UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE TEXTILES

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PREVIO A LA

OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO TEXTIL

TEMA:

"INFLUENCIA DEL BIOPULIDO CON ENZIMAS CELULASAS ÁCIDAS Y NEUTRAS EN LA FORMACIÓN DE BOLITAS PILLING EN TEJIDO 100% ALGODÓN"

Autor (a): Pantoja Chalacan Jonathan Santiago

DIRECTOR: MSc. Elsa Sulay Mora Muñoz

Ibarra - Ecuador

2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Pantoja Chalacan Jonathan Santiago

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"INFLUENCIA DEL BIOPULIDO CON ENZIMAS CELULASAS ÁCIDAS Y NEUTRAS EN LA FORMACIÓN DE BOLITAS PILLING EN TEJIDO 100% ALGODÓN"
AUTOR:	Pantoja Chalacan Jonathan Santiago
FECHA:	9 de junio del 2026

SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	Pregrado ■ Posgrado ☐
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Textil
DIRECTOR:	MSc. Elsa Sulay Mora Muñoz

2. CONSTANCIA

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se desarrolló, sin violar derechos de autores de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es titular de los derechos patrimoniales por lo que se asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por terceros.

Ibarra, a los 9 días del mes de junio de 2026.

Autor (a).



Firma: .....

Nombre: Pantoja Chalacan Jonathan Santiago

C.I. 1050259843

CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 9 de junio del 2026.

MSc. Elsa Sulay Mora Muñoz

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.



(f): ----------

MSc. Elsa Sulay Mora Muñoz
C.C.: 040090045-2

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El comité calificador del trabajo de Integración Curricular **"INFLUENCIA DEL BIOPULIDO CON ENZIMAS CELULASAS ÁCIDAS Y NEUTRAS EN LA FORMACIÓN DE BOLITAS PILLING EN TEJIDO 100% ALGODÓN"** elaborado por Pantoja Chalacan Jonathan Santiago, previo a la obtención de título de INGENIERO TEXTIL, aprueba el siguiente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:



(f): ----------

MSc. Elsa Sulay Mora Muñoz

C.C.: 040090045-2



(f): ----------

MSc. Omar Vinicio Godoy Collaguazo
C.C.: 1003083936

DEDICATORIA

Con amor y gratitud, dedico este trabajo investigativo a mis padres, Arturo y Betty, quienes han sido mi mayor motivación para seguir adelante y culminar este proceso académico. Gracias por confiar en mí incluso más de lo que yo mismo lo hacía; por enseñarme el verdadero significado de dar, sin esperar nada a cambio.

Este trabajo es también suyo, porque en cada página habita la huella de su amor. ¡Los amo!

Jonathan Santiago

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres por haberme dado su apoyo constante y la confianza necesaria para concluir este trabajo y mi formación académica.

Agradezco de corazón a todas las personas que tuve el privilegio de conocer durante toda esta etapa, compañeros y docentes, quienes con su compañía y respaldo transformaron este proceso en una experiencia enriquecedora y significativa.

Expreso mi sincero agradecimiento a la MSc. Elsa Mora por su guía en la elaboración de este trabajo y por el acompañamiento brindado durante mi investigación, ya que como tutora supo aclarar cada una de mis dudas con paciencia y dedicación.

Jonathan Santiago

RESUMEN

Esta investigación tiene como principal objetivo analizar la influencia del biopulido en la formación de pilling en tejidos 100% algodón utilizando enzimas celulasas ácidas y neutras. Para el desarrollo de este trabajo se realizó una investigación bibliográfica para identificar los factores que son responsables de la formación de pilling así también como las variables que intervienen en el biopulido enzimático como son temperatura, concentración, tiempo y pH. Se realizó un diseño factorial 2^3 utilizando el software Statgraphics para evaluar el tratamiento con enzimas. Los factores considerados fueron: tipo de enzima (neutra y ácida), temperatura (40 °C y 60 °C) y concentración enzimática (1 % y 5 %), cada uno con dos niveles. Las variables respuesta son el grado de pilling el proceso se mantuvo durante 50 minutos y luego de haber transcurrido el tiempo se elevó la temperatura a 80ºC durante 10 minutos para desactivación de la enzima y se trabajó con un pH de 7 para enzima neutra y pH 5,5 para enzima ácida. Una vez concluido el proceso, se realizaron tres pares de muestras por cada combinación según lo establecido en la norma ISO 12945-2:2020. Se cargaron las probetas al equipo Martindale, ensayadas a ciclos de 125, 500, 1000, 2000, 5000 y 7000, tras lo cual se efectuó la evaluación visual del grado de pilling en cada uno de los ciclos establecidos, obteniéndose seis calificaciones en total por cada muestra. A continuación, se recopilaron los datos y se cargaron al software. Los resultados mostraron como influyó cada una de las variables en el proceso sin embargo las probetas que tuvieron mejor resultado fueron las tratadas con enzimas neutras a 40ºC y a una concentración del 5% que tuvo una calificación visual de pilling de 4-5 después de terminar los 7000 ciclos mientras que las muestras sin tratar tuvieron una calificación visual de 1- 2 incluso mucho antes de haber transcurrido los 7000 ciclos, lo que indica una mejora considerable a la reducción de pilling.

