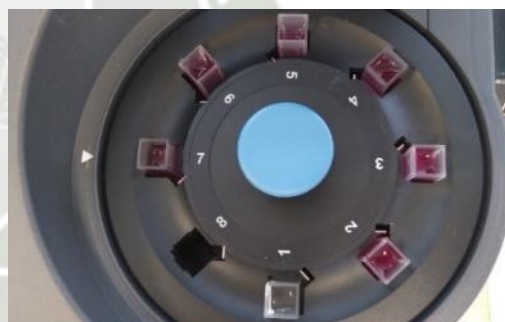


Figura 27. Medición de la absorbancia de la cinética del teñido.

Nota: Elaboración propia

Las lecturas de absorbancia de la cinética del teñido con US a 60, 70 y 80 °C y el teñido CN de las fibras Baby, Fleece y Huarizo en unidades de concentración (mg.L^{-1}) se encuentran en la sección de ANEXOS y están organizadas por fibra. Se promediaron las tres absorbancias y se calculó su desviación estándar ($\bar{X} \pm \text{DS}$). La absorbancia promedio se convirtió a unidades de concentración de la siguiente forma:

Para Rojo Synozol K3BS:

$$\text{Concentración} = (\text{Absorbancia} - 0.0073) * 5\text{mL} / (0.0205 * 0.1\text{mL})$$

Para Azul Novacron FN-BN:

$$\text{Concentración} = (\text{Absorbancia} - 0.0051) * 5\text{mL} / (0.0278 * 0.2\text{mL})$$

Estas fórmulas son la ecuación lineal de la gráfica de calibración de los colorantes (Tabla 17) multiplicada por su factor de dilución.

Para analizar la cinética de teñido, decidimos convertir las unidades de concentración a porcentaje de agotamiento (Figura 28) debido a que el porcentaje de agotamiento proporciona una medida más significativa y comprensible del grado de agotamiento del colorante en comparación con la concentración absoluta. Adicionalmente, el cambio de unidades se basa en investigaciones previas en el campo de ultrasonido, investigaciones realizadas por Babar y colaboradores¹⁰, Tissera y colaboradores¹²⁶, Udrescu y colaboradores²⁰, Atav y Yurdakulu¹²⁷, entre otros autores que han trabajado en el teñido de fibras por ultrasonido, han utilizado el porcentaje de agotamiento como medida de referencia en investigaciones similares. Al seguir esta práctica, podemos asegurar que nuestros resultados sean coherentes con la literatura existente y facilitar la comparación con investigaciones previas.

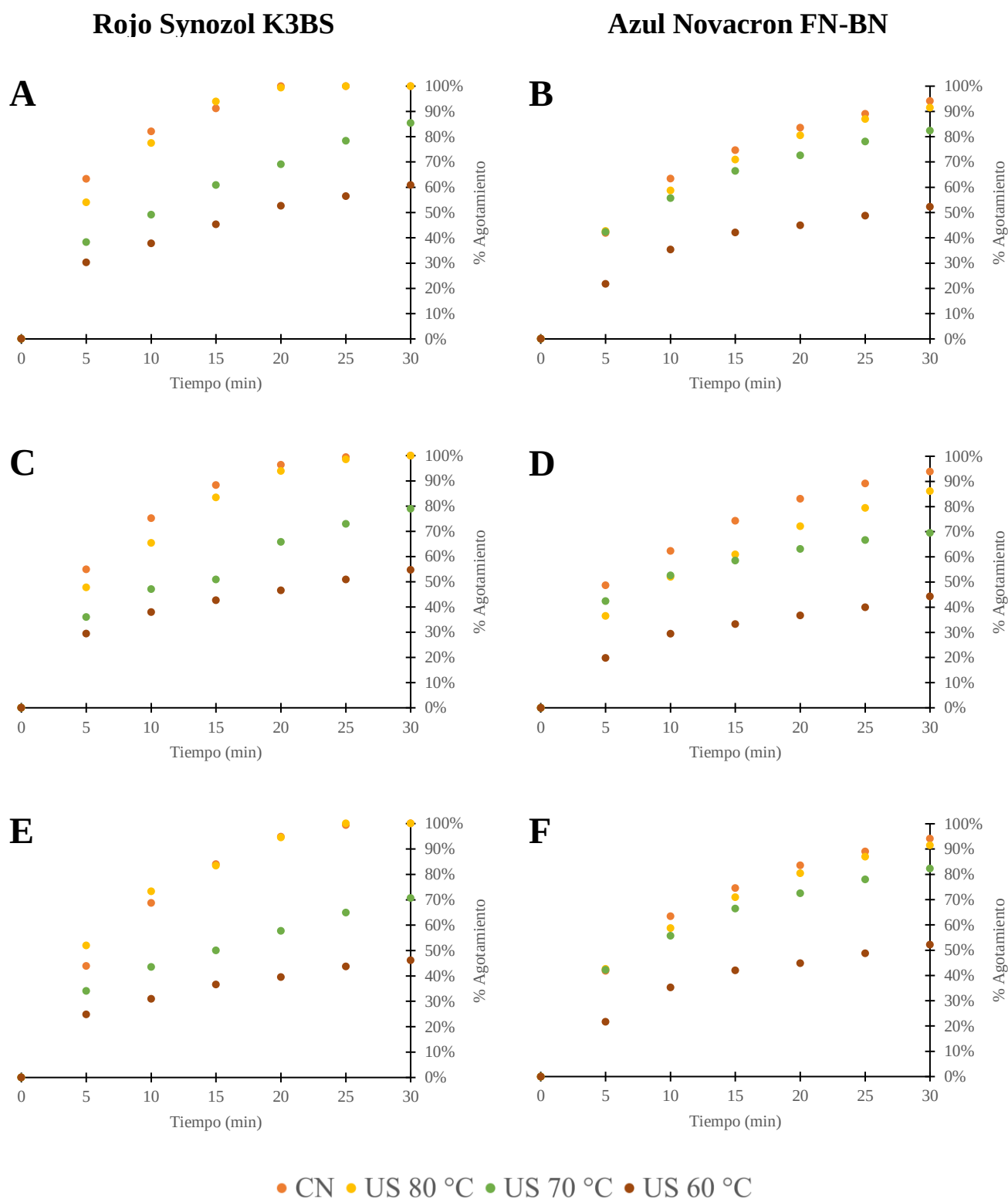


Figura 28. Porcentaje de agotamiento del proceso asistido por ultrasonido (US) a diferentes temperaturas y el proceso convencional (CN). Fibra Baby (A-B), Fleece (C-D) y Huarizo (E-F) teñidas con Rojo Synozol K3BS y Azul Novacron FN-BN.

Nota: Elaboración propia

En la Figura 28 se presentan las gráficas de los resultados de porcentaje de agotamiento del teñido de las fibras Baby, Fleece y Huarizo con los colorantes Rojo Synozol K3BS y Azul Novacron FN-BN, del proceso convencional a 92°C y ultrasonido a 60, 70 y 80°C. De manera evidente, se puede apreciar que existen diferencias en cuanto la comparación entre fibras, colorantes y el método aplicado.

Al comparar los dos colorantes utilizados, se observa que el colorante Rojo Synozol K3BS muestra un mayor porcentaje de agotamiento en todas las fibras en comparación con el colorante Azul Novacron FN-BN. Esto sugiere que el colorante Rojo Synozol K3BS tiene una mayor afinidad por la fibra de alpaca.

Al analizar los efectos del proceso de ultrasonido, se observa la tendencia general de aumento en el porcentaje de agotamiento a medida que progresa el tiempo, subjetivamente se observa que la fibra y la temperatura tienen efectos significativos. Para obtener conclusiones concisas acerca de las condiciones óptimas del método de ultrasonido, se muestran en el siguiente punto (3.4) los resultados del diseño factorial 3^k.

3.4. Diseño experimental para determinación de las condiciones óptimas del método de ultrasonido

Como se muestra en la Tabla 14 el diseño estuvo compuesto por las variables de temperatura y fibra, el objetivo de este análisis es identificar las variables más significativas que influyen en el porcentaje de agotamiento de los colorantes en las fibras de alpaca teñidas. A continuación, se presenta un análisis detallado de nuestras decisiones y los resultados obtenidos del software Statgraphics.

Mediante el análisis del Diagrama de Pareto (Figura 29), se identificaron las principales variables que tienen un efecto significativo en el proceso de teñido de las fibras de alpaca. La gráfica se muestra que la temperatura, fibra y la autointeracción de los niveles de la temperatura tienen un efecto significativo en incrementar el agotamiento.

La barra correspondiente a la temperatura es considerablemente más alta que la barra de la calidad de la fibra, lo que indica que la temperatura tiene un efecto mucho más pronunciado en el porcentaje de agotamiento.

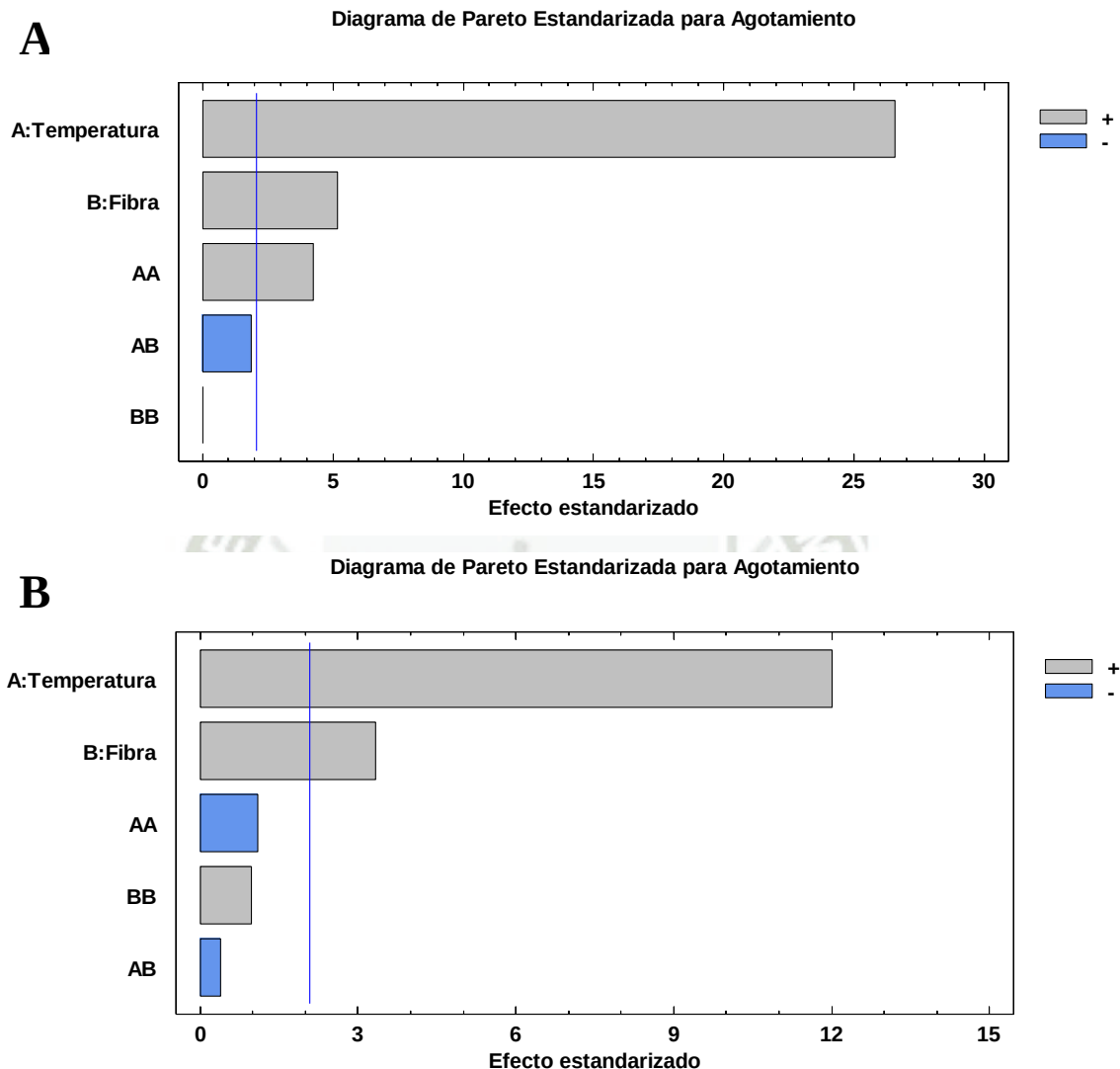


Figura 29. Gráfica de Pareto de Rojo Synozol K3BS (A) y Azul Novacron FN-BN (B).

Nota: Elaboración propia

La gráfica de efectos principales (Figura 30) nos indica que la temperatura y la fibra, en los niveles altos, tienen mayor efecto en el aumento del porcentaje de agotamiento.

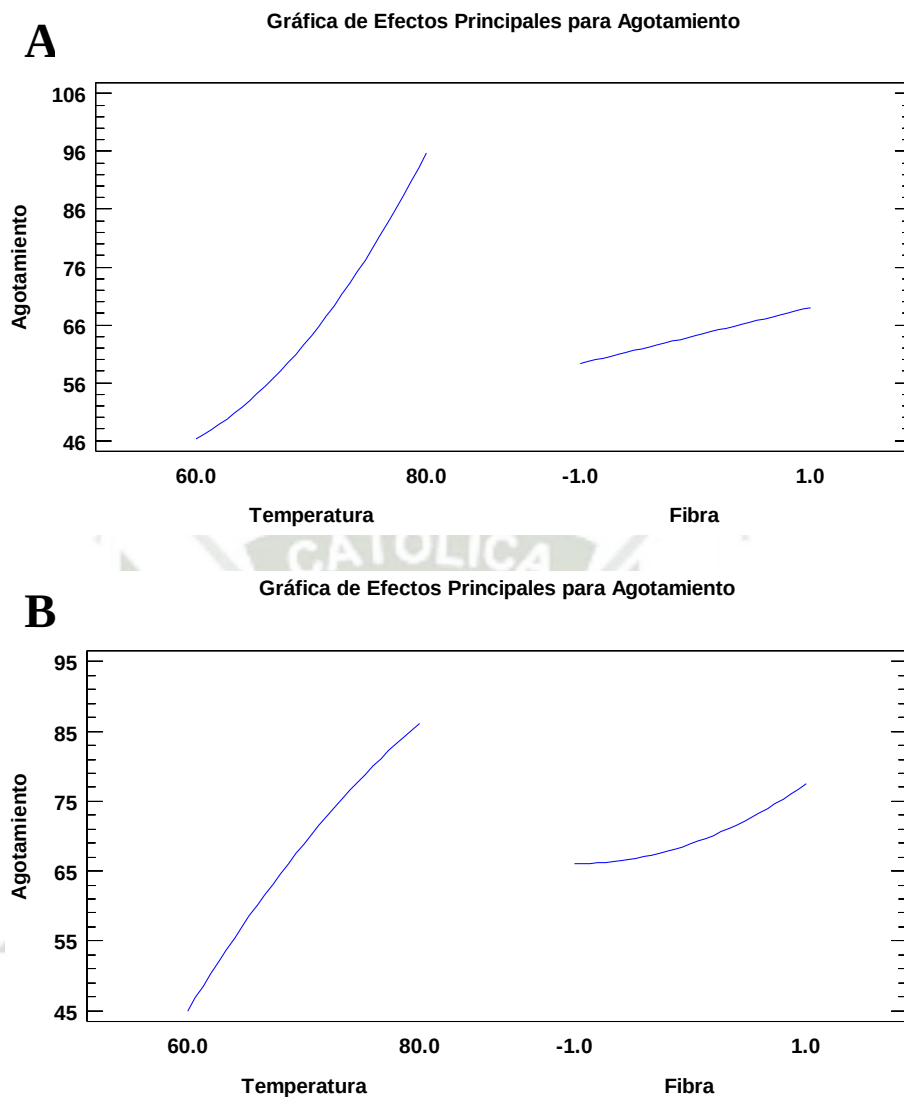


Figura 30. Gráfica de efectos principales de Rojo Synozol K3BS (A) y Azul Novacron FN-BN (B).

Nota: Elaboración propia

La Figura 31 muestra el gráfico de iso-valores obtenido en el software estadístico del cual se deduce que, para lograr la máxima degradación, se debe trabajar a una temperatura de 80°C con la fibra Baby.