Palabras claves: Biopulido, Celulasas, Enzimas, Martindale, Pilling, Tejido jersey

ABSTRACT

This research aims to analyze the influence of enzymatic biopolishing on the formation of pilling in 100% cotton fabrics using both acidic and neutral cellulase enzymes. To develop this study, a bibliographic review was conducted to identify the factors responsible for pilling formation, as well as the variables involved in enzymatic biopolishing, such as temperature, concentration, time, and pH. A 2^3 factorial design was carried out using Statgraphics software to evaluate the enzymatic treatments. The factors considered were type of enzyme (neutral and acidic), temperature (40 °C and 60 °C), and enzyme concentration (1% and 5%), each with two levels. The response variable was the degree of pilling. The process was maintained for 50 minutes, after which the bath temperature was raised to 80 °C for 10 minutes to deactivate the enzyme. A pH of 7 was used for neutral cellulase and pH 5.5 for acidic cellulase, according to the recommended operating conditions for each type of enzyme. Once the process was completed, three pairs of samples were prepared following ISO 12945-2:2020. The specimens were tested in the Martindale apparatus at 125, 500, 1000, 2000, 5000, and 7000 cycles. After each cycle group, a visual evaluation of the pilling grade was performed, resulting in six ratings per sample. The data were then collected and processed using Statgraphics software. The results revealed the influence of each variable on the process. However, the samples that achieved the best performance were those treated with neutral cellulase at 40 °C and 5% concentration, which obtained a visual pilling grade of 4–5 after 7000 cycles. In contrast, untreated samples received a grade of 1–2, even well before reaching 7000 cycles. This indicates a significant improvement in reducing pilling formation.

Keywords: Biopolishing, Cellulases, Enzymes, Martindale, Pilling, Jersey fabric

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I 1

INTRODUCCIÓN 1

1.1 Problema de investigación 1

1.2 Objetivos 2

1.3 Alcance y delimitación 3

1.4 Justificación 3

CAPÍTULO II 6

MARCO TEÓRICO 6

2.1 Antecedentes 6

2.1.1 Estudios previos 7

2.1.2 Tratamientos para reducción de pilling 8

2.1.3 Biopulido enzimático 9

2.1.4 Influencia de la concentración enzimática 9

2.1.5 Últimos avances 10

2.2 Marco legal 11

2.2.1 Constitución de la República del Ecuador 11

2.2.2 Líneas de investigación de la Universidad Técnica del Norte 12

2.3 Marco conceptual 12

2.3.1 Enzimas 12

2.3.2 Celulasas 13

2.3.3 Tejido de punto tipo jersey 13

2.3.4 Pilling 14

2.3.5 Biopulido 18

CAPÍTULO III 19

MATERIALES Y MÉTODOS 19

3.1 Enfoque y tipo de investigación 19

3.2 Tipo de investigación 19

3.3 Técnicas de investigación 21

3.4 Flujogramas 21

3.5 Materiales 26

3.6 Equipos 27

3.7 Normas de referencia 29

3.8 Procedimiento 29

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 33

4.1 Resultados 33

4.1.1 Resultados del proceso de biopulido 33

4.1.2 Resultados de la prueba a la tendencia a la formación de pilling 34

4.2 Discusión de resultados. 36

4.2.1 Análisis de la varianza en la formación de pilling 36

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 41

5.1 Conclusiones 41

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 45

ANEXOS 50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Especificaciones del tejido 26

Tabla 2 Materiales utilizados..... 26

Tabla 3 Características técnicas del Martindale 29

Tabla 4 Factores de estudio 34

Tabla 5 Resultados del diseño experimental y tratamientos..... 35

Tabla 6 Condiciones óptimas para el biopulido 36

Tabla 7 Análisis de la varianza del grado de pilling..... 37

Tabla 8 Coeficiente de regresión..... 38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación del laboratorio CTEX 5

Figura 2 Etapas de formación del pilling 15

Figura 3 Vista ampliada de hilatura open end y anillos 17

Figura 4 Flujograma general 22

Figura 5 Flujograma de muestras 23

Figura 6 Máquina de prelavado 27

Figura 7 Equipo Martindale de la CTEX 28

Figura 8 Curva de proceso para enzimas ácidas 30

Figura 9 Curva de proceso para enzimas neutras 31

Figura 10 Diagrama de Pareto estandarizado 39

Figura 11 Superficie de respuesta estimada tridimensional 40

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Fibrillas desprendidas del tejido después del proceso de biopulido..... 50

Anexo 2 Corte y carga de muestras al Martindale..... 51

Anexo 3 Certificado de uso de laboratorio de la Carrera de Textiles 52

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Problema de investigación

La industria textil es considerada como una de las más contaminantes a nivel global, ya que genera un alto impacto ambiental debido al uso constante de químicos tóxicos, aguas residuales que no son tratadas correctamente y un alto consumo de energía eléctrica**.** Asimismo, la quema de combustibles fósiles en los procesos textiles incrementó las emisiones de gases de efecto invernadero, agravando el cambio climático y la contaminación atmosférica (Rofi y Rahman, 2025).