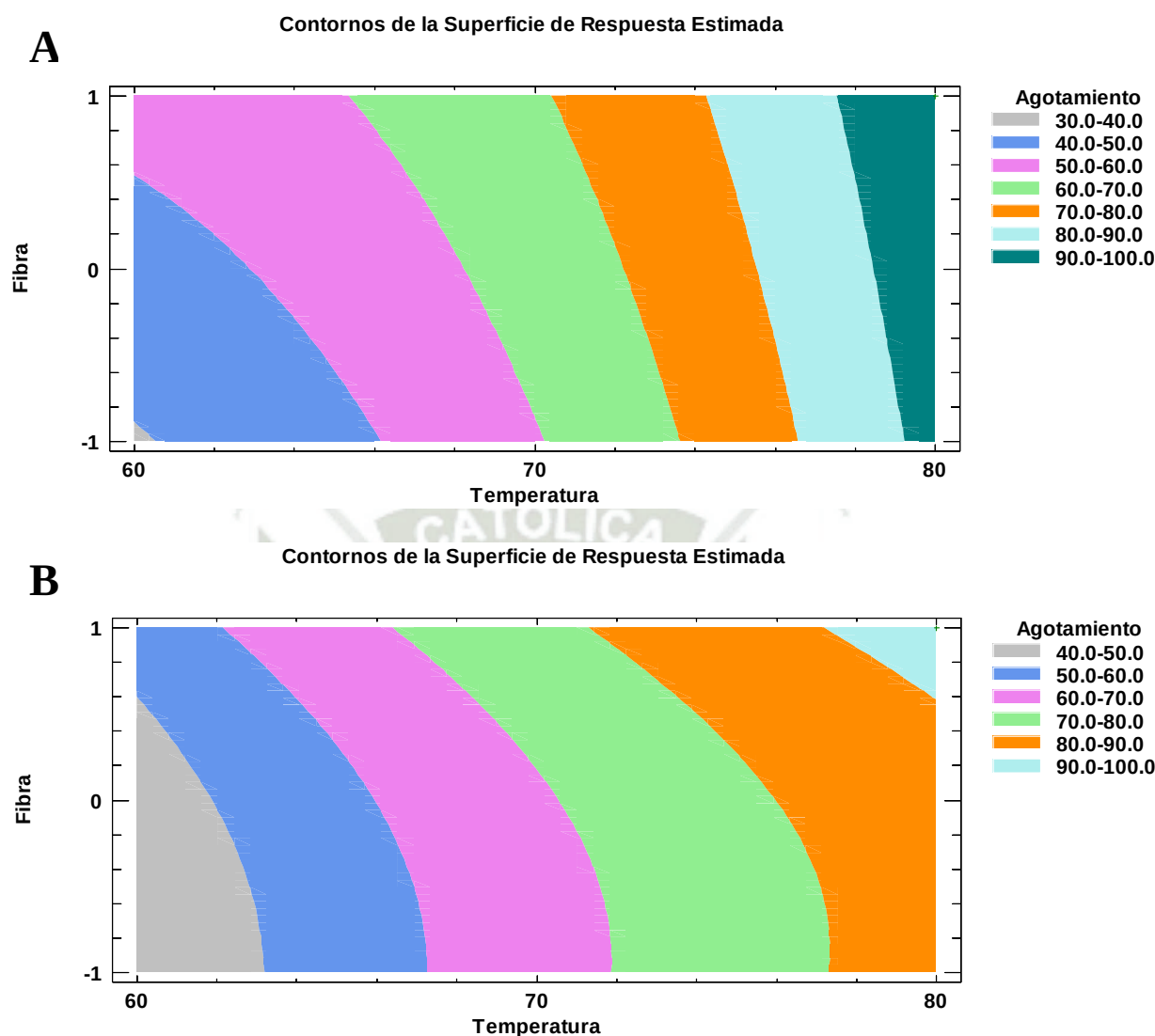


Figura 31. Gráfico de contorno de la superficie de respuesta estimada para el agotamiento de Rojo Synozol K3BS (A) y Azul Novacron FN-BN (B).

Nota: Elaboración propia

La Tabla 20 presenta los niveles de los factores experimentales que garantizan un porcentaje máximo de agotamiento, pudiéndose alcanzar hasta un 98.50 y 93.98 % de agotamiento de Rojo Synozol K3BS y Azul Novacron FN-BN, respectivamente.

Tabla 20. Parámetros para obtener el máximo porcentaje de agotamiento.

Factor	Bajo	Medio	Alto	Óptimo
Temperatura (°C)	60	70	80	80
Fibra	Huarizo	Fleece	Baby	Baby

Nota: Elaboración propia

Finalmente, se obtuvo la ecuación que gobierna este proceso (Tabla 21) basándonos en los parámetros considerados que influyen más en el agotamiento del colorante que fueron la temperatura y el tipo de fibra utilizado. Cabe recalcar que la ecuación también combina estas variables para poder ajustarse y poder así obtener una ecuación que gobierna a nuestro modelo.

Tabla 21. Coeficiente de regresión para el porcentaje de agotamiento.

Coeficiente	Estimado	
	Rojo Synozol K3BS	Azul Novacron FN-BN
constante	64.1422	-235.788
A: Temperatura	24.7778	6.6455
B: Fibra	4.84611	11.5225
AA	6.84667	-0.0327611
AB	-2.13917	-0.0830833
BB	0.025	2.92556

Nota: Elaboración propia

La ecuación del modelo ajustado es:

Para Rojo Synozol K3BS:

$$\text{Agotamiento} = 64.1422 + 24.7778 * \text{Temperatura} + 4.84611 * \text{Fibra} + 6.84667 \\ * \text{Temperatura}^2 - 2.13917 * \text{Temperatura} * \text{Fibra} + 0.025 * \text{Fibra}^2$$

Para Azul Novacron FN-BN:

$$\text{Agotamiento} = -235.788 + 6.6455 * \text{Temperatura} + 11.5225 * \text{Fibra} \\ - 0.0327611 * \text{Temperatura}^2 - 0.0830833 * \text{Temperatura} * \text{Fibra} \\ + 2.92556 * \text{Fibra}^2$$

Los resultados del diseño experimental son consistentes con lo reportado por Udrescu y colaboradores²⁰ quienes efectuaron el teñido de fibras de acetato a 60, 70 y 80 °C por ultrasonido y reportaron un mejor porcentaje de agotamiento al trabajar con la temperatura de 80°C.

Islam y Ke¹²³, compararon los métodos de tinción asistida y no asistida por ultrasonido a 60, 70 y 80 °C y también reportaron una mejor eficiencia de teñido con ultrasonido a 80°C.

Esto nos indica que la temperatura es un factor importante en el proceso de teñido y afecta el agotamiento del color en las fibras textiles. Nuestros hallazgos respaldan esta afirmación y destacan la importancia de controlar adecuadamente la temperatura en el teñido de fibras de alpaca.

Si bien la contribución de la calidad de fibra al porcentaje de agotamiento en comparación con la temperatura es relativamente menor, la calidad de la fibra también mostró un efecto significativo. Esto sugiere que, si se busca optimizar el proceso de teñido en términos de porcentaje (%) de agotamiento, es crucial enfocarse en la selección y control de la fibra y temperatura de teñido.

3.5. Análisis estadístico para comparar del método convencional y ultrasonido

Para analizar si existe diferencia entre el método convencional y asistido por ultrasonido, se hizo uso de la prueba F y t (Tabla 22), para evaluar la varianza y media aritmética entre los métodos de teñido de las fibras alpaca. Se consideraron los datos del proceso de US a 80 °C debido a que son los parámetros donde se obtiene el mayor porcentaje de agotamiento.

Debido a que la concentración a los 30 min del colorante rojo sobrepasó el límite de detección, el diseño pierde robustez si se considerara 0 mg.L⁻¹ como concentración final, por lo que, para el análisis del diseño seleccionó la concentración a los 20 minutos.

Tabla 22. Prueba *F* y *t* para la comparación del método convencional y ultrasonido a 80 °C.

<i>Baby</i>			
Rojo Synozol K3BS (% Agotamiento a los 20 minutos)		Azul Novacron FN-BN (% Agotamiento a los 30 minutos)	
US 80 °C	CN	US 80 °C	CN
100.00	100.00	92.90	93.31
100.00	100.00	91.27	93.10
97.08	98.65	90.05	95.95
F: p-valor (una cola)	0.18	F: p-valor (una cola)	0.45
t: p-valor (dos colas)	0.65	t: p-valor (dos colas)	0.09
<i>Fleece</i>			
Rojo Synozol K3BS (% Agotamiento a los 20 minutos)		Azul Novacron FN-BN (% Agotamiento a los 30 minutos)	
US 80 °C	CN	US 80 °C	CN
91.83	94.10	78.87	89.04
99.18	97.78	95.34	92.90
90.60	97.08	84.56	86.80
F: p-valor (una cola)	0.15	F: p-valor (una cola)	0.16
t: p-valor (dos colas)	0.45	t: p-valor (dos colas)	0.22
<i>Huarizo</i>			
Rojo Synozol K3BS (% Agotamiento a los 20 minutos)		Azul Novacron FN-BN (% Agotamiento a los 30 minutos)	
US 80 °C	CN	US 80 °C	CN
93.23	93.93	92.09	97.99
94.45	94.63	73.78	92.70
95.68	95.85	94.32	91.07
F: p-valor (una cola)	0.39	F: p-valor (una cola)	0.07
t: p-valor (dos colas)	0.72	t: p-valor (dos colas)	0.69

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$. *Nota:* Elaboración propia

Al realizar la comparación entre el método de ultrasonido y el método convencional en los tres diferentes tipos de fibras de alpaca, Baby, Fleece y Huarizo, se encontró un valor p mayor a 0.05 en todas las pruebas estadísticas realizadas. Esto demuestra que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la concentración de colorantes entre los métodos de teñido para ninguno de los tipos de fibras evaluados.

Babar y colaboradores¹⁰ compararon el método de teñido por agotamiento y asistido por ultrasonido en telas de lyocell y reportaron una leve mejora de agotamiento del proceso de ultrasonido sobre el convencional.

Tissera y colaboradores¹²⁶ realizaron el teñido de fibras de algodón y reportaron una superioridad del método de ultrasonido con respecto al convencional, ya que se obtuvo un 24% más de agotamiento.

Estos resultados indican que tanto el método de ultrasonido como el método convencional son igualmente efectivos en términos de agotamiento de colorante en los tres diferentes tipos de fibras de alpaca evaluados. Esto puede tener implicaciones significativas en la selección del método de teñido, ya que ambos métodos podrían ser considerados como opciones viables para la industria textil que utiliza fibras de alpaca (Figura 32).

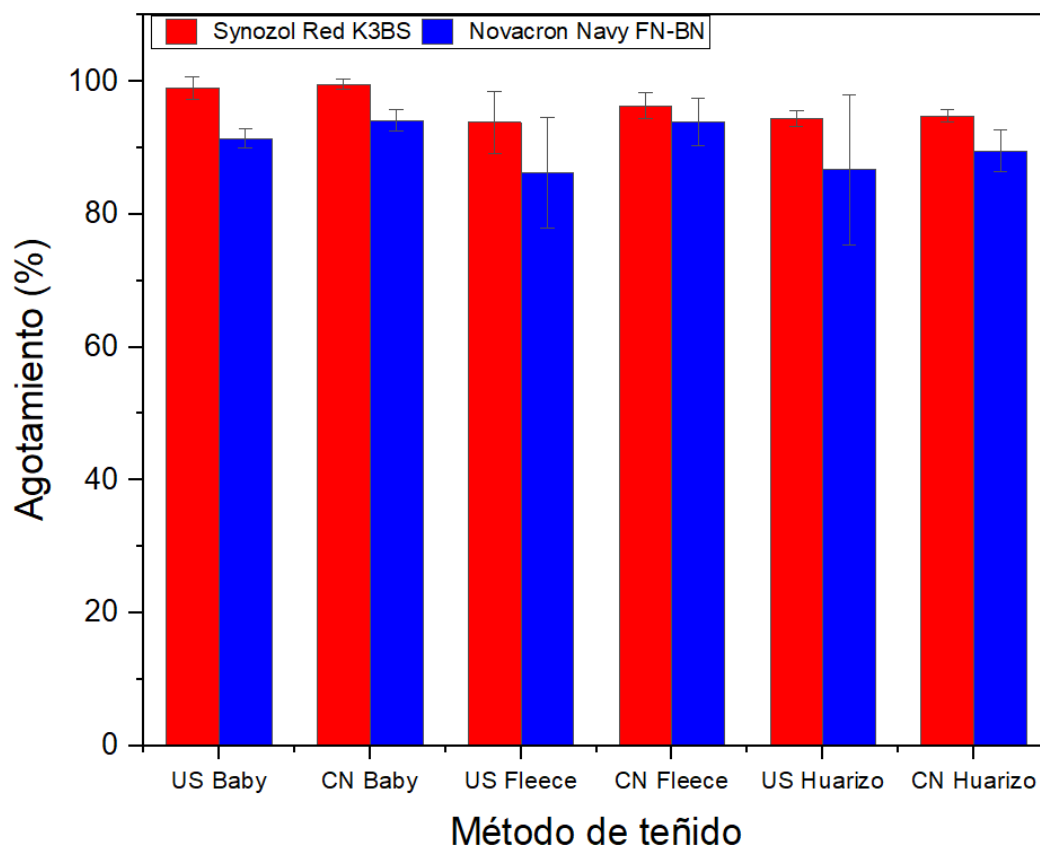


Figura 32. Porcentaje de agotamiento según el método de teñido.

Nota: Elaboración propia

3.6. Evaluación y comparación el color de las distintas fibras de alpaca mediante diversas pruebas de solidez del color

Los ensayos de solidez se realizaron comparando el método convencional con el método de ultrasonido a 80°C. Cada muestra teñida, se separó en pesos iguales de 0.1 g para las 7 pruebas, todos los parámetros de las pruebas se mantuvieron proporcionales a la muestra. A continuación, se presentan imágenes representativas de los ensayos de solidez (Figura 33).



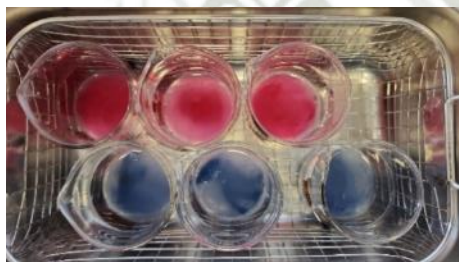
Agua



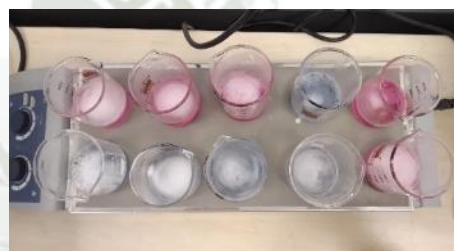
Agua caliente



Agua de mar



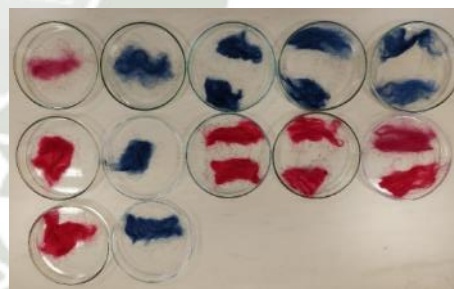
Lavado con jabón



Lavado con detergente



Ácido



Álcali

Figura 33. Pruebas de solidez al color.

Nota: Elaboración propia

3.6.1. Evaluación del cambio de color a través de imágenes digitales

Para el estudio macroscópico se realizó la toma de fotografías en un estudio fotográfico casero, todas las muestras estuvieron a 20 cm de distancia de la cámara y, se utilizó un trípode para

mantener la cámara estable (Figura 34). Los parámetros que se utilizaron en la cámara fueron los siguientes:

- ISO: 800
- Diafragma: F8
- Exposición: +2
- Obturación: 1/200



Figura 34. Estudio fotográfico empleado para las fotos macroscópicas.

Nota: Elaboración propia

Para el estudio microscópico, los parámetros utilizados para la cámara del microscopio se configuraron para que todos los parámetros se mantuvieran iguales.

Una vez terminado la sesión de fotos se procedió a realizar las pruebas de medición del color, según el principio de la ISO, la diferencia de color entre las fibras se calcula en unidades CIELAB, para después convertirse en escala de grises (Tabla 23), para ello, se realizaron ajustes previos en las imágenes.