Entre los procesos más contaminantes se encuentran los diferentes tipos de acabados para el pulido en tejidos de algodón, los cuales tienen como objetivo reducir la vellosidad que es una de las responsables en la formación de pilling (bolitas superficiales); este fenómeno se ha tratado con métodos mecánicos como el rasurado o el chamuscado o químicos como el mercerizado. Sin embargo, estos tratamientos si bien son efectivos en la reducción de pilling emplean sustancias perjudiciales para el ambiente como hidróxido de sodio (NaOH), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), compuestos clorados y formaldehído que en algunos casos llegan a ser agresivos con las fibras, además consumen grandes cantidades de agua, energía y generan residuos contaminantes (Hussain y Khan, 2024).

Aunque el pilling es menos severo en tejidos de algodón puro que en fibras sintéticas como poliéster o mezclas algodón-poliéster, sigue siendo un problema común que puede afectar la apariencia y suavidad del tejido (Guerrón Mireya, 2018).

Las técnicas tradicionalmente empleadas para eliminar la vellosidad superficial que produce el pilling en telas de algodón son, sobre todo, el pulido mecánico con cuchillas conocido

como (singeing) y el tratamiento químico con oxidantes (NaOH). El chamuscado consiste en exponer la superficie del tejido a llamas o zonas con placas calientes para quemar las fibras de la superficie. El mercerizado alcalino, por su parte, disuelve parcialmente las microfibras y hace que el tejido sea más suave. Sin embargo, estos métodos a menudo presentan algunas limitaciones; por ejemplo, si no se controla adecuadamente, el chamuscado puede carbonizar el sustrato (Wagaw et al., 2024).

Según Kushwaha (2023), el biopulido con enzimas celulasas constituye una alternativa más amigable con el medio ambiente frente a los métodos tradicionales, ya que evita el gran consumo de agua y la liberación de residuos tóxicos. Al emplear enzimas biodegradables de origen natural, que se descomponen fácilmente tras el proceso, se reduce la contaminación del agua y se previene la acumulación de compuestos perjudiciales, favoreciendo prácticas más sostenibles en la industria textil.

1.2 Objetivos

Objetivo general

- Determinar la influencia del biopulido con enzimas celulasas ácidas y neutras en la formación de bolitas pilling en tejido 100% algodón.

Objetivos específicos.

- Investigar el efecto de tratamiento con enzimas ácidas y neutras en la formación de pilling en tejido de algodón tipo jersey.
- Aplicar el proceso de biopulido con enzimas celulasas ácidas y neutras, variando la temperatura de tratamiento y manteniendo constantes la concentración, tiempo y pH según el tipo de enzima.

- Analizar el grado de pilling posterior al tratamiento enzimático mediante ensayos estandarizados conforme a la norma ISO 12945-2.
- Comparar los resultados obtenidos con el fin de establecer condiciones idóneas para su aplicación en procesos de acabado sostenible.

1.3 Alcance y delimitación

Este estudio tiene como objetivo evaluar el comportamiento de la formación de pilling en tejidos 100% algodón tipo jersey, tras ser sometidos a tratamientos de biopulido utilizando enzimas de carácter ácido y neutro. Las variables experimentales consideradas serán el tipo de enzima (ácida y neutra), la temperatura de aplicación, establecida en dos niveles: 40 °C y 60 °C y la concentración de enzima de 1% y 5%. El pH se trabajó según el tipo de enzima: pH 5 para celulasas ácidas y pH 7 para celulasas neutras.

La evaluación se realizó mediante pruebas normalizadas conforme se detalla en a la ISO 12945-2:2020, utilizando el equipo Martindale, que simula el desgaste por fricción para determinar la resistencia a la formación de bolitas. Las muestras fueron frotadas bajo condiciones controladas y los resultados se analizaron con base en una escala visual estandarizada de 1 a 5, donde 1 indica pilling severo y 5 la ausencia de este. Los datos obtenidos permitirán comparar el efecto de las enzimas celulasas ácidas y neutras en la reducción de bolitas superficiales.

1.4 Justificación

La formación de pilling en tejidos de algodón representa un problema en la calidad y durabilidad de productos textiles, especialmente en prendas de uso habitual (camisetas, pantalones, entre otros). Uddin (2015) mostró que el biopulido enzimático con celulasas neutras y ácidas sobre tejido plano de algodón es efectivo, lo cual se evidencia en la mejora notable de la suavidad, la apariencia de la superficie y la resistencia al pilling. Los principios del tratamiento enzimático

también son aplicables a las estructuras de punto, pese a que su investigación se enfocó en tejidos planos. Este trabajo tiene como objetivo evaluar dicha eficiencia en tejidos de punto jersey, que tienen una estructura más abierta y menos torsión en los hilos, lo cual los hace más propensos a la formación de pilling. La diferencia estructural mencionada explica que es necesario validar el comportamiento del biopulido en este tipo de tejido mediante experimentos bajo condiciones controladas en el laboratorio.