Tabla 23. Calificación de solidez de acuerdo con el cambio de color ΔE

Diferencia de color CIELAB ΔE	Grado de solidez de la escala de grises GS
$\Delta E < 0.40$	5.0
$0.40 \leq \Delta E < 1.25$	4.5
$1.25 \leq \Delta E < 2.10$	4.0
$2.10 \leq \Delta E < 2.95$	3.5
$2.95 \leq \Delta E < 4.10$	3.0
$4.10 \leq \Delta E < 5.80$	2.5
$5.80 \leq \Delta E < 8.20$	2.0
$8.20 \leq \Delta E < 11.60$	1.5
$\Delta E \geq 11.60$	1.0

Nota: Extraído de ¹²⁸

Para las imágenes del estudio macroscópico, cada imagen se recortó en un cuadrado con una resolución de 390 x 390 píxeles (Figura 35), se consideró esta resolución abarcando el máximo tamaño posible para todas las fibras, esto para centrar mejor cada imagen y evitar errores por el bordeado de la fibra, todo este proceso también se realizó con el software “GIMP”.

Para las imágenes del estudio microscópico, cada imagen se recortó respetando la forma de la fibra, para ello, se utilizó la herramienta “Selección difusa” del software “GNU Image Manipulation Program” (GIMP) que facilitó este procedimiento.

Todas las imágenes tomadas se guardaron en formato PNG (Figura 35), ya que es un formato de imagen sin pérdidas y que nos permite quitar el fondo de la imagen para que en el análisis solo sea considerado únicamente los píxeles ya mencionados.

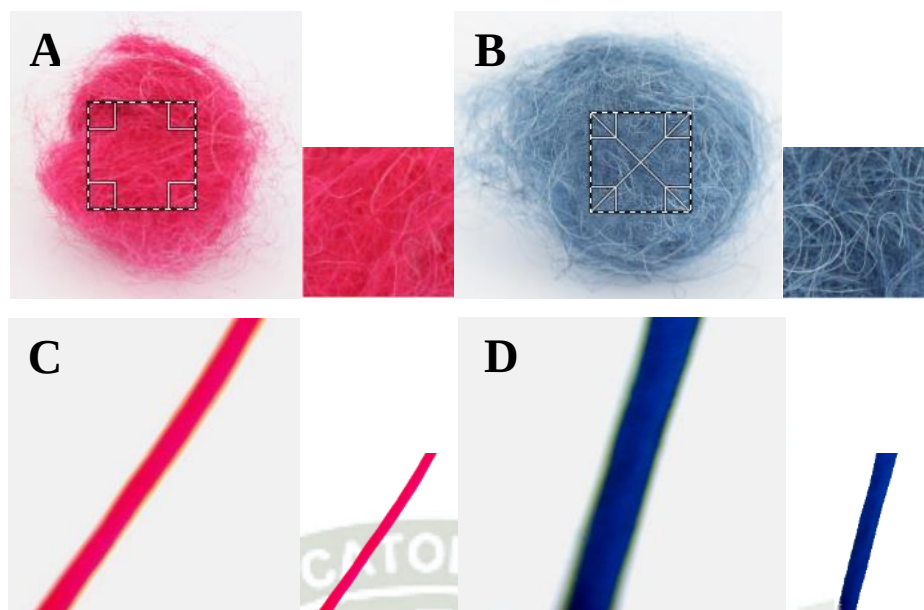


Figura 35. Recorte de las imágenes macroscópicas (A-B) y microscópicas (C-D) de Rojo Synozol K3BS y Azul Novacron FB-BN.

Nota: Elaboración propia

Posteriormente se utilizó el software 100L5 Tools¹²⁹ que cuenta con un apartado que nos permite obtener el promedio del color de una imagen en formato RGB.

Seguidamente se utilizó el software de Bruce Justin Lindbloom¹³⁰ para calcular de la diferencia de color entre un color de muestra y un color de referencia expresado como CIELAB, por ello, se realizó la conversión de imágenes que estaban en formato RGB a CIELAB y se calculó la diferencia de color expresado en (ΔE).

Tabla 24. Resultados de la evaluación macroscópica del grado de solidez del color a las diferentes pruebas.

FIBRA	MÉTODO	COLORANTE	Agua		Agua caliente		Agua de mar		Lavado con jabón		Lavado con detergente		Ácido		Álcali	
			ΔE	GS	ΔE	GS	ΔE	GS	ΔE	GS	ΔE	GS	ΔE	GS	ΔE	GS
Huarizo	CN	Rojo	0.403	5.0	0.848	4.5	4.535	2.5	2.139	3.5	3.871	3.0	2.138	4.0	1.078	4.5
		Azul	0.963	4.5	0.395	4.5	3.783	3.0	2.308	3.5	2.578	3.5	1.656	4.0	1.783	4.0
	US 80 °C	Rojo	0.671	4.5	0.671	4.5	4.149	2.5	2.328	3.5	4.610	2.5	1.809	4.0	1.244	4.5
		Azul	0.813	4.5	1.313	4.0	2.354	3.5	3.411	3.0	2.889	3.5	1.443	4.0	0.460	4.5
Fleece	CN	Rojo	0.189	5.0	1.086	4.5	2.385	3.5	2.505	3.5	4.279	2.5	1.647	4.0	1.758	4.0
		Azul	0.492	4.5	0.769	4.5	3.375	3.0	0.810	4.5	2.156	3.5	0.834	4.5	1.379	4.0
	US 80 °C	Rojo	0.679	4.5	1.132	4.5	4.524	2.5	3.178	3.0	5.225	2.5	1.207	4.5	3.917	3.0
		Azul	1.178	4.5	1.526	4.0	2.207	3.5	0.784	4.5	1.583	4.0	1.631	4.0	0.714	4.5
Baby	CN	Rojo	0.262	5.0	2.077	4.0	2.887	3.5	1.458	4.0	6.509	2.0	1.012	4.5	2.949	3.5
		Azul	1.073	4.5	1.681	4.0	1.709	4.0	1.902	4.0	5.701	2.5	1.280	4.0	3.745	3.0
	US 80 °C	Rojo	0.503	4.5	1.131	4.5	2.295	3.5	3.663	3.0	5.355	2.5	0.784	4.5	1.609	4.0
		Azul	1.092	4.5	1.395	4.0	2.941	3.5	2.238	3.5	0.722	4.5	0.880	4.5	2.064	4.0

Nota: Elaboración propia

Realizando un análisis descriptivo se puede observar bajas solideces en algunas pruebas específicas, como la solidez al lavado con jabón, lavado con detergente. Estas bajas solideces pueden deberse a diversos factores, como la interacción del colorante con los componentes presentes en los productos químicos utilizados en las pruebas de lavado y en el caso de la

solidez al agua de mar, esta adquirió otro tono más oscuro que hizo que haya diferencia en el color.

Tabla 25. Prueba t pareado para la comparación del método convencional y ultrasonido a 80 °C.

Solidez al agua							
Rojo Synozol K3BS (L*)				Azul Novacron FN-BN (L*)			
US 80 °C		CN		US 80 °C		CN	
52.11		55.62		47.87		46.41	
53.54		53.65		52.43		45.11	
52.78		54.02		53.18		45.98	
t: p-valor (dos colas)		0.25		t: p-valor (dos colas)		0.11	
Solidez al agua caliente				Solidez al agua de mar			
Rojo Synozol K3BS (L*)		Azul Novacron FN-BN (L*)		Rojo Synozol K3BS (L*)		Azul Novacron FN-BN (L*)	
US 80 °C		CN		US 80 °C		CN	
53.01		50.22		47.71		48.74	
55.73		48.49		48.52		47.23	
55.45		52.30		49.46		51.23	
t: p-valor (dos colas)		0.25		t: p-valor (dos colas)		0.64	
Solidez al lavado con jabón				Solidez al lavado con detergente			
Rojo Synozol K3BS (L*)		Azul Novacron FN-BN (L*)		Rojo Synozol K3BS (L*)		Azul Novacron FN-BN (L*)	
US 80 °C		CN		US 80 °C		CN	
50.35		49.63		52.03		52.95	
47.24		46.62		51.06		48.65	
50.54		52.89		49.56		50.27	
t: p-valor (dos colas)		0.77		t: p-valor (dos colas)		0.83	

Solidez al ácido				Solidez al álkalí			
Rojo Synozol K3BS (L*)		Azul Novacron FN- BN (L*)		Rojo Synozol K3BS (L*)		Azul Novacron FN- BN (L*)	
US 80 °C	CN	US	CN	US 80 °C	CN	US 80 °C	CN
51.03	54.92	51.32	47.64	48.91	53.72	50.14	52.17
56.55	56.98	47.44	49.95	55.62	49.96	50.14	45.09
53.96	55.27	52.01	43.53	48.12	51.93	48.17	49.12
t: p-valor (dos colas)		t: p-valor (dos colas)		t: p-valor (dos colas)		t: p-valor (dos colas)	
0.21		0.42		0.80		0.78	

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$. *Nota:* Elaboración propia

En la Tabla 25 se muestra la prueba t de pareado, que se realizó con el objetivo de comparar estadísticamente la solidez entre el método de ultrasonido y el método convencional en el teñido de fibras de alpaca, los resultados obtenidos revelaron un valor p mayor a 0.05. Esta observación sugiere que no hay una diferencia estadísticamente significativa en términos de solidez entre ambos métodos.

Esto indica que el uso del ultrasonido como método alternativo en el teñido de fibras de alpaca no compromete la solidez del color en comparación con el proceso convencional.

Por consiguiente, estos resultados indican que el proceso de teñido con ultrasonido puede considerarse una alternativa viable al proceso convencional en términos de solidez del color.

Cabe recalcar que el proceso de ultrasonido se realizó a una temperatura de 80°C a comparación del método convencional que trabajó a 92°C, la disminución de 12 grados centígrados en la temperatura de trabajo se traduce en ahorros de energía durante la operación del método de ultrasonido. Esto no solo puede tener un impacto positivo en los costos de producción, sino también en la reducción de la huella ambiental asociada con el consumo de energía. La eficiencia energética es una preocupación creciente en la industria textil, y la capacidad de representar buenos resultados de teñido y solidez a una temperatura más baja puede ser un

factor determinante en la elección de métodos de teñido, evidentemente es preciso realizar un análisis concreto para determinarlo.

Adicionalmente, la disminución de temperatura puede tener beneficios adicionales, como la prolongación de la vida útil de los equipos de teñido, la reducción de la exposición a temperaturas de ebullición para los trabajadores si se habla a escala industrial, la reducción de daños a la estructura de la fibra y una disminución del impacto ambiental al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la generación de energía.

Es importante resaltar que nuestras conclusiones se basan en las pruebas realizadas específicamente en fibras de alpaca. Sin embargo, es posible que los resultados puedan variar según el tipo de fibra y las condiciones de teñido específicas. Por lo tanto, recomendamos realizar estudios adicionales que investiguen la solidez del color en otras fibras y contextos específicos de aplicación.

En resumen, nuestros hallazgos indican que el teñido de fibras de alpaca utilizando ultrasonido como método alternativo presenta resultados de solidez del color comparables al proceso convencional. En este contexto, el teñido por ultrasonido de fibras de alpaca ofrece ventajas potenciales, ya que al considerar que ambos procesos son similares, el proceso de US resulta en ahorros significativos en términos de energía (12°C) en comparación con el proceso CN, lo cual también supone una reducción considerable de tiempo si se trabaja a condiciones similares de temperatura, esto respalda el uso de energía US como una alternativa al teñido convencional de fibras de alpaca.

CONCLUSIONES

PRIMERA

Se logró validar el método analítico y obtener la gráfica de calibración con la ecuación de la recta para la determinación del colorante Rojo Synozol K3BS; $y = 0.0205x + 0.0073$ con LOD y LOQ de 0.19 y 0.32 mg.L⁻¹ respectivamente y para el colorante Azul Novacron FN-BN; $y = 0.02078 + 0.0051$ con LOD y LOQ de 0.11 y 0.21 mg.L⁻¹ respectivamente. Ambos colorantes mostraron un r^2 cercano a la unidad, lo cual indica una excelente correlación lineal entre absorbancia y concentración.

SEGUNDA

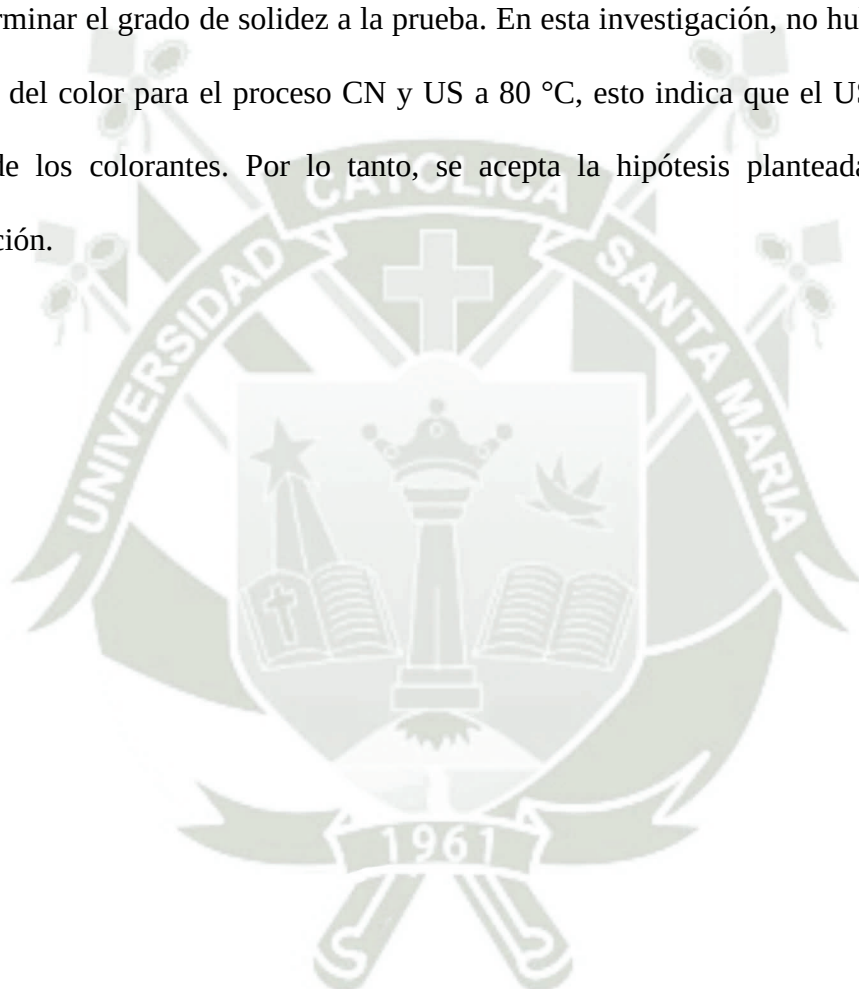
Se obtuvo las fibras teñidas de las tres calidades por el método convencional a 92 °C y ultrasonido con valores de temperatura de 60, 70 y 80 °C por un tiempo de 30 minutos. Se realizó el diseño experimental el cual nos permitió poder encontrar los parámetros óptimos para el teñido con ultrasonido que fueron: 80 °C de temperatura y calidad de fibra Baby, así mismo se realizó la prueba F y t comparando el proceso de ultrasonido con el convencional el cual dio como resultado un valor p mayor a 0.05 en todas las fibras, lo cual indica que no hay diferencia al trabajar con ambos procesos.

TERCERA

Se logró determinar la concentración de ambos colorantes en los distintos métodos de teñido por espectrofotometría UV-Visible, lo cual respalda el uso de esta técnica para determinar la absorción del color en la fibra. En el agotamiento de los colorantes hubo diferencia en ambos procesos de teñido, el colorante Rojo Synozol K3BS alcanzó el máximo agotamiento utilizando más concentración de colorante en las fibras evaluadas, en comparación con el colorante Azul Novacron FN-BN en las condiciones óptimas, lo cual pudo deberse a una mayor afinidad del Rojo Synozol K3BS hacia las fibras de alpaca.

CUARTA

Se logró evaluar la diferencia de color de las fibras tras someterlas a diversas pruebas de solidez. El análisis microscópico mostró disparidad del color en las fibras debido a su morfología, por lo que no se recomienda evaluar la solidez por este medio. Sin embargo, el método de imágenes digitales es aplicable para evaluar el cambio de color macroscópicamente para determinar el grado de solidez a la prueba. En esta investigación, no hubo diferencias en la solidez del color para el proceso CN y US a 80 °C, esto indica que el US no perjudica la fijación de los colorantes. Por lo tanto, se acepta la hipótesis planteada en la presente investigación.



RECOMENDACIONES

Evaluar el teñido de fibras utilizando la técnica de ultrasonido y evaluando distintos colorantes naturales y sintéticos.

Evaluar el efecto del ultrasonido en diversas fibras de alpaca con distintas frecuencias de ultrasonido.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Khatri A, Peerzada MH, Mohsin M, White M. A review on developments in dyeing cotton fabrics with reactive dyes for reducing effluent pollution. *Journal of Cleaner Production*. 2015;87:50-7.
2. Burkinshaw SM, Salihu G. The role of auxiliaries in the immersion dyeing of textile fibres: Part 3 theoretical model to describe the role of inorganic electrolytes used in dyeing cellulosic fibres with direct dyes. *Dyes and Pigments*. 2019;161:546-64.
3. Ozturk E, Cinperi NC, Kitis M. Improving energy efficiency using the most appropriate techniques in an integrated woolen textile facility. *Journal of Cleaner Production*. 2020;254:120145.
4. Yildiz E, Boztepe H. Synthesis of novel acidic mono azo dyes and an investigation of their use in the textile industry. *Turkish Journal of Chemistry*. 2002;26(6):897-904.
5. Castañeda Yapura SV, Cáceres Sáenz R, Peña Soria D. Tejiendo la vida. Los textiles en Q'ero. In: Ministerio de Cultura, editor. 2019.
6. La casa de la Alpaca. La alpaca de raza Huacaya [Available from: <https://lacasadelaalpaca.com/2018/04/02/la-alpaca-de-raza-huacaya/>].
7. Sucasaca Quispe A, Guevara Garnica ED. Teñido de hilado de alpaca utilizando pigmento extraído de la col morada (*Brassica oleracea* var. capitata f. rubra). *Revista de innovación y transferencia productiva* [Internet]. 2022; 2(1):[e004 p.]. Available from: <https://revistas.itp.gob.pe/index.php/ritp/article/view/23>.
8. Hassan MM, Saifullah K. Ultrasound-assisted pre-treatment and dyeing of jute fabrics with reactive and basic dyes. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018;40:488-96.
9. Larik SA, Khatri A, Ali S, Kim SH. Batchwise dyeing of bamboo cellulose fabric with reactive dye using ultrasonic energy. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2015;24:178-83.
10. Babar AA, Bughio NU, Peerzada MH, Naveed T, Dayo AQ. Exhaust reactive dyeing of lyocell fabric with ultrasonic energy. *Ultrason Sonochem*. 2019;58:1-8.
11. Babar AA, Peerzada MH, Jhatial AK, Bughio NU. Pad ultrasonic batch dyeing of causticized lyocell fabric with reactive dyes. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2017;34:993-9.
12. Ahmed NSE, El-Shishtawy RM, Kamel MM. Ultrasound assisted pre-treatment and dyeing of linen fibres with reactive dyes. *Pigment & Resin Technology*. 2007;36(6):363-72.

13. Babaei Golshan Abadi S, Yazdanshenas ME, Khajavi R, Rashidi A, Varsei M. Ultrasound-assisted of poly (trimethylene terephthalate) dyeing with nano-disperse blue 79: isotherms, kinetics, and thermodynamics insights. *The Journal of The Textile Institute*. 2021;112(9):1367-76.
14. Gonzalez V, Wood R, Lee J, Taylor S, Bussemaker MJ. Ultrasound-enhanced hair dye application for natural dyeing formulations. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019;52:294-304.
15. Kamel MM, El Shishtawy RM, Hanna HL, Ahmed NSE. Ultrasonic-assisted dyeing: I. Nylon dyeability with reactive dyes. *Polymer International*. 2003;52(3):373-80.
16. Kamel MM, El Shishtawy RM, Yussef BM, Mashaly H. Ultrasonic assisted dyeing: III. Dyeing of wool with lac as a natural dye. *Dyes and Pigments*. 2005;65(2):103-10.
17. Kamel MM, Helmy HM, Mashaly HM, Kafafy HH. Ultrasonic assisted dyeing: Dyeing of acrylic fabrics C.I. Astrazon Basic Red 5BL 200%. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2010;17(1):92-7.
18. Khatri M, Hussain N, El-Ghazali S, Yamamoto T, Kobayashi S, Khatri Z, et al. Ultrasonic-assisted dyeing of silk fibroin nanofibers: an energy-efficient coloration at room temperature. *Applied Nanoscience*. 2020;10(3):917-30.
19. Khatri Z, Memon MH, Khatri A, Tanwari A. Cold Pad-Batch dyeing method for cotton fabric dyeing with reactive dyes using ultrasonic energy. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2011;18(6):1301-7.
20. Udrescu C, Ferrero F, Periolatto M. Ultrasound-assisted dyeing of cellulose acetate. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2014;21(4):1477-81.
21. Ministerio de Agricultura y Riego. Potencial Productivo y Comercial de la Alpaca. 2019.
22. Mamani Quispe Y. Evaluación de la producción y calidad de fibra de Alpaca Huacaya (Vicugna pacos) en la comunidad originaria Chacaltaya. *Apthapi*. 2020;6(3):2027-43.
23. Ortiz Alfaro C. Aplicación de la técnica del ADN polimorfico amplificado al Azar (RAPD) en el estudio molecular de Lama pacos 2004.
24. Burga M, Chavez WR. Lanas y capital mercantil en el sur: Instituto de Estudios Peruanos; 1981.
25. Bustinza Choque AV, Machaca Machaca V, Cano Fuentes VR, Quispe Coaquira JE. Evolución y desarrollo de las razas de Alpaca: Suri y Huacaya. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú [Internet]*. 2021; 32(5):[e19876 p.].

26. El Perú es la primera potencia mundial en producción de fibra de alpaca [press release]. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2019.
27. Hoffman E, Fowler ME. The alpaca book. California: Clay Press Inc.; 1995.
28. McGregor BA. Production, attributes and relative value of alpaca fleeces in southern Australia and implications for industry development. Small Ruminant Research. 2006;61(2-3):93-111.
29. Franco M, Pezo D, García W, Franco F. Manual de juzgamiento de alpacas y llamas. 2009.
30. Renieri C, Valbonesi A, La Manna V, Antonini M, Asparrin M. Inheritance of Suri and Huacaya type of fleece in Alpaca. Italian Journal of Animal Science. 2009;8(1):83-91.
31. Quispe EC, Rodríguez TC, Iñiguez LR, Mueller JP. Producción de fibra de alpaca, llama, vicuña y guanaco en Sudamérica. Animal Genetic Resources Information. 2009;45:1-14.
32. Pineda Serna L, Jara M. Prospectiva y vigilancia tecnológica en la cadena fibra-textil-confecciones. Mapa tecnológico estratégico, nuevos escenarios para el futuro de la cadena productiva fibra textil confección de Colombia: Universidad del Rosario; 2010.
33. Gegner L, Sharp H. Llamas and Alpacas on the Farm. 2000.
34. Wang X, Wang L, Liu X. The Quality and Processing Performance of Alpaca Fibres: Rural Industries Research and Development Corporation (RIRDC); 2003.
35. Azabache Alvarado DA, Campero Flórez JA, Gallardo Sigvas AR, Ramirez Abad A. Análisis de la evolución de la fibra de alpaca peruana del 2010 al 2019: Universidad de Lima; 2021.
36. Quispe Peña EC, Poma Gutiérrez AG, Purroy Unanua A. Características productivas y textiles de la fibra de alpacas de raza huacaya. Revista Complutense de Ciencias Veterinarias. 2013;7(1).
37. Instituto Nacional de Estadística e Información (INEI). Resultados Definitivos: Cuarto Censo Nacional Agropecuario 2012. Lima, Perú; 2013.
38. Lukacs de Pereny M, Ramlogan R, Miozzo M. Standardization and segmented governance in the Peruvian alpaca fibre value chain. Innovation and Development. 2019;10(2):223-44.
39. Illa Ccarita CP, Tairo Huaita G. Teñido de fibra de alpaca suri (Vicugna pacos) con carmín de cochinilla (Dactylopius coccus): Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco; 2015.

40. Wang H, Liu X, Wang X. Internal structure and pigment granules in colored alpaca fibers. *Fibers and Polymers*. 2005;6(3):263-8.
41. Pinares R, Gutiérrez GA, Cruz A, Morante R, Cervantes I, Burgos A, Gutiérrez JP. Heritability of individual fiber medullation in Peruvian alpacas. *Small Ruminant Research*. 2018;165:93-100.
42. Cegarra J, Valldeperas J, Puente P. Fundamentos científicos y aplicados de la tintura de materias textiles: Universitat Politècnica de Catalunya; 1981.
43. Fisher A. Dyeing methods for wool. 1995.
44. Arango Quispe SJS. Variación del factor confort en vellones de alpaca Huacaya con relación al sexo y edad: Universidad Nacional Agraria La Molina; 2016.
45. Trejo W, Baquerizo M, Palacios G. Evaluación del diámetro, longitud y rendimiento al lavado de la fibra de vicuña en el patronato del parque de las leyendas. *Anales Científicos*. 2009;70(1):45-50.
46. Zárate Zavaleta Á. Asistencia técnica dirigida en caracterización y clasificación de fibra de alpaca. Oficina académica de extensión y proyección social (OAEPS) de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM); 2012.
47. INDECOPI. Norma Técnica Peruana 231.301:2014. Fibra de Alpaca Clasificada. Definiciones, clasificación por grupos de calidades, requisitos y rotulado.
48. Bustinza Choque AV. La alpaca, conocimiento del gran potencial andino: Universidad Nacional del Altiplano; 2001.
49. Delgado Bastidas JR. Determinar los factores cuantitativos que inciden en el teñido de la fibra de vicuña 2021.
50. Quispe Peña EC, Alfonso Ruiz L. Aportes del PROCASUD al conocimiento de la alpaca y vicuña: Universidad Nacional de Huancavelica; 2011. 195 p.
51. Rosas Espejo AI. Estudio de las principales características de la fibra de alpaca grasienta y de las condiciones de su proceso de lavado: Universidad Nacional de Ingeniería; 2010.
52. Cegarra J. Fundamentos y tecnología del blanqueo de materias textiles: Universitat Politècnica de Catalunya; 1997.
53. Gacén J. Lana. Parámetros químicos: Universitat Politècnica de Catalunya; 1984.
54. Ponce de León Caceres MM, Valdivia Cardenas MA. Optimización de los parámetros para la curva de teñido con colorantes ácidos, reactivos y complejo metálico en fibra de alpaca: Universidad Nacional de San Agustín; 2014.

55. Lockuán Lavado FE. V. La industria textil y su control de calidad. Tintorería: Licence Creative Commons; 2012.
56. Manso Martínez C. Determinación de la calidad de fibra de alpaca en huancavelica (Perú): validación de los métodos de muestreo y valoración: Universidad Pública de Navarra; 2011.
57. Adot OG. Introducción a la industrialización de la lana y las fibra especiales. Universidad Católica de Córdoba; 2010.
58. Costa MR. Las fibras textiles y su tinte. Revista de Química Textil. 2010;II.
59. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. Camélidos sudamericanos 2015 [Available from: <https://www.midagri.gob.pe/portal/datero/40-sector-agrario/situacion-de-las-actividades-de-crianza-y-produccion/298-camelidos-sudamericanos?start=18>].
60. Hollen N, Saddler J, Langford AL. Introducción a los Textiles: Limusa; 1997. 359 p.
61. Una fibra de alpaca mejorada: Asociación peruana de técnicas textiles; 2015 [Available from: <https://aptp Peru.com/una-fibra-alpaca-mejorada/>].
62. Miranda Ramos LM. Efecto del diámetro medular en el teñido en fibras de alpaca huacaya: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa; 2022.
63. Saldaña Perales LN. Categorización, clasificación y procesamiento industrial de la fibra de alpaca: Universidad Nacional Agraria La Molina; 2017.
64. Huebla Socag WK, Rea Rea JM. Industrialización, diseño y elaboración de artículos terminados con la fibra de alpaca: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo; 2019.
65. Sánchez Llanos ML. La experimentación en el tinturado natural de lana de oveja y fibra de alpaca: Universidad del Azuay; 2020.
66. Dos Santos A, Maier M. La química y color en los textiles: Universidad de Buenos Aires; 2008.
67. Macy R. Química orgánica simplificada 1975.
68. Montoya Alvarez XJ. Informe técnico diseño de colores en fibra de alpaca en un laboratorio de una empresa textil: Universidad Nacional de San Agustín; 2019.
69. Zaruma P, Proal J, Hernández IC, Salas HI. Los colorantes textiles industriales y tratamientos óptimos de sus efluentes de agua residual: una breve revisión. Revista de la Facultad de Ciencias Químicas. 2018(19):38-47.
70. Ghaly A, Ananthashankar R, Alhattab M, Ramakrishnan V. Production, characterization and treatment of textile effluents: a critical review. Journal of Chemical Engineering & Process Technology. 2014;5(1):1-19.

71. Slama HB, Chenari Bouket A, Pourhassan Z, Alenezi FN, Silini A, Cherif Silini H, et al. Diversity of Synthetic Dyes from Textile Industries, Discharge Impacts and Treatment Methods. *Applied Sciences*. 2021;11(14).
72. Barathi S, Karthik C, Nadanasabapathi S, Padikasan IA. Biodegradation of textile dye Reactive Blue 160 by *Bacillus firmus* (Bacillaceae: Bacillales) and non-target toxicity screening of their degraded products. *Toxicology Reports*. 2020;7:16-22.
73. Thakur S, Chauhan M. Treatment of dye wastewater from textile industry by electrocoagulation and Fenton oxidation: A review. *Water Quality Management*. 2018:117-29.
74. Marcano D. Introducción a la química de los colorantes. Caracas, Venezuela: Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales; 2018.
75. Burkinshaw SM, Salihu G. The role of auxiliaries in the immersion dyeing of textile fibres: Part 5 practical aspects of the role of inorganic electrolytes in dyeing cellulosic fibres with direct dyes. *Dyes and Pigments*. 2019;161:581-94.
76. Chowdhury MF, Khandaker S, Sarker F, Islam A, Rahman MT, Awual MR. Current treatment technologies and mechanisms for removal of indigo carmine dyes from wastewater: A review. *Journal of Molecular Liquids*. 2020;318:114061.
77. Paz A, Carballo J, Pérez MJ, Domínguez JM. Biological treatment of model dyes and textile wastewaters. *Chemosphere*. 2017;181:168-77.
78. Khattab TA, Abdelrahman MS, Rehan M. Textile dyeing industry: environmental impacts and remediation. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27(4):3803-18.
79. Nguyen TA, Juang RS. Treatment of waters and wastewaters containing sulfur dyes: A review. *Chemical Engineering Journal*. 2013;219:109-17.
80. dos Santos Pisoni D, de Abreu MP, Petzhold CL, Rodembusch FS, Campo LF. Synthesis, photophysical study and BSA association of water-insoluble squaraine dyes. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2013;252:77-83.
81. Salem MZ, Ibrahim IH, Ali HM, Helmy HM. Assessment of the use of natural extracted dyes and pancreatin enzyme for dyeing of four natural textiles: HPLC analysis of phytochemicals. *Processes*. 2020;8(1):59.
82. Wan Z, Jiao Y, Ouyang X, Chang L, Wang X. Bifunctional MoS₂ coated melamine-formaldehyde sponges for efficient oil–water separation and water-soluble dye removal. *Applied Materials Today*. 2017;9:551-9.

83. Zhang L, Shao Q, Xu C. Enhanced azo dye removal from wastewater by coupling sulfidated zero-valent iron with a chelator. *Journal of Cleaner Production*. 2019;213:753-61.
84. Li W, Mu B, Yang Y. Feasibility of industrial-scale treatment of dye wastewater via bio-adsorption technology. *Bioresource Technology*. 2019;277:157-70.
85. Louati I, Elloumi Mseddi J, Cheikhrouhou W, Hadrich B, Nasri M, Aifa S, et al. Simultaneous cleanup of Reactive Black 5 and cadmium by a desert soil bacterium. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2020;190:110103.
86. Singh RL, Singh PK, Singh RP. Enzymatic decolorization and degradation of azo dyes—A review. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2015;104:21-31.
87. Liu SH, Tsai SL, Guo PY, Lin CW. Inducing laccase activity in white rot fungi using copper ions and improving the efficiency of azo dye treatment with electricity generation using microbial fuel cells. *Chemosphere*. 2020;243:125304.
88. Al Tohamy R, Sun J, Fareed MF, Kenawy ER, Ali SS. Ecofriendly biodegradation of Reactive Black 5 by newly isolated *Sterigmatomyces halophilus* SSA1575, valued for textile azo dye wastewater processing and detoxification. *Scientific Reports*. 2020;10(1):12370.
89. Perng YS, Bui HM. Decolorization of Reactive Red 195 solution by electrocoagulation process. *Journal of Vietnamese environment*. 2014;5(1):22-6.
90. European Chemicals Agency (ECHA). C.I. Reactive Blue 230 [Available from: <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.100.296>].
91. Shahid M, Wertz J, Degano I, Aceto M, Khan MI, Quye A. Analytical methods for determination of anthraquinone dyes in historical textiles: A review. *Analytica Chimica Acta*. 2019;1083:58-87.
92. Gürses A, Açıkyıldız M, Güneş K, Gürses MS. Classification of Dye and Pigments. *Dyes and Pigments*. SpringerBriefs in Molecular Science: Springer; 2016. p. 31-45.
93. Novotný Č, Dias N, Kapanen A, Malachová K, Vandrovcová M, Itävaara M, Lima N. Comparative use of bacterial, algal and protozoan tests to study toxicity of azo-and anthraquinone dyes. *Chemosphere*. 2006;63(9):1436-42.
94. Cao DJ, Wang JJ, Zhang Q, Wen YZ, Dong B, Liu RJ, et al. Biodegradation of triphenylmethane dye crystal violet by *Cedecea davisae*. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2019;210:9-13.