Este trabajo investigativo busca contribuir con información práctica sobre el comportamiento del pilling en tejido de punto 100% algodón después de ser tratado con enzimas ácidas y neutras, bajo condiciones controladas de laboratorio. Al combinar el tipo de enzima, temperatura y concentración, se busca obtener datos comparativos y reproducibles, que sirvan de base para implementar en procesos de acabado con menor impacto ambiental.

Este estudio es relevante porque como lo mencionan Mora y Carrera (2021) los efectos nocivos de los productos químicos utilizados en acabados textiles tradicionales como formaldehído, álcalis fuertes y colorantes azoicos, son altamente contaminantes y perjudiciales; por esta razón es fundamental adoptar procesos más limpios y seguros tanto para el ambiente como para la salud de los trabajadores, en este sentido el biopulido enzimático contribuye al desarrollo de procesos no contaminantes en la industria textil, reduciendo el uso de productos químicos utilizados en acabados textiles tradicionales.

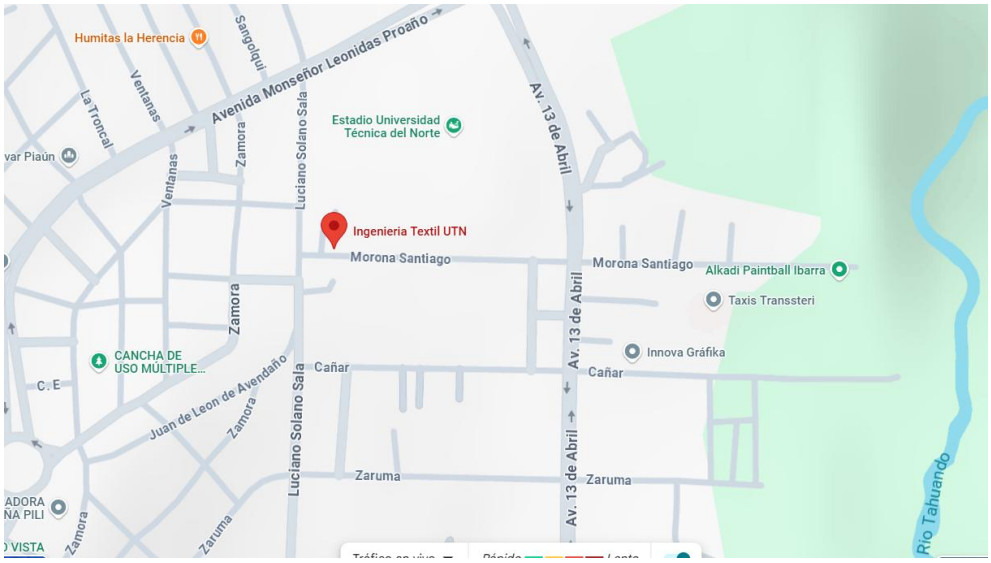
Además, permitió conocer la combinación óptima para reducir la formación de pilling, beneficiando tanto a fabricantes como a consumidores además responde a la creciente demanda de procesos sostenibles en el sector textil, alineándose con estándares internacionales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 12: Producción y Consumo Responsables

Características del sitio del proyecto.

El proyecto de investigación se desarrolló en la Carrera de Textiles, como se muestra en la **Figura 1** donde se encuentran los laboratorios equipados con equipos normalizados ubicados en las coordenadas 0.3782531210228751, -78.12389737777924.

Figura 1

Ubicación del laboratorio CTEX



Fuente: (Maps, 2023)

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Diversos estudios han abordado el uso de enzimas en procesos de acabado textil, aunque para el biopulido la información es escasa, sin embargo, se ha logrado recopilar investigaciones que corroboran la justificación de este trabajo que se muestran a continuación.

En un estudio realizado por el Departamento de Tintes e Ingeniería Química de la Universidad de Textiles de Bangladesh, en busca de alternativas sostenibles en procesos textiles, han aplicado el biopulido textil mediante enzimas celulasas extraídas del bagazo de caña en donde se obtuvieron como resultados la reducción en el peso del tejido hasta un 5,26% y la resistencia hasta un 10,54%; además los resultados demostraron que se eliminó casi el 100% de las fibras superficiales que son las responsables de la formación de pilling ; en este estudio se concluyó que el rendimiento del biopulido resalta la correlación efectiva entre la actividad enzimática y los efectos del biopulido deseados así como un procesamiento textil sostenible (Ikbal et al., 2024).