95. Dindaş GB, Şahin Z, Cengiz Yatmaz H, İşci Ü. Cobalt phthalocyanine-TiO₂ nanocomposites for photocatalytic remediation of textile dyes under visible light irradiation. *Journal of Porphyrins and Phthalocyanines*. 2019;23(04n05):561-8.
96. Silva MC, Corrêa AD, Amorim MTSP, Parpot P, Torres JA, Chagas PMB. Decolorization of the phthalocyanine dye reactive blue 21 by turnip peroxidase and assessment of its oxidation products. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*. 2012;77:9-14.
97. Carney Almroth BM, Åström L, Roslund S, Petersson H, Johansson M, Persson NK. Quantifying shedding of synthetic fibers from textiles; a source of microplastics released into the environment. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25(2):1191-9.
98. Salvador Cesa F, Turra A, Baruque Ramos J. Synthetic fibers as microplastics in the marine environment: A review from textile perspective with a focus on domestic washings. *Science of the Total Environment*. 2017;598:1116-29.
99. Bayramoglu G, Kunduzcu G, Arica MY. Preparation and characterization of strong cation exchange terpolymer resin as effective adsorbent for removal of disperse dyes. *Polymer Engineering & Science*. 2020;60(1):192-201.
100. Al Etaibi AM, El Apasery MA. Dyeing Performance of Disperse Dyes on Polyester Fabrics Using Eco-Friendly Carrier and Their Antioxidant and Anticancer Activities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019;16(23):4603.
101. Meireles G, Daam MA, Sanches ALM, Zanoni MV, Soares AM, Gravato C, de Oliveira DP. Red disperse dyes (DR 60, DR 73 and DR 78) at environmentally realistic concentrations impact biochemical profile of early life stages of zebrafish (*Danio rerio*). *Chemico-Biological Interactions*. 2018;292:94-100.
102. Ojeda Brito GA. Teñido de fibra de abacá (*Musa textilis*) utilizando colorante extraído de la cochinilla (*Dactylopius coccus* Costa): Universidad Técnica Particular de Loja; 2012.
103. Nunes LJR, Godina R, Matias JCdO. Technological innovation in biomass energy for the sustainable growth of textile industry. *Sustainability*. 2019;11(2):528.
104. Pereira Boitano JB. Control del proceso de teñido de las fibras de algodón: Universidad Nacional de Ingeniería; 2014.
105. Septhum C. UV-Vis spectroscopic study of natural dyes with alum as a mordant. 2007.

106. Muñoz Villa A, Sáenz Galindo A, López López L, Cantú Sifuentes L, Barajas Bermúdez L. Ácido Cítrico: Compuesto Interesante Citric Acid: Interesting Compound. Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila. 2014;6(12).
107. Ciardullo SF. Principios físicos básicos del ultrasonido. 2009.
108. American Association of Textile Chemists and Colorists (AATCC). Textile Testing Materials & Educational Resources. 2023.
109. Cotton Incorporated. Colorfastness of cotton textiles. 2017.
110. American Association of Textile Chemists and Colorists (AATCC). Colorfastness to Laundering: Accelerated. AATCC Test Method 61-2010.
111. International Organization for Standardization (ISO). Textiles — Tests for colour fastness — Part E01: Colour fastness to water. ISO 105-E01:2013.
112. Solidez al agua de mar: Eurolab; [Available from: <https://www.laboratuvar.com/es/tekstil-testleri/haslik-testleri/deniz-suyu-hasligi>].
113. International Organization for Standardization (ISO). Textiles — Tests for colour fastness — Part E08: Colour fastness to hot water. ISO 105-E08:1994.
114. International Organization for Standardization (ISO). Textiles — Tests for colour fastness — Part E02: Colour fastness to sea water. ISO 105-E02:2013.
115. International Organization for Standardization (ISO). Textiles — Tests for colour fastness — Part C10: Colour fastness to washing with soap or soap and soda. ISO 105-C10:2006.
116. Obando Portillo RE. Tintura alternativa en hilos de lana con colorantes naturales: Universidad Técnica del Norte; 2013.
117. International Organization for Standardization (ISO). Textiles — Tests for colour fastness — Part E06: Colour fastness to spotting: Alkali. ISO 105-E06:2006.
118. International Organization for Standardization (ISO). Textiles — Tests for colour fastness — Part E05: Colour fastness to spotting: Acid. ISO 105-E05:2010.
119. Luo MR, Cui G, Rigg B, Dakin J. A New Method for Assessing Textile Fastness Based on Digital Imaging. Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision: Society of Imaging Science and Technology; 2004. p. 479-83.
120. Konica Minolta Sensing Americas [Internet]2020. Available from: <https://sensing.konicaminolta.us/mx/blog/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/>.
121. Ortiz Romero D, Ramírez Revilla S. Discoloration of water contaminated by the textile dye red TS3B utilizing ultraviolet radiation and ZnO as a photocatalyst. Journal of the Chilean Chemical Society. 2018;63(4):4261-4.

122. Luque Sanca AC. Tintura del algodón con colorantes reactivos por el proceso de agotamiento: Universidad Nacional de Ingeniería; 2003.
123. Islam GMN, Ke G. Ultrasonic Effects on the Kinetics and Thermodynamics of Dyeing Wool Fiber with Reactive Dye. *Fibers and Polymers*. 2020;21(5):1071-7.
124. Feuzer Matos AJ, Testolin RC, Cotelles S, Sanches-Simoes E, Pimentel Almeida W, Niero G, et al. Degradation of recalcitrant textile azo-dyes by fenton-based process followed by biochar polishing. *Journal of Environmental Science and Health Part a-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*. 2021;56(9):1019-29.
125. Revathi M, Kavitha B, Vedhi C, Senthil Kumar N. Electrochemical detection and quantification of Reactive Red 195 dyes on graphene modified glassy carbon electrode. *Journal of Environmental Science and Health, Part C: Environmental Carcinogenesis and Ecotoxicology Reviews*. 2019;37(1):42-54.
126. Tissera ND, Wijesena RN, de Silva KM. Ultrasound energy to accelerate dye uptake and dye-fiber interaction of reactive dye on knitted cotton fabric at low temperatures. *Ultrason Sonochem*. 2016;29:270-8.
127. Atav R, Yurdakul A. Ultrasonic Assisted Dyeing of Angora Fibre. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. 2016;24(5):137-42.
128. Ben F, Miled W, Haddar W, Meksi N. Clean printing process of cotton with natural dyes: Effect of paste formulation components on printing performances. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*. 2021;27(1):1-13.
129. Tools L. Image Average Color Finder [Available from: <https://10015.io/tools/image-average-color-finder>].
130. Lindbloom BJ. Color Difference Calculator [Available from: http://www.bruceindbloom.com/index.html?Eqn_DeltaE_CIE94.html].

ANEXOS

Anexo 1. Concentración residual de los colorantes en el teñido de fibra de alpaca Baby.

<i>Baby</i>										
Convencional (CN)										
t (min)	Rojo Synozol K3BS					Azul Novacron FN-BN				
	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{x} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{x} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)
5	0.314	0.178	0.159	0.217 ± 0.085	511.46	0.286	0.293	0.293	0.291 ± 0.004	257.10
10	0.190	0.074	0.067	0.110 ± 0.069	250.49	0.174	0.187	0.194	0.185 ± 0.010	161.78
15	0.123	0.022	0.029	0.058 ± 0.056	123.66	0.120	0.126	0.145	0.130 ± 0.013	112.32
20	0.006	0.005	0.015	0.009 ± 0.006	0.00	0.076	0.086	0.097	0.086 ± 0.011	72.75
25	0.001	0.001	0.001	0.001 ± 0.000	0.00	0.052	0.057	0.069	0.059 ± 0.009	48.47
30	0.002	0.002	0.002	0.002 ± 0.000	0.00	0.038	0.039	0.025	0.034 ± 0.008	25.99
Ultrasonido 80 °C										
t (min)	Rojo Synozol K3BS					Azul Novacron FN-BN				
	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{x} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{x} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)
5	0.248	0.258	0.305	0.270 ± 0.030	640.73	0.268	0.300	0.294	0.287 ± 0.017	253.51
10	0.102	0.130	0.175	0.136 ± 0.037	313.90	0.194	0.215	0.215	0.208 ± 0.012	182.46
15	0.022	0.040	0.063	0.042 ± 0.021	84.63	0.133	0.156	0.155	0.148 ± 0.013	128.51
20	0.002	0.006	0.024	0.011 ± 0.012	9.02	0.091	0.105	0.108	0.101 ± 0.009	86.24
25	0.002	0.002	0.002	0.002 ± 0.000	0.00	0.064	0.067	0.076	0.069 ± 0.006	57.46
30	0.002	0.002	0.002	0.002 ± 0.000	0.00	0.040	0.048	0.054	0.047 ± 0.007	37.68

Ultrasonido 70 °C

t (min)	Rojo Synozol K3BS					Azul Novacron FN-BN				
	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{x} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{x} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)
5	0.350	0.347	0.382	0.360 ± 0.019	860.24	0.270	0.312	0.285	0.289 ± 0.021	255.31
10	0.284	0.287	0.324	0.298 ± 0.022	709.02	0.189	0.268	0.211	0.223 ± 0.041	195.95
15	0.214	0.231	0.247	0.231 ± 0.017	545.61	0.145	0.211	0.154	0.170 ± 0.036	148.29
20	0.190	0.168	0.195	0.184 ± 0.014	430.98	0.129	0.187	0.103	0.140 ± 0.043	121.31
25	0.138	0.110	0.144	0.131 ± 0.018	301.71	0.108	0.161	0.069	0.113 ± 0.046	97.03
30	0.100	0.074	0.098	0.091 ± 0.014	204.15	0.096	0.139	0.042	0.092 ± 0.049	78.15

Ultrasonido 60 °C

t (min)	Rojo Synozol K3BS					Azul Novacron FN-BN				
	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{x} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{x} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)
5	0.408	0.424	0.387	0.406 ± 0.019	972.44	0.444	0.387	0.338	0.390 ± 0.053	346.13
10	0.385	0.355	0.349	0.363 ± 0.019	867.56	0.342	0.340	0.286	0.323 ± 0.032	285.88
15	0.329	0.322	0.308	0.320 ± 0.011	762.68	0.302	0.323	0.246	0.290 ± 0.040	256.21
20	0.264	0.303	0.266	0.278 ± 0.022	660.24	0.293	0.309	0.225	0.276 ± 0.045	243.62
25	0.251	0.278	0.238	0.256 ± 0.020	606.59	0.287	0.283	0.202	0.257 ± 0.048	226.53
30	0.233	0.242	0.219	0.231 ± 0.012	545.61	0.284	0.254	0.181	0.240 ± 0.053	211.24

Anexo 2. Concentración residual de los colorantes en el teñido de fibra de alpaca Fleece.

Fleece										
Convencional (CN)										
Rojo Synozol K3BS						Azul Novacron FN-BN				
t (min)	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{X} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{X} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)
5	0.335	0.190	0.269	0.265 $\pm$ 0.073	628.54	0.262	0.258	0.252	0.257 $\pm$ 0.005	226.53
10	0.168	0.138	0.141	0.149 $\pm$ 0.017	345.61	0.185	0.185	0.200	0.190 $\pm$ 0.009	166.28
15	0.098	0.046	0.077	0.074 $\pm$ 0.026	162.68	0.114	0.123	0.157	0.131 $\pm$ 0.023	113.22
20	0.041	0.020	0.024	0.028 $\pm$ 0.011	50.49	0.065	0.092	0.106	0.088 $\pm$ 0.021	74.55
25	0.009	0.008	0.015	0.011 $\pm$ 0.004	9.02	0.042	0.061	0.072	0.058 $\pm$ 0.015	47.57
30	0.002	0.002	0.001	0.002 $\pm$ 0.001	0.00	0.015	0.041	0.049	0.035 $\pm$ 0.018	26.89
Ultrasonido 80 °C										
Rojo Synozol K3BS						Azul Novacron FN-BN				
t (min)	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{X} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{X} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)
5	0.334	0.300	0.284	0.306 $\pm$ 0.026	728.54	0.314	0.305	0.332	0.317 $\pm$ 0.014	280.49
10	0.218	0.185	0.212	0.205 $\pm$ 0.018	482.20	0.249	0.223	0.251	0.241 $\pm$ 0.016	212.14
15	0.104	0.079	0.122	0.102 $\pm$ 0.022	230.98	0.221	0.169	0.200	0.197 $\pm$ 0.026	172.57
20	0.054	0.012	0.061	0.042 $\pm$ 0.027	84.63	0.169	0.111	0.147	0.142 $\pm$ 0.029	123.11
25	0.012	0.016	0.020	0.016 $\pm$ 0.004	21.22	0.143	0.066	0.108	0.106 $\pm$ 0.039	90.74
30	0.001	0.002	0.001	0.001 $\pm$ 0.001	0.00	0.109	0.028	0.081	0.073 $\pm$ 0.041	61.06
Ultrasonido 70 °C										
Rojo Synozol K3BS						Azul Novacron FN-BN				
t (min)	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{X} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{X} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)
5	0.362	0.389	0.369	0.373 $\pm$ 0.014	891.95	0.281	0.294	0.288	0.288 $\pm$ 0.007	254.41
10	0.281	0.322	0.328	0.310 $\pm$ 0.026	738.29	0.218	0.258	0.238	0.238 $\pm$ 0.020	209.44
15	0.330	0.265	0.269	0.288 $\pm$ 0.036	684.63	0.191	0.226	0.209	0.209 $\pm$ 0.018	183.36
20	0.186	0.209	0.213	0.203 $\pm$ 0.015	477.32	0.168	0.203	0.186	0.186 $\pm$ 0.018	162.68

25	0.147	0.159	0.180	0.162 ± 0.017	377.32	0.159	0.179	0.169	0.169 ± 0.010	147.39
30	0.117	0.127	0.139	0.128 ± 0.011	294.39	0.144	0.166	0.155	0.155 ± 0.011	134.80

Ultrasonido 60°C

Rojo Synozol K3BS						Azul Novacron FN-BN				
t (min)	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{X} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{X} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)
5	0.423	0.439	0.372	0.411 ± 0.035	984.63	0.379	0.377	0.441	0.399 ± 0.036	354.23
10	0.393	0.378	0.314	0.362 ± 0.042	865.12	0.349	0.349	0.358	0.352 ± 0.005	311.96
15	0.359	0.365	0.280	0.335 ± 0.047	799.27	0.347	0.320	0.332	0.333 ± 0.014	294.87
20	0.338	0.351	0.251	0.313 ± 0.054	745.61	0.329	0.297	0.323	0.316 ± 0.017	279.59
25	0.316	0.320	0.229	0.288 ± 0.051	684.63	0.321	0.279	0.299	0.300 ± 0.021	265.20
30	0.285	0.308	0.205	0.266 ± 0.054	630.98	0.291	0.265	0.281	0.279 ± 0.013	246.31

Anexo 3. Concentración residual de los colorantes en el teñido de fibra de alpaca Huarizo.

Huarizo										
Convencional (CN)										
Rojo Synozol K3BS						Azul Novacron FN-BN				
t (min)	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{X} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{X} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)
5	0.312	0.280	0.393	0.328 ± 0.058	782.20	0.332	0.265	0.292	0.296 ± 0.034	261.60
10	0.237	0.128	0.193	0.186 ± 0.055	435.85	0.245	0.184	0.220	0.216 ± 0.031	189.66
15	0.104	0.088	0.105	0.099 ± 0.010	223.66	0.178	0.133	0.186	0.166 ± 0.029	144.69
20	0.042	0.038	0.031	0.037 ± 0.006	72.44	0.136	0.090	0.142	0.123 ± 0.028	106.03
25	0.011	0.008	0.013	0.011 ± 0.003	9.02	0.086	0.067	0.102	0.085 ± 0.018	71.85
30	0.001	0.002	0.004	0.002 ± 0.002	0.00	0.059	0.040	0.070	0.056 ± 0.015	45.77
Ultrasonido 80°C										
Rojo Synozol K3BS						Azul Novacron FN-BN				
t (min)	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{X} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{X} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)
5	0.347	0.270	0.229	0.282 ± 0.060	670.00	0.313	0.352	0.297	0.321 ± 0.028	284.08
10	0.170	0.145	0.165	0.160 ± 0.013	372.44	0.220	0.285	0.244	0.250 ± 0.033	220.23
15	0.134	0.087	0.086	0.102 ± 0.027	230.98	0.169	0.247	0.164	0.193 ± 0.047	168.97
20	0.046	0.039	0.032	0.039 ± 0.007	62.68	0.113	0.189	0.111	0.138 ± 0.044	119.51
25	0.003	0.003	0.003	0.003 ± 0.000	0.00	0.068	0.154	0.060	0.094 ± 0.052	79.95
30	0.001	0.002	0.002	0.002 ± 0.001	0.00	0.044	0.134	0.033	0.070 ± 0.055	58.36
Ultrasonido 70 °C										
Rojo Synozol K3BS						Azul Novacron FN-BN				
t (min)	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{X} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{X} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)
5	0.380	0.370	0.403	0.384 ± 0.017	918.78	0.360	0.326	0.332	0.339 ± 0.018	300.27
10	0.326	0.325	0.338	0.330 ± 0.007	787.07	0.262	0.296	0.296	0.285 ± 0.020	251.71
15	0.289	0.294	0.296	0.293 ± 0.004	696.83	0.242	0.273	0.255	0.257 ± 0.016	226.53

20	0.254	0.246	0.248	0.249 ± 0.004	589.51	0.238	0.247	0.229	0.238 ± 0.009	209.44
25	0.207	0.206	0.211	0.208 ± 0.003	489.51	0.208	0.237	0.214	0.220 ± 0.015	193.26
30	0.174	0.185	0.167	0.175 ± 0.009	409.02	0.189	0.212	0.194	0.198 ± 0.012	173.47
Ultrasonido 60 °C										
Rojo Synozol K3BS						Azul Novacron FN-BN				
t (min)	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{X} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)	Abs1	Abs2	Abs3	$\bar{X} \pm DS$	cc (mg.L ⁻¹)
5	0.447	0.438	0.426	0.437 ± 0.011	1048.05	0.376	0.376	0.371	0.374 ± 0.003	331.74
10	0.416	0.410	0.381	0.402 ± 0.019	962.68	0.352	0.348	0.352	0.351 ± 0.002	311.06
15	0.368	0.378	0.364	0.370 ± 0.007	884.63	0.335	0.327	0.329	0.330 ± 0.004	292.18
20	0.355	0.343	0.360	0.353 ± 0.009	843.17	0.315	0.309	0.314	0.313 ± 0.003	276.89
25	0.329	0.329	0.330	0.329 ± 0.001	784.63	0.306	0.291	0.287	0.295 ± 0.010	260.70
30	0.313	0.313	0.318	0.315 ± 0.003	750.49	0.293	0.277	0.267	0.279 ± 0.013	246.31

Anexo 4. Coordenadas $L^*a^*b^*$ para la evaluación macroscópica de la fibra de alpaca Baby.

BABY							
PRODUCTO FINAL DE TEÑIDO							
CN							
ROJO				AZUL			
							
HEX	L^*	a^*	b^*	HEX	L^*	a^*	b^*
e6335a	52.51	68.84	23.54	556f8a	45.58	-4.39	-18.16
US 80 °C							
ROJO				AZUL			
							
HEX	L^*	a^*	b^*	HEX	L^*	a^*	b^*
e43258	52.00	68.46	24.00	607a93	49.89	-4.89	-16.84

SOLIDEZ AL AGUA

CN

ROJO



AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
#e8345b	53.01	69.17	23.67	56718f	46.41	-4.06	-19.84

US 80 °C

ROJO



AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
e72d57	52.11	70.50	24.88	5a758f	47.87	-4.97	-17.59

SOLIDEZ AL AGUA CALIENTE

CN

ROJO



AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
da335b	50.22	65.51	19.45	5c7794	48.76	-4.34	-19.15

US 80 °C

ROJO



AZUL

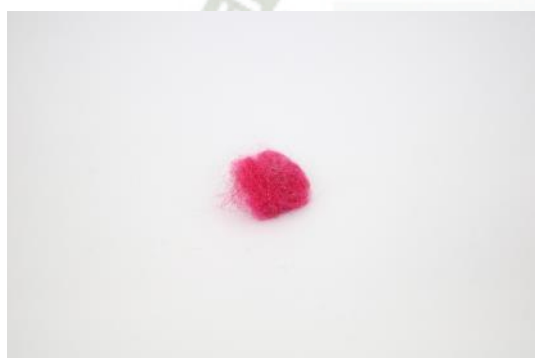


HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
e73561	52.06	68.63	21.67	65819b	52.53	-5.37	-17.45

SOLIDEZ AL AGUA DE MAR

CN

ROJO



AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
d33259	48.74	63.70	18.42	58748c	47.34	-5.72	-16.64

US 80 °C

ROJO



AZUL

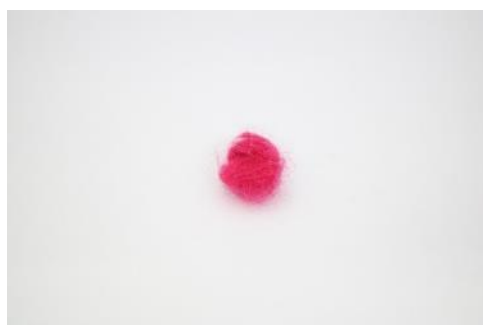


HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
d8325a	49.72	65.17	19.31	6a879d	54.68	-6.52	-15.33

SOLIDEZ AL LAVADO CON JABÓN

CN

ROJO



AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
dc2a53	49.63	68.06	23.63	597288	46.68	-5.16	-15.27

US 80 °C

ROJO



AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
d93561	50.35	64.93	15.93	556f89	45.54	-4.61	-17.62

SOLIDEZ AL LAVADO CON DETERGENTE

CN

ROJO



AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
df3f72	52.95	64.49	9.42	6e8aa0	55.91	-6.20	-15.17

US 80 °C

ROJO



AZUL

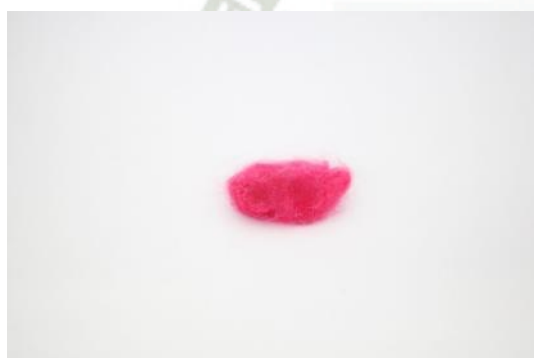


HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
d54576	49.25	61.85	12.30	5f7b96	50.21	-5.12	-18.11

SOLIDEZ AL ÁCIDO ACÉTICO

CN

ROJO



AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
ed3b6a	51.56	68.30	21.54	5c748d	47.64	-4.21	-16.74

US 80 °C

ROJO



AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
e03058	51.03	67.88	22.58	627e97	51.32	-5.56	-16.98

SOLIDEZ AL HIDRÓXIDO DE AMONIO

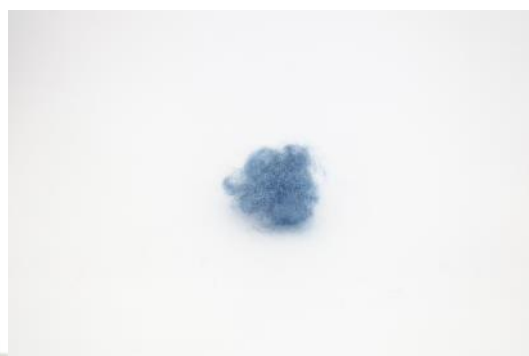
CN

ROJO



HEX	L*	a*	b*
e83967	53.72	68.33	17.40

AZUL



HEX	L*	a*	b*
6180a1	52.17	-4.81	-21.49

US 80 °C

ROJO



HEX	L*	a*	b*
d82b52	48.91	66.68	23.14

AZUL



HEX	L*	a*	b*
5c7b9a	50.14	-5.19	-20.55

*Anexo 5. Coordenadas L*a*b* para la evaluación macroscópica de la fibra de alpaca Fleece.*

FLEECE							
PRODUCTO FINAL DE TEÑIDO							
CN							
ROJO				AZUL			
							
HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
df2d52	50.47	68.12	25.45	53708e	45.88	-4.67	-20.08
US 80 °C							
ROJO				AZUL			
							
HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
e92f58	52.69	70.60	25.11	5c7b98	50.08	-5.63	-19.49

SOLIDEZ AL AGUA

CN

ROJO

AZUL



HEX	L*	a*	b*
e02b52	50.49	68.87	25.52



HEX	L*	a*	b*
526e8b	45.11	-4.56	-19.48

US 80 °C

ROJO

AZUL



HEX	L*	a*	b*
e42e57	51.61	69.44	24.11



HEX	L*	a*	b*
62819e	52.43	-5.68	-19.36

SOLIDEZ AL AGUA CALIENTE

CN

ROJO

AZUL



HEX	L*	a*	b*
d7294f	48.49	66.77	24.39



HEX	L*	a*	b*
577492	47.47	-4.72	-19.98

US 80 °C

ROJO



AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
f23a69	53.72	70.67	22.97	577492	47.47	-4.72	-19.98

SOLIDEZ AL AGUA DE MAR

CN

ROJO



AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
d02a51	47.23	64.67	21.22	5e7f9a	51.45	-6.71	-18.55

US 80 °C

ROJO



AZUL

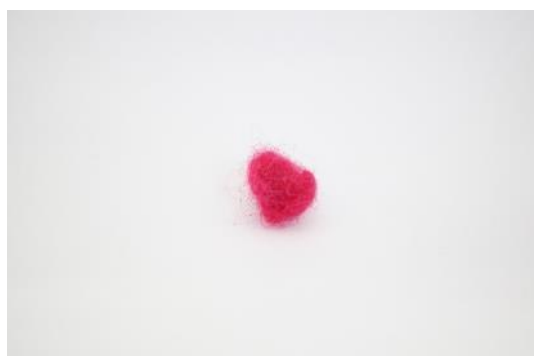


HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
d2315d	48.52	63.89	15.63	607e95	51.13	-6.62	-16.13

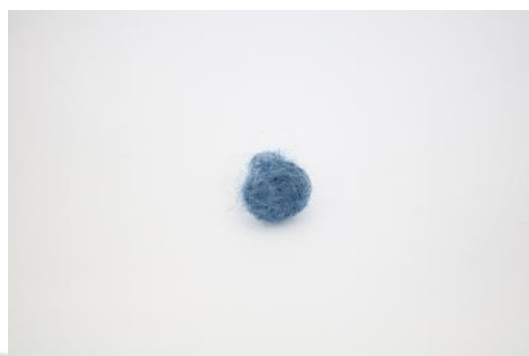
SOLIDEZ AL LAVADO CON JABÓN

CN

ROJO



AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
ce284f	46.62	64.53	21.57	516e8a	45.01	-5.10	-19.05

US 80 °C

ROJO



AZUL

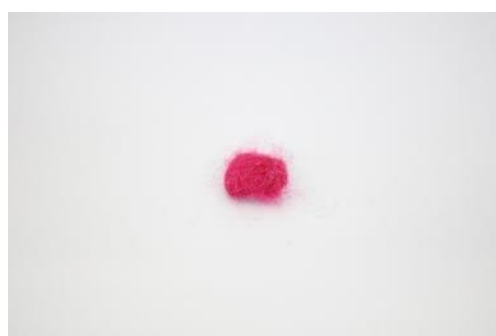


HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
d12851	47.24	65.44	21.29	5f7d98	50.86	-5.77	-18.28

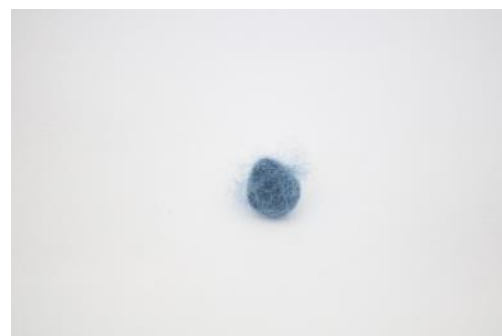
SOLIDEZ AL LAVADO CON DETERGENTE

CN

ROJO



AZUL



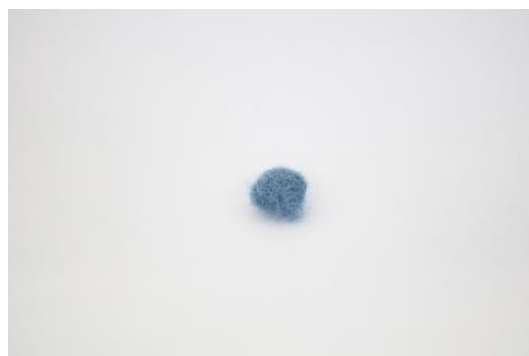
HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
d1345d	48.65	62.73	15.77	5b748c	47.54	-4.75	-16.31

US 80 °C

ROJO



AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
db3767	51.06	65.22	13.32	64819b	52.46	-5.69	-17.56

SOLIDEZ AL ÁCIDO ACÉTICO

CN

ROJO



AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
f73c6f	52.72	70.68	23.95	506c89	44.31	-4.54	-19.53

US 80 °C

ROJO



AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
f1315e	54.50	72.53	24.20	567493	47.44	-4.80	-20.62

SOLIDEZ AL HIDRÓXIDO DE AMONIO

CN

ROJO

AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
dc2d57	49.96	67.49	21.62	53708e	45.88	-4.67	-20.08

US 80 °C

ROJO

AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
f03c6c	55.62	69.96	17.26	5c7b9a	50.14	-5.19	-20.55

Anexo 6. Coordenadas $L^*a^*b^*$ para la evaluación macroscópica de la fibra de alpaca Huarizo.

HUARIZO

PRODUCTO FINAL DE TEÑIDO

CN

ROJO



HEX	L^*	a^*	b^*
e53960	53.03	67.14	20.57

AZUL



HEX	L^*	a^*	b^*
527090	45.88	-4.52	-21.26

US 80 °C

ROJO



HEX	L^*	a^*	b^*
dd2d54	50.11	67.64	23.68

AZUL



HEX	L^*	a^*	b^*
597695	48.30	-4.52	-20.46

SOLIDEZ AL AGUA

CN

ROJO

AZUL



HEX	L*	a*	b*
e73660	53.22	68.57	20.74



HEX	L*	a*	b*
55708d	45.98	-4.27	-19.32

US 80 °C

ROJO

AZUL



HEX	L*	a*	b*
e22e57	51.22	68.89	23.52



HEX	L*	a*	b*
5b7895	49.02	-4.98	-19.35

SOLIDEZ AL AGUA CALIENTE

CN

ROJO

AZUL



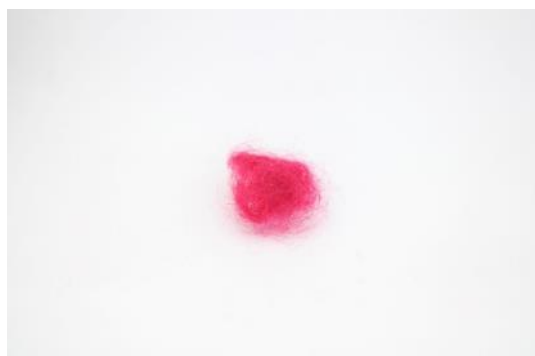
HEX	L*	a*	b*
e13961	52.30	66.04	18.84



HEX	L*	a*	b*
547190	46.31	-4.45	-20.59

US 80 °C

ROJO



AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
f23864	51.40	68.39	23.75	56718d	46.34	-4.50	-18.76

SOLIDEZ AL AGUA DE MAR

CN

ROJO



AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
d93b6b	51.23	63.63	11.05	617d95	50.90	-5.76	-16.46

US 80 °C

ROJO



AZUL

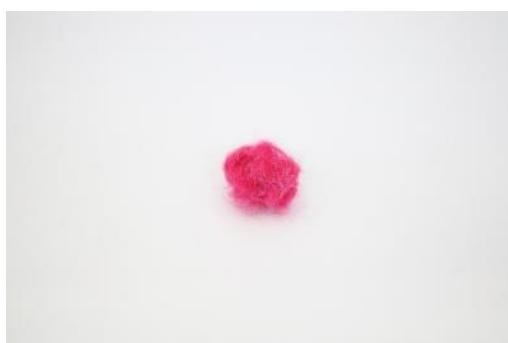


HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
d63261	49.46	64.95	14.62	5d7c96	50.37	-6.29	-17.87