Según Gupta y Kelkar, (2021) del Departamento de Biotecnología, Universidad de Mumbai, donde realizó un estudio comparativo entre el uso de una enzima celulasa neutra aislada con un agente de bioacabado comercial dando como resultado la efectividad de esta enzima neutra aislada mostrando un rendimiento superior al de los bioacabados comerciales, mejorando significativamente las propiedades del tejido como pérdida del peso, resistencia al pilling, resistencia a la explosión y capacidad de tintura.

Según Mojsov et al. (2020) en su investigación realizada acerca de tratamientos enzimáticos para el algodón, presenta las ventajas y explica que sus aplicaciones, están aumentando y extendiéndose a más áreas de procesamiento textil; además asegura que nuevas

enzimas con alta actividad específica, mayor velocidad de reacción y tolerancia a temperaturas y pH más extremos podrían dar lugar al desarrollo de procesos continuos.

Como menciona Choudhury (2019) en el estudio del Institute of Polytechnic en India, se exploró el uso de enzimas en el procesamiento químico textil como una opción sostenible y funcional. Se evaluaron diferentes enzimas, como amilasas, catalasas y lacasas, que desempeñan funciones como la eliminación de almidón, la degradación de peróxido de hidrógeno y el blanqueo de materiales textiles. De igual manera, se mencionó la aplicación de celulasas en el acabado de denim y de lacasas en la decoloración de efluentes textiles. Los resultados mostraron que el uso de enzimas en procesos textiles reduce el tiempo de procesamiento, el consumo de energía y agua, y mejora la calidad del producto final. Se concluyó que la tecnología enzimática representa una alternativa viable para minimizar la contaminación en la producción textil y la reducción de tiempo en los procesos industriales.

La investigación realizada por Silva (2022) en la Universidad do Minho, Brasil, estudió la aplicación de tratamientos enzimáticos en textiles, especialmente en la prevención del pilling en fibras celulósicas. En este estudio se analizaron 15 enzimas de distintos proveedores para determinar su influencia en el biopulido de cuatro tipos de fibras: algodón, lyocell, modal y viscosa. Los resultados mostraron que las enzimas fueron eficaces para el algodón, lyocell y modal, respectivamente, todas ellas con estabilidad en medios neutros.

2.1.1 Estudios previos

En esta sección se presenta una revisión bibliográfica que incluye trabajos de titulación, artículos científicos y estudios especializados enfocados en el biopulido con enzimas celulasas y procesos afines.

2.1.2 Tratamientos para reducción de pilling

El pilling, fenómeno caracterizado por la formación de bolitas de fibras en la superficie de los tejidos debido al roce y desgaste, es uno de los defectos comunes que afecta la apariencia y calidad de los tejidos de algodón, especialmente los de punto. A lo largo del tiempo, en la industria textil se han desarrollado diversos tratamientos para reducir su formación, empleando tanto métodos mecánicos, químicos como biológicos.

Entre los tratamientos mecánicos más utilizados se encuentran el chamuscado que consiste en quemar superficialmente las fibras sueltas para evitar su desprendimiento y posterior formación de bolitas. Este método ha demostrado ser efectivo, pero como lo menciona Hasanbeigi (2010) implica un alto consumo energético y puede generar emisiones contaminantes.

Por otro lado, se han implementado acabados químicos basados en resinas antipilling y polímeros que crean una película protectora sobre la superficie del tejido, logrando reducir la formación de bolitas durante el uso. Sin embargo, diversos estudios como el de Ho y Kan (2022) señalan que estos tratamientos pueden afectar negativamente la suavidad, la permeabilidad y la biodegradabilidad del algodón, lo cual resulta poco deseable en la búsqueda de procesos responsables con el ambiente.

Frente a estas limitaciones, se han desarrollado otras alternativas, entre ellas el biopulido enzimático. Este proceso utiliza enzimas celulasas para eliminar microfibrillas superficiales a través de la hidrólisis controlada de la celulosa, obteniéndose una superficie más uniforme y una menor formación de pilling. El estudio realizado por Kushwaha (2023) confirma que el biopulido no solo logra resultados comparables a los tratamientos químicos tradicionales, sino que además disminuye el uso de productos tóxicos y el consumo de agua y energía, favoreciendo la adopción de prácticas más sostenibles en la industria textil.

2.1.3 Biopulido enzimático

Como lo menciona Uddin (2015) este tratamiento se basa en la acción hidrolítica de las celulasas, que rompen enlaces β-1,4 glucosídicos de la celulosa, eliminando microfibrillas y fibras sueltas que sobresalen de la superficie del hilo. De este modo, se obtiene una tela más suave, con mejor caída y menor propensión a la formación de pilling.

En su estudio de Mojsov et al. (2020) se evidencia que el biopulido permite obtener acabados más uniformes sin recurrir a procesos mecánicos agresivos como el chamuscado o químicos como las resinas sintéticas. Además, esta técnica mejora no solo la resistencia al pilling, sino también la estabilidad dimensional, la apariencia visual y la durabilidad de la prenda tras múltiples ciclos de lavado y uso. Asimismo, Jiang et al. (1999) menciona que la principal ventaja del biopulido es su contribución a la sostenibilidad, pues reduce significativamente el consumo de recursos hídricos y energéticos y minimiza la generación de residuos tóxicos.