SOLIDEZ AL LAVADO CON JABÓN

CN

ROJO



AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
e33a67	52.89	66.61	16.10	547089	45.78	-5.47	-17.27

US 80 °C

ROJO



AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
dd305d	50.54	67.26	18.77	66829a	52.86	-5.78	-16.37

SOLIDEZ AL LAVADO CON DETERGENTE

CN

ROJO



AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
d53a66	50.27	62.50	12.63	5a728a	46.81	-4.41	-16.24

US 80 °C

ROJO



AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
d43663	49.56	63.30	13.45	63819b	52.40	-6.00	-17.66

SOLIDEZ AL ÁCIDO ACÉTICO

CN

ROJO



AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
ef355e	54.49	70.98	24.09	4f6a86	43.53	-4.43	-18.93

US 80 °C

ROJO



AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
eb3666	52.66	70.29	22.02	5d7d9d	50.90	-5.30	-21.14

SOLIDEZ AL HIDRÓXIDO DE AMONIO

CN

ROJO



HEX	L*	a*	b*
e4315a	51.93	68.81	22.71

AZUL



HEX	L*	a*	b*
5c7896	49.12	-4.45	-19.77

US 80 °C

ROJO



HEX	L*	a*	b*
d42b52	48.12	65.57	21.94

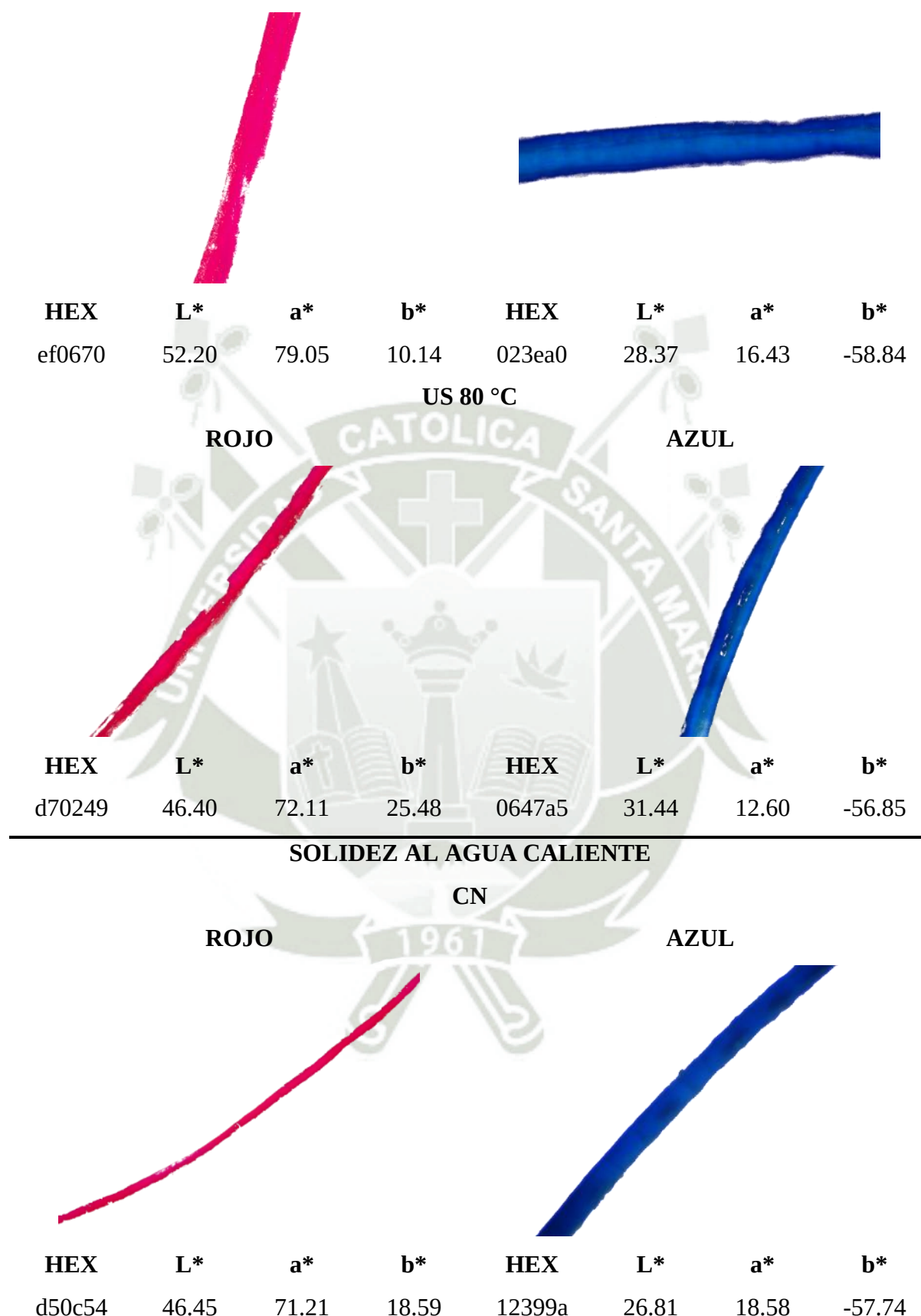
AZUL



HEX	L*	a*	b*
577695	48.17	-5.13	-20.67

Anexo 7. Coordenadas $L^*a^*b^*$ para la evaluación microscópica de la fibra de alpaca Baby.

BABY							
PRODUCTO FINAL DE TEÑIDO							
CN							
ROJO				AZUL			
HEX	L^*	a^*	b^*	HEX	L^*	a^*	b^*
e20367	49.26	75.84	11.12	033da1	28.18	17.50	-59.75
US 80 °C							
ROJO				AZUL			
HEX	L^*	a^*	b^*	HEX	L^*	a^*	b^*
d4064a	45.90	71.09	24.07	0e45a2	30.77	13.28	-56.13
SOLIDEZ AL AGUA							
CN							
ROJO				AZUL			



US 80 °C

ROJO

AZUL

HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
c0072a	41.25	65.11	37.13	1850a4	34.40	7.84	-51.43

SOLIDEZ AL AGUA DE MAR

CN

ROJO

AZUL

HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
c2021c	41.40	65.85	45.39	033991	25.77	14.34	-53.95

US 80 °C

ROJO

AZUL

HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
f0105e	52.33	77.76	21.35	0b47a3	31.37	12.16	-55.75

SOLIDEZ AL LAVADO CON JABÓN

CN

ROJO

AZUL

HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
d41359	46.61	70.41	15.63	0f3996	26.41	16.93	-55.95

US 80 °C

ROJO

AZUL

HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
c60a2d	42.68	66.42	37.27	08479b	30.78	9.13	-51.90

SOLIDEZ AL LAVADO CON DETERGENTE

CN

ROJO

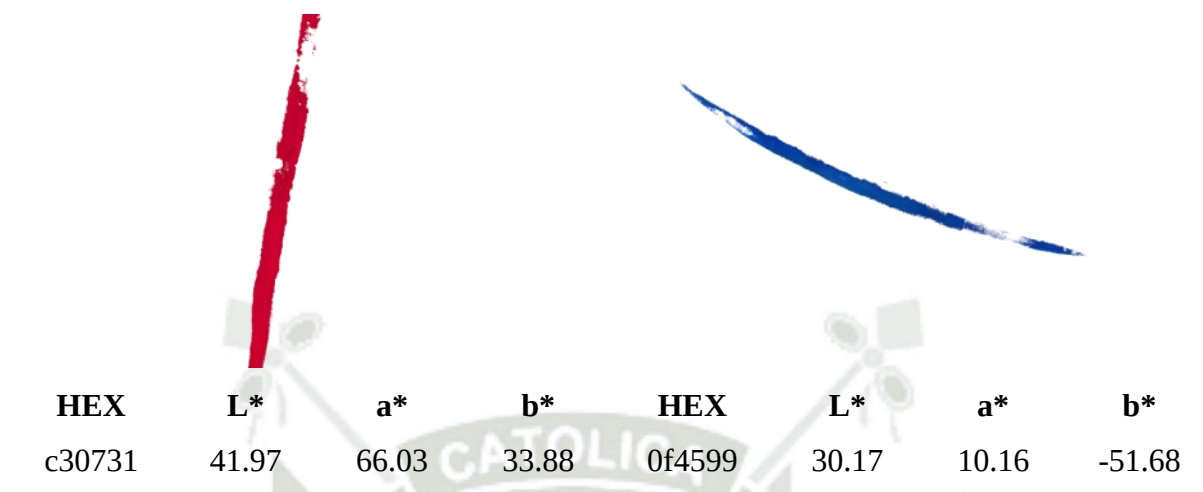
AZUL

HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
df0958	48.52	74.03	19.27	07419e	29.18	14.03	-56.31

US 80 °C

ROJO

AZUL



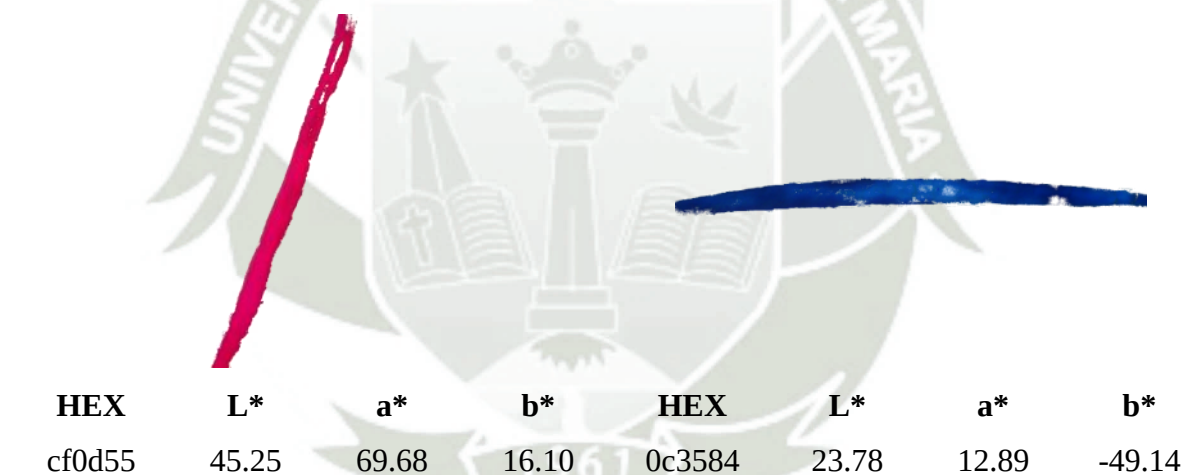
HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
c30731	41.97	66.03	33.88	0f4599	30.17	10.16	-51.68

SOLIDEZ AL ÁCIDO ACÉTICO

CN

ROJO

AZUL

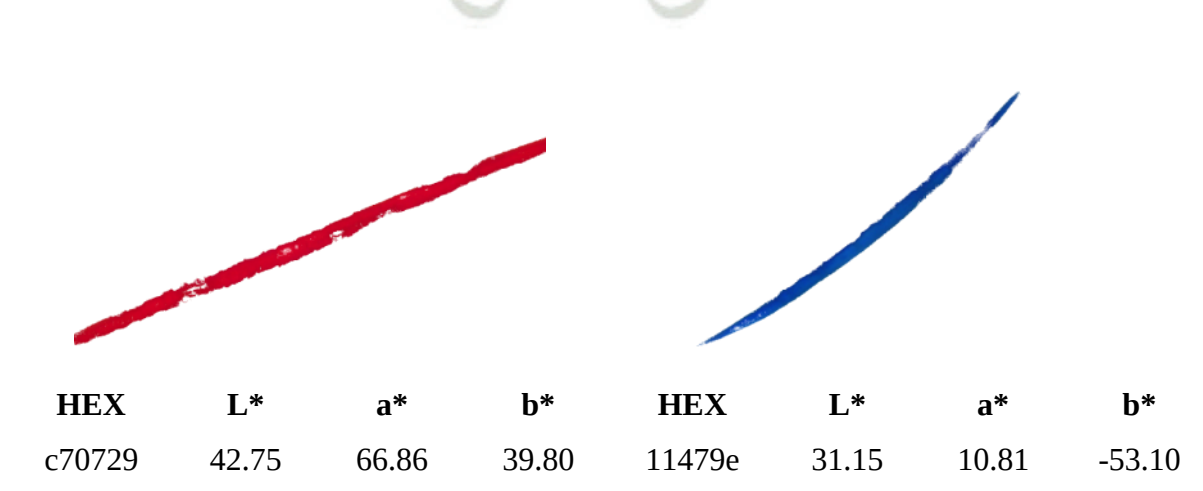


HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
cf0d55	45.25	69.68	16.10	0c3584	23.78	12.89	-49.14

US 80 °C

ROJO

AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
c70729	42.75	66.86	39.80	11479e	31.15	10.81	-53.10

SOLIDEZ AL HIDRÓXIDO DE AMONIO

CN

ROJO

AZUL

HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
ed0363	51.46	78.22	17.01	0749b1	32.89	15.63	-61.62

US 80 °C

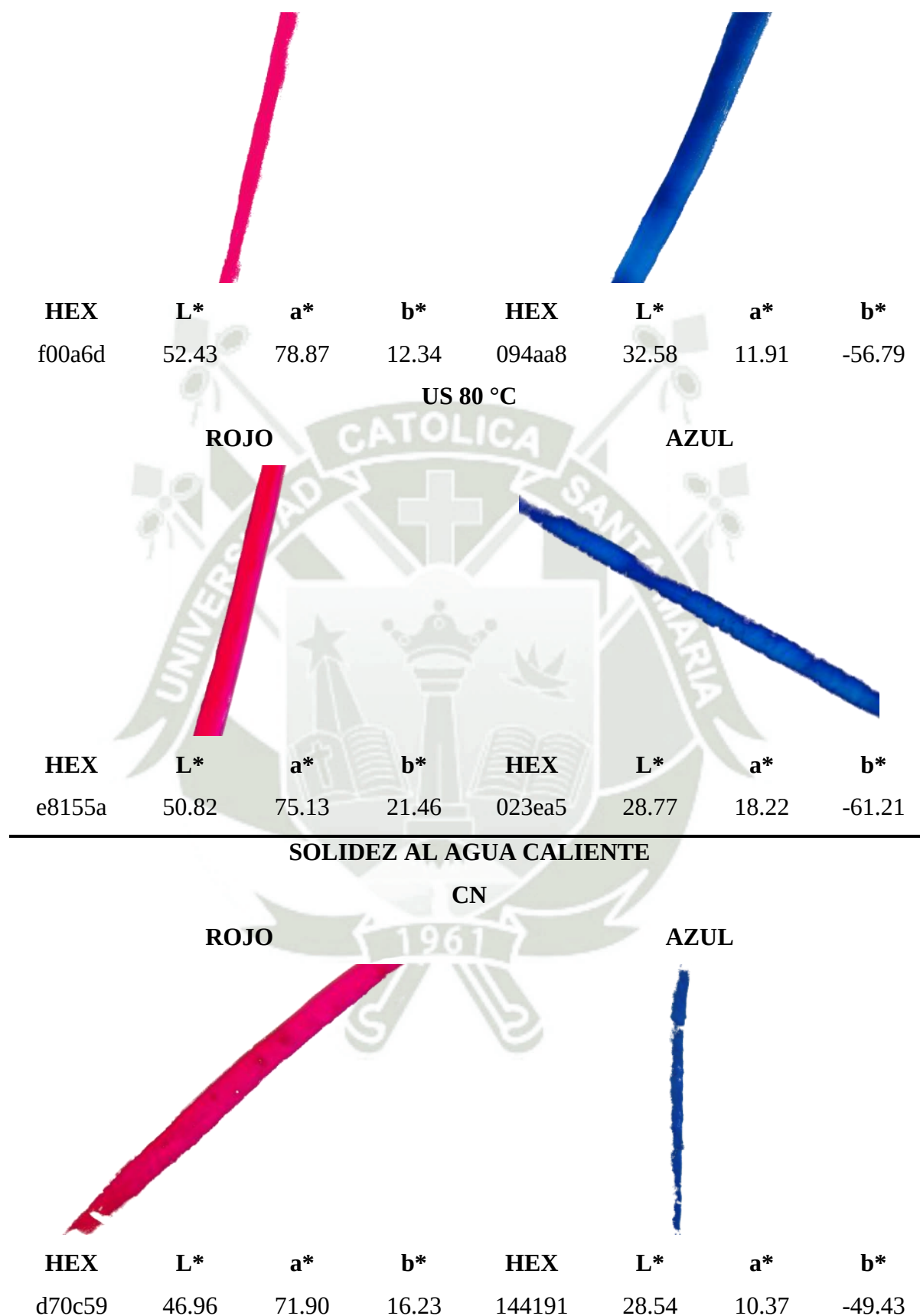
ROJO

AZUL

HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
ed0b56	51.44	77.16	24.94	0d50ac	34.68	9.74	-55.75

Anexo 8. Coordenadas $L^*a^*b^*$ para la evaluación microscópica de la fibra de alpaca Fleece.

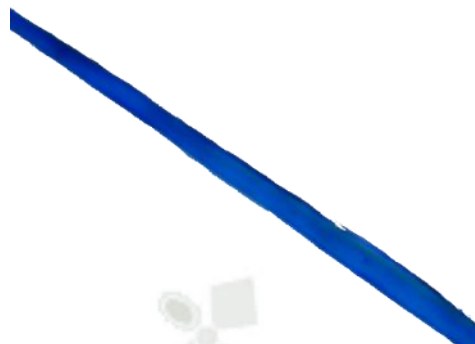
FLEECE							
ORIGINALES							
CN							
ROJO				AZUL			
							
HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
ef0367	51.94	78.85	15.29	04429e	29.43	13.21	-55.91
US 80 °C							
ROJO				AZUL			
							
HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
e80c58	50.46	75.96	22.22	032f98	23.54	23.49	-61.90
SOLIDEZ AL AGUA							
CN							
ROJO				AZUL			



US 80 °C

ROJO

AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
c00d2d	41.49	64.57	35.58	0946a8	31.41	14.47	-58.69

SOLIDEZ AL AGUA DE MAR

CN

ROJO

AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
c90233	43.12	68.05	34.35	08227c	17.56	22.53	-54.29

US 80 °C

ROJO

AZUL



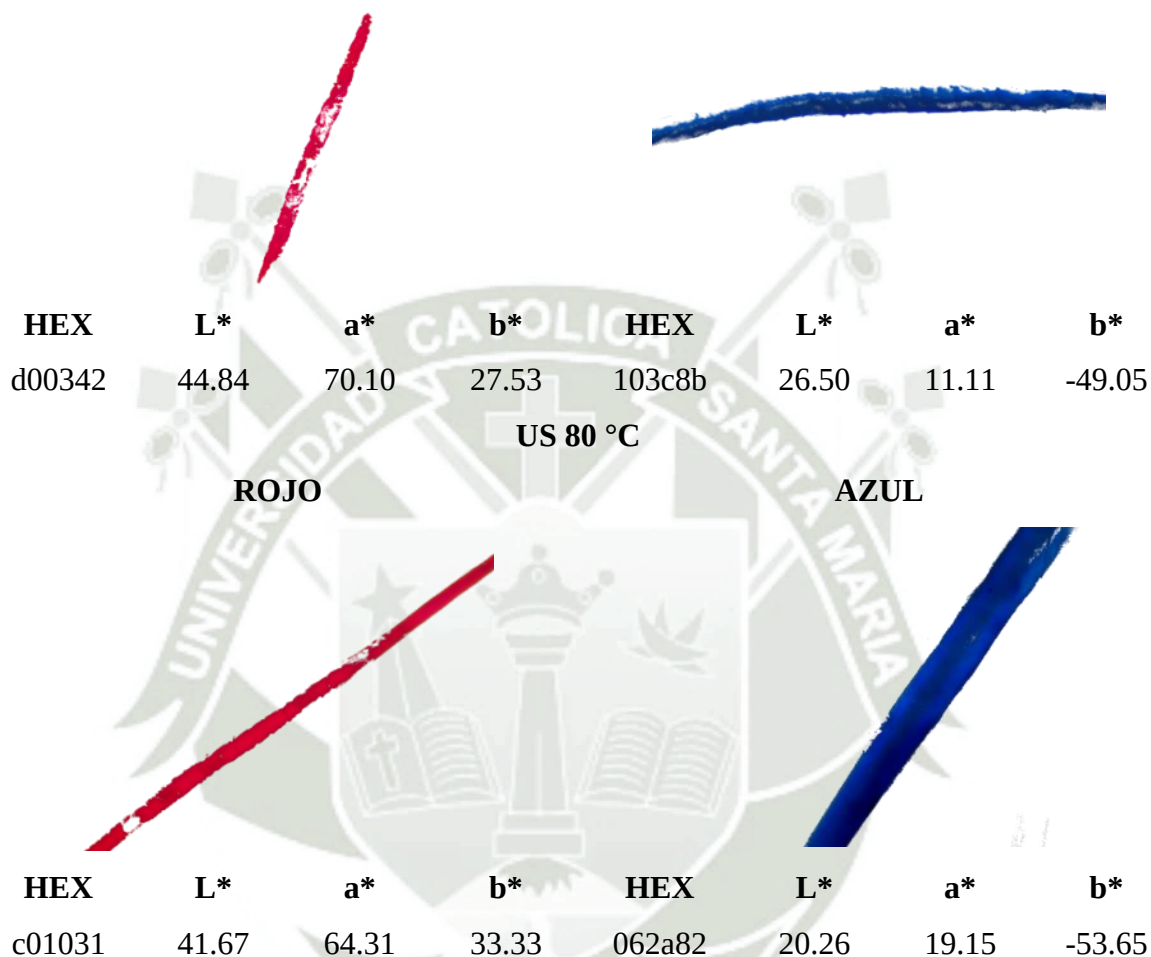
HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
e8042c	49.73	75.36	47.56	084eb2	34.43	12.85	-59.72

SOLIDEZ AL LAVADO CON JABÓN

CN

ROJO

AZUL

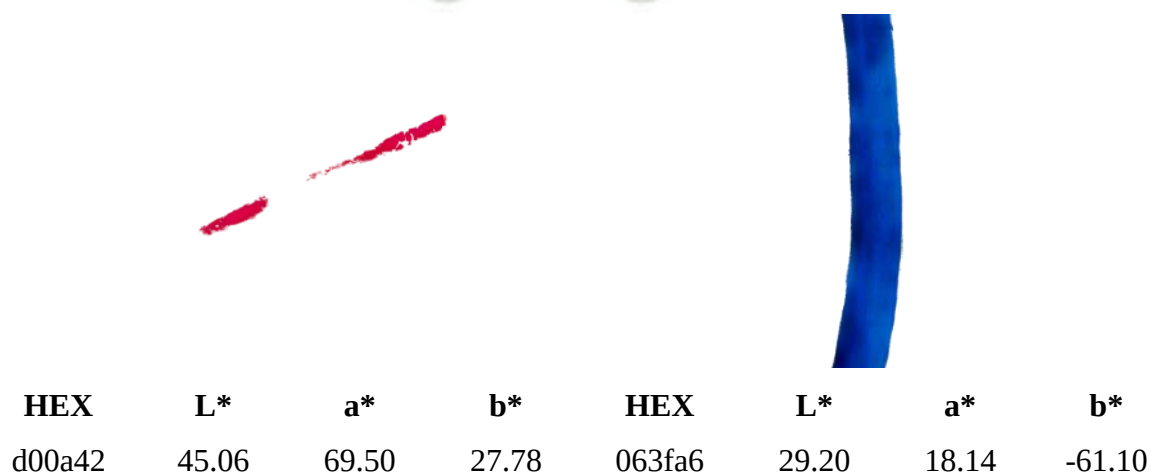


SOLIDEZ AL LAVADO CON DETERGENTE

CN

ROJO

AZUL



US 80 °C

ROJO

AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
ce083b	44.48	68.97	31.31	0d49ac	32.63	14.18	-59.08

SOLIDEZ AL ÁCIDO ACÉTICO

CN

ROJO

AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
d4043b	45.64	70.79	33.03	063689	24.33	13.61	-51.37

US 80 °C

ROJO

AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
cb0630	43.65	68.11	36.88	0a4eb6	34.73	14.34	-61.58

SOLIDEZ AL HIDRÓXIDO DE AMONIO

CN

ROJO

AZUL

HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
ef025e	51.76	78.56	20.55	0649b7	33.32	17.69	-64.46

US 80 °C

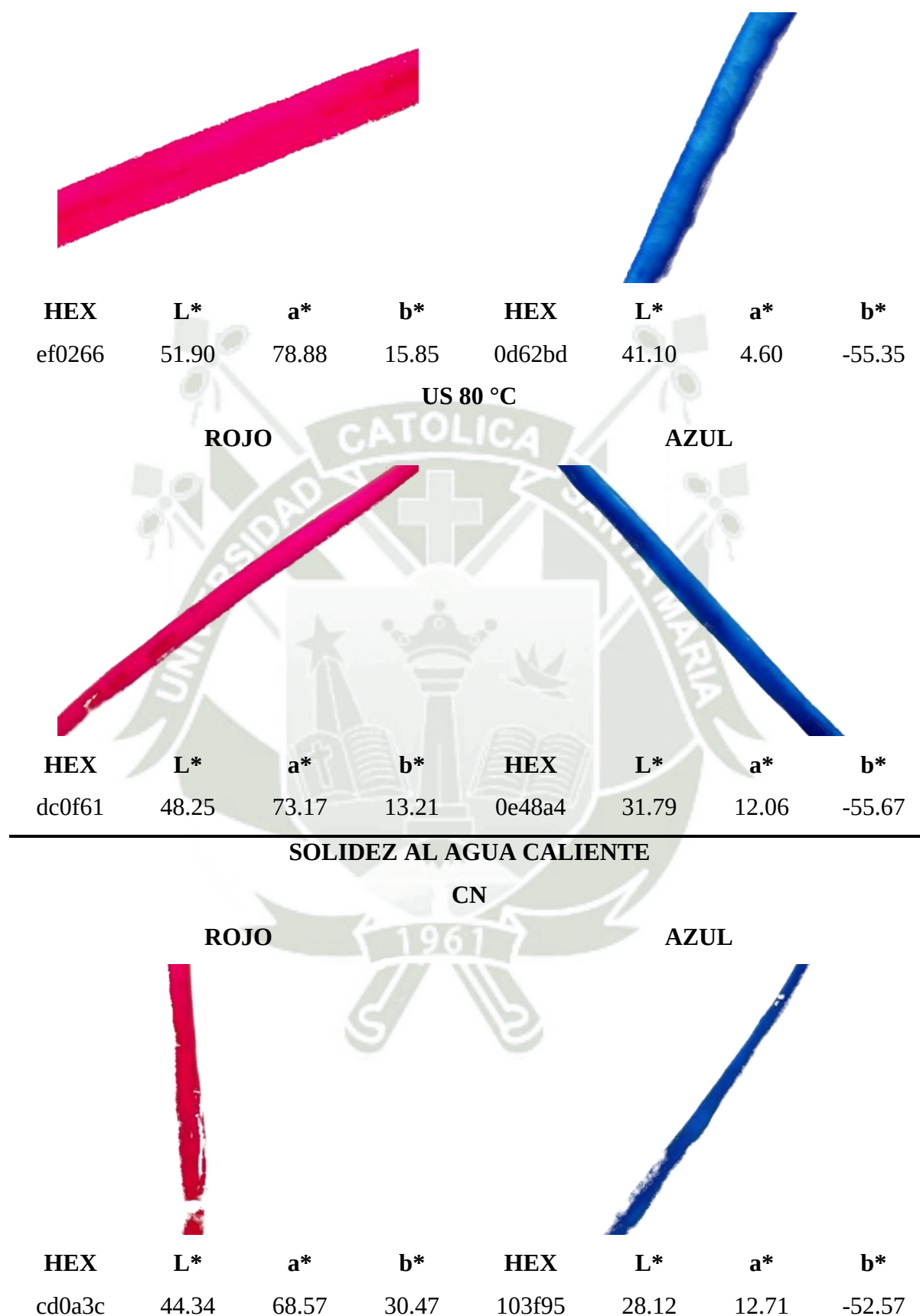
ROJO

AZUL

HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
f00459	51.93	78.47	23.88	062585	19.18	23.57	-57.32

Anexo 9. Coordenadas $L^*a^*b^*$ para la evaluación microscópica de la fibra de alpaca Huarizo.

HUARIZO							
PRODUCTO FINAL DE TEÑIDO							
CN							
ROJO				AZUL			
							
HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
e70665	50.33	76.69	14.02	0e5eb6	39.51	4.66	-53.84
US 80 °C							
ROJO				AZUL			
							
HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
db0263	47.70	74.10	11.18	0f47a4	31.52	12.77	-56.11
SOLIDEZ AL AGUA							
CN							
ROJO				AZUL			



US 80 °C

ROJO

AZUL

HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
ca0429	43.31	67.89	40.59	0f46a3	31.15	13.06	-56.10

SOLIDEZ AL AGUA DE MAR

CN

ROJO

AZUL

HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
cd022d	43.93	68.90	39.11	1e5394	34.57	1.32	-41.55

US 80 °C

ROJO

AZUL

HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
ef073f	51.45	77.24	38.95	0b5bc1	39.25	10.11	-60.66

SOLIDEZ AL LAVADO CON JABÓN

CN

ROJO

AZUL

HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
cf0439	44.54	69.51	32.68	0d3b9b	27.33	17.24	-57.51

US 80 °C

ROJO

AZUL

HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
bf1243	41.79	64.34	22.19	09459a	30.12	10.12	-52.36

SOLIDEZ AL LAVADO CON DETERGENTE

CN

ROJO

AZUL

HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
d50333	45.73	70.92	38.04	063c96	27.10	14.36	-54.85

US 80 °C

ROJO

AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
cb0831	43.72	67.96	36.36	0950bf	35.93	16.17	-64.90

SOLIDEZ AL ÁCIDO ACÉTICO

CN

ROJO

AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
cf173c	45.32	67.53	31.73	073e9d	28.23	15.63	-57.25

US 80 °C

ROJO

AZUL



HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
d5093f	46.05	70.74	31.11	0b57bc	37.76	10.85	-60.17

SOLIDEZ AL HIDRÓXIDO DE AMONIO

CN

ROJO

AZUL

HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
f00858	52.01	78.16	24.60	094fba	35.29	15.06	-63.02

80 °C

ROJO

AZUL

HEX	L*	a*	b*	HEX	L*	a*	b*
ed0e66	51.80	77.55	15.62	0942aa	30.41	17.76	-61.51

Anexo 10. Resultados de la evaluación microscópica del grado de solidez del color a las diferentes pruebas.

FIBRA	MÉTODO	COLORANT	Agua		Agua caliente		Agua de mar		Lavado con jabón		Lavado con detergente		Ácido		Álcali	
			ΔE	GS	ΔE	GS	ΔE	GS	ΔE	GS	ΔE	GS	ΔE	GS	ΔE	GS
Huarizo	CN	Rojo	1.154	4.5	9.183	1.5	12.951	1.0	9.976	1.5	11.985	1.0	9.752	1.5	4.886	2.5
		Azul	0.904	4.5	7.346	2.0	4.507	3.0	9.158	1.5	8.221	1.5	8.224	1.5	6.188	2.0
	US 80 °C	Rojo	1.094	4.5	14.720	1.0	12.806	1.0	7.159	2.0	12.770	1.0	9.845	1.5	2.901	3.5
		Azul	0.390	5.0	0.244	5.0	4.447	2.5	1.662	4.0	3.394	3.0	3.587	3.0	2.643	3.5
Fleece	CN	Rojo	1.395	4.0	3.045	3.0	11.081	1.5	7.633	2.0	7.772	2.0	9.653	1.5	2.453	3.5
		Azul	1.777	4.0	2.044	4.0	7.893	2.0	2.419	3.5	2.532	3.5	2.915	3.0	3.398	3.0
	US 80°C	Rojo	0.364	5.0	9.173	1.5	11.255	1.5	8.334	1.5	6.036	2.0	8.562	1.5	1.035	4.5
		Azul	3.645	3.0	5.757	2.5	7.474	2.0	2.825	3.5	6.312	2.0	7.211	2.0	2.571	3.5
Baby	CN	Rojo	1.745	4.0	4.266	2.5	17.603	1.0	3.085	3.0	4.043	3.0	3.754	3.0	2.905	3.5
		Azul	0.518	4.5	1.176	4.5	2.164	3.5	1.333	4.0	1.756	4.0	3.717	3.0	2.676	3.5
	US 80 °C	Rojo	0.629	4.5	7.380	2.0	4.091	3.0	6.998	2.0	5.718	2.5	8.008	2.0	3.110	3.0
		Azul	0.584	4.5	3.402	3.0	0.654	4.5	2.213	3.5	1.793	4.0	1.357	4.0	2.725	3.5

Nota: Elaboración propia