Asimismo, Kirk et al. (2002) señala que la eficacia del biopulido depende de variables como la concentración enzimática, el pH, la temperatura de operación y el tiempo de exposición. Controlar estos parámetros es importante con el fin de garantizar los mejores resultados del proceso y evitar daños excesivos en la estructura de la fibra.

2.1.4 Influencia de la concentración enzimática

A bajas concentraciones enzimáticas 0.5-1%, el biopulido elimina las fibras sueltas de manera controlada, reduciendo el pilling sin comprometer significativamente la resistencia del tejido. Se ha observado que concentraciones moderadas de 1-2% mejoran la suavidad y la apariencia, pero un aumento excesivo por encima del 3% puede provocar una hidrólisis excesiva, causando pérdida de peso hasta un 5-10% y debilitamiento de la estructura del algodón (Uddin, 2015).

Las celulasas neutras, que operan a pH 6-7, requieren concentraciones ligeramente mayores para lograr efectos similares a las ácidas debido a su menor acción sobre la fibra, aunque presentan un menor riesgo de daño al tejido (Solé, 2014). Además, la concentración debe ajustarse según el tipo de tejido: tejidos más densos soportan dosis más altas, mientras que los ligeros requieren concentraciones menores para evitar deterioro (Cavaco y Gübitz, 2003). El control preciso de la concentración, combinado con parámetros como tiempo y temperatura, es importante para la efectividad del biopulido y la preservación de las propiedades del algodón.

2.1.5 Últimos avances

El ultrasonido es una tecnología que emplea ondas acústicas de alta frecuencia, superiores a 20 kHz, inaudibles para el oído humano. Estas ondas se generan mediante transductores y poseen la capacidad de penetrar materiales, producir cavitación en líquidos y transmitir energía sin contacto directo (Ensminger et al., 2024).

Según Easson et al. (2018), evidencia que esta tecnología reduce los tiempos de procesamiento en un 20-30% al mejorar la accesibilidad de las enzimas a las microfibrillas superficiales, sin comprometer la actividad enzimática.

Asimismo, Hoque et al. (2022) demuestran que las vibraciones generadas mejoran la penetración de agentes químicos en tejidos de algodón, facilitando la acción del tratamiento sobre la fibra. Aplicada al biopulido, esta tecnología permite operar a temperaturas (30 – 40 °C) y con menor concentración enzimática (hasta un 15% menos), reduciendo el consumo de energía y agua. Además, mejora la uniformidad del acabado y minimiza la pérdida de peso del tejido, reduciendo el deterioro de sus propiedades mecánicas.

Según Huang et al. (2017) señalaron que a 40 kHz y 220 W mejora la actividad de celulasas hasta en un 17%, optimizando la hidrólisis sin dañar la estructura del tejido. Además, la

desactivación enzimática postratamiento (pH 8 o 75-80°C) es fundamental para evitar daños excesivos.

Además, se combina con otros procesos textiles, como el desengomado y el blanqueo enzimático. Un estudio de Kabir et al. (2021) muestra que el uso de estas ondas con celulasas y pectinasas mejora la eliminación de impurezas, facilitando el teñido y reduciendo el pilling. Esto resulta en colores más vivos y tejidos de mayor calidad.

2.2 Marco legal

2.2.1 Constitución de la República del Ecuador

Como se menciona en los artículos 26 y 348 de la Constitución de la República del Ecuador, donde hace referencia a la sección educativa como un derecho gratuito con inversión estatal, para cualquier tipo de persona (Asamblea Constituyente, 2013):

> Art. 26.- La educación es un derecho de las personas a lo largo de su vida y un deber ineludible e inexcusable del Estado. Constituye un área prioritaria de la política pública y de la inversión estatal, garantía de la igualdad e inclusión social y condición indispensable para el buen vivir.
>
> Las personas, las familias y la sociedad tienen el derecho y la responsabilidad de participar en el proceso educativo.
>
> Art. 348.- La educación pública será gratuita y el Estado la financiará de manera oportuna, regular y suficiente. La distribución de los recursos destinados a la educación se regirá por criterios de equidad social, poblacional y territorial, entre otros.
>
> El Estado financiará la educación especial y podrá apoyar financieramente a la educación fisco misional, artesanal y comunitaria, siempre que cumplan con los

> principios de gratuidad, obligatoriedad e igualdad de oportunidades, rindan cuentas de sus resultados educativos y del manejo de los recursos públicos, y estén debidamente calificadas, de acuerdo con la ley. Las instituciones educativas que reciban financiamiento público no tendrán fines de lucro.
>
> La falta de transferencia de recursos en las condiciones señaladas será sancionada con la destitución de la autoridad y de las servidoras y servidores públicos remisos de su obligación.

2.2.2 Líneas de investigación de la Universidad Técnica del Norte (UTN)

El presente trabajo está relacionado con los lineamientos de investigación de la UTN de la Carrera de Textiles, fortaleciendo el desarrollo económico de la comunidad (Universidad Técnica del Norte, 2022):

1. Gestión, Producción, Productividad, Innovación y Desarrollo Socioeconómico.

2.3 Marco conceptual

2.3.1 Enzimas

De acuerdo con Aceves (2014) las enzimas son proteínas de gran tamaño que actúan como catalizadores biológicos, es decir, aceleran reacciones químicas que, de otro modo, serían demasiado lentas para sustentar la vida. Cada célula lleva a cabo miles de reacciones bioquímicas, y para cada una de ellas suele existir una enzima específica, aunque no todas se encuentran activas al mismo tiempo.

Una de las propiedades más importantes de las enzimas es su alta especificidad, ya que pueden reconocer y actuar únicamente sobre una molécula determinada, conocida como sustrato, transformándola en un producto específico. Gracias a esta característica, las enzimas logran acelerar reacciones químicas de forma muy eficiente; de hecho, algunas son capaces de procesar

millones de moléculas por segundo. Incluso se ha documentado que las más eficaces pueden aumentar la velocidad de una reacción hasta en 10^{17} veces en comparación con la reacción sin catalizador, lo que demuestra su enorme potencial como herramientas biotecnológicas (Rogers y Gibon, 2009).

Además, estas macromoléculas pueden funcionar fuera del entorno celular (in vitro), lo que ha permitido su utilización práctica desde la antigüedad en procesos beneficiosos para el ser humano, como la fermentación o el tratamiento de materiales.

2.3.2 Celulasas

Las celulasas son enzimas hidrolíticas que actúan sobre la celulosa, principal componente de fibras vegetales como el algodón. En el sector textil, esta propiedad se aprovecha en el biopulido, proceso que busca remover microfibrillas superficiales y así disminuir la aparición de pilling.

Las enzimas celulasas pueden clasificarse según el pH en el que mejor actúan: las celulasas ácidas operan en valores de pH entre 4.5 y 5.5, mientras que las neutras lo hacen entre 6.0 y 7.0. Según Ejaz et al. (2021) la clasificación de las celulasas por pH óptimo tiene implicaciones directas en la intensidad del tratamiento y en la estabilidad enzimática, lo que puede influir en la integridad del tejido tratado.

2.3.3 Tejido de punto tipo jersey

Como lo señala Asanovic et al. (2022) en su análisis de tejidos jersey frente a la formación de pilling el tejido de punto tipo jersey se caracteriza por su formación a partir de bucles entrelazados en una sola dirección, lo que le otorga propiedades como flexibilidad, suavidad y adaptabilidad al cuerpo. Gracias a estas cualidades, se emplea ampliamente en la confección de prendas como camisetas, ropa interior y ropa deportiva. Sin embargo, su estructura abierta y la

baja torsión de los hilos lo hacen más susceptible a defectos como el pilling, especialmente tras varios ciclos de lavado o uso.

A diferencia de los tejidos planos, cuya estructura es más cerrada y estable, los tejidos de punto tienden a formar microfibras sueltas con mayor facilidad, lo que favorece el enredo y posterior formación de bolitas. Esta susceptibilidad justifica la necesidad de tratamientos especiales de acabado, como el biopulido enzimático, para mejorar su comportamiento ante el desgaste por fricción (Kadolph J., 2014).

2.3.4 Pilling

Como menciona Solé (2014a) el pilling es un defecto superficial que se manifiesta como la formación de pequeñas bolitas o aglomerados de fibras en la superficie del tejido, originadas por la fricción durante el uso o el lavado. Este fenómeno afecta la apariencia del textil, reduce su vida útil y su valor comercial.

El pilling se forma debido a la presión y el roce de agentes externos, además de la fricción entre las fibras del tejido. Como resultado, las fibras pueden desplazarse desde el interior del material hasta la superficie, donde suelen entrelazarse y crear pequeños nudos. Estos nudos pueden crecer y consolidarse con el tiempo y la repetición del movimiento, formando las características bolitas visibles en la superficie del tejido (Guerrón, 2018).

La duración del pilling está determinada por las fuerzas de fricción que intervienen. Las bolitas se desprenden y eliminan el defecto si en algún momento la resistencia a la rotura de las fibras que los mantienen adheridos al tejido es superada por fuerzas externas. La **Figura 2** muestra el proceso de formación de bolitas y ocurre en varias etapas que se describen a continuación:

a) Aparición de las primeras fibras superficiales (vellosidad).
b) Las fibras sobresalientes se aflojan.

c) Las fibras se alargan y se entrelazan ligeramente.

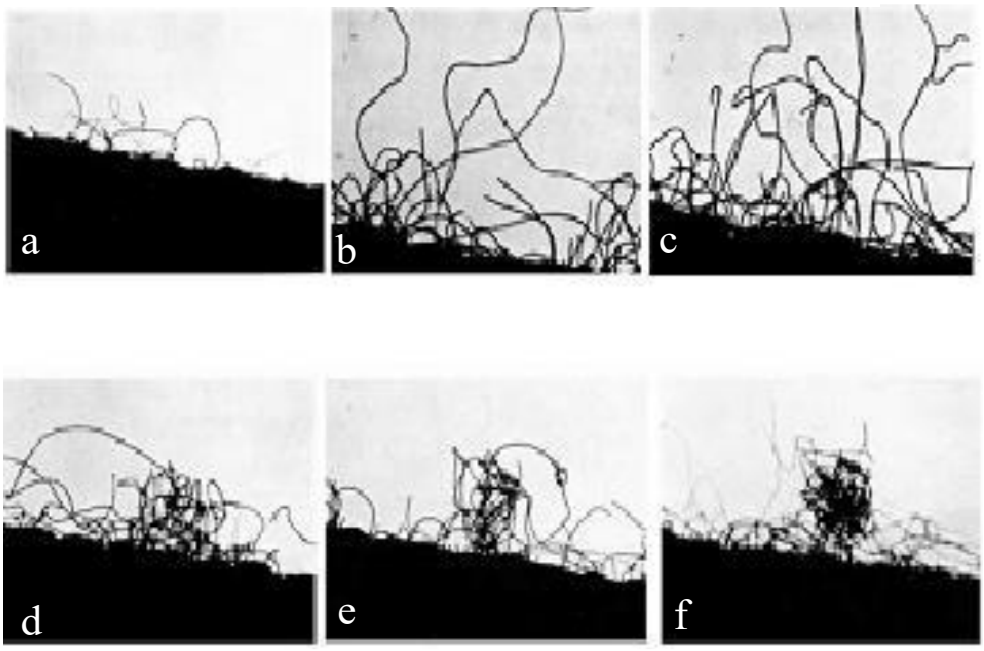
d) Las fibras se unen y enredan debido al movimiento repetido (fricción).

e) Las fibras se aglomeran y forman bolitas.

f) Las bolitas se desprenden o se quedan en el tejido dependiendo del material del tejido.

Figura 2

Etapas de formación del pilling



Fuente: (Guerrón, 2018)

Entre los factores que influyen en la aparición de pilling se encuentran el tipo de fibra, el hilado, la estructura del tejido y los acabados aplicados según lo menciona (Kazi, 2021). A continuación, se describen los principales parámetros de las fibras y cómo afectan a la formación de pilling.

Tipo de fibra

Comparadas con las fibras naturales, las fibras sintéticas tienen una tendencia más alta a formar pilling. Esta propiedad se debe a que es muy flexible y tiene una gran resistencia mecánica,

lo cual evita que se rompa o se despegue del tejido con facilidad. En consecuencia, las fibras sueltas quedan muy pegadas a la superficie, lo que contribuye a que se acumulen y consoliden bolitas visibles (Collier et al., 2009).

Finura de la fibra

Como lo menciona Solé (2014a) a menor valor de dTex, o sea, a mayor finura de la fibra, más se inclinará a producir vellosidad el hilo. Esto sucede porque las fibras más finas tienden a desplazarse con más facilidad hacia la superficie del hilo, lo que propicia la aparición de pelusa. Asimismo, si la finura es menor, habrá más fibras por sección transversal del hilo, lo que aumenta la posibilidad de que el pilling se forme en el producto final.

Rizos de la fibra

Mientras más rizos tengan las fibras, menos podrán migrar a la superficie del hilo o del tejido. Esto hace que el pilling se forme en menor medida. Esta consecuencia es el resultado de que el rizado aumenta el coeficiente de fricción entre fibras, lo que complica su movimiento y la migración a la superficie. En consecuencia, las fibras rizadas suelen mantenerse integradas en la estructura del tejido, lo que disminuye la presencia de bolitas visibles (Esparza, 2019).

Longitud de la fibra

Las fibras cortas tienen más propensión a crear pilling, porque se trasladan más fácilmente hacia la superficie del hilo. Esta migración promueve la separación y entrelazado de fibras sueltas, aumentando así la probabilidad de que se formen bolitas visibles (Esparza, 2019).

Es fundamental prevenir la rotura de fibras, principalmente en la fase de cardado, a lo largo del proceso de hilatura, porque esa ruptura reduce la longitud del hilo. Una distribución más corta supone una proporción más alta de fibras propensas a migrar, lo que eleva la probabilidad de que el producto final presente pilling.

Torsión de los hilos

Cuando el hilo tiene una torsión alta, las fibras se entrelazan con más firmeza en su estructura, lo que reduce su habilidad para moverse hacia la superficie. La creación de pilling disminuye debido a esta limitación en la movilidad de las fibras. Sucede lo mismo con la retorsión: al aumentar el número de giros entre hilos simples, se intensifica el anclaje interno de las fibras, lo que reduce todavía más la probabilidad de que estas se suelten y generen bolitas visibles en el tejido (Solé, 2014a).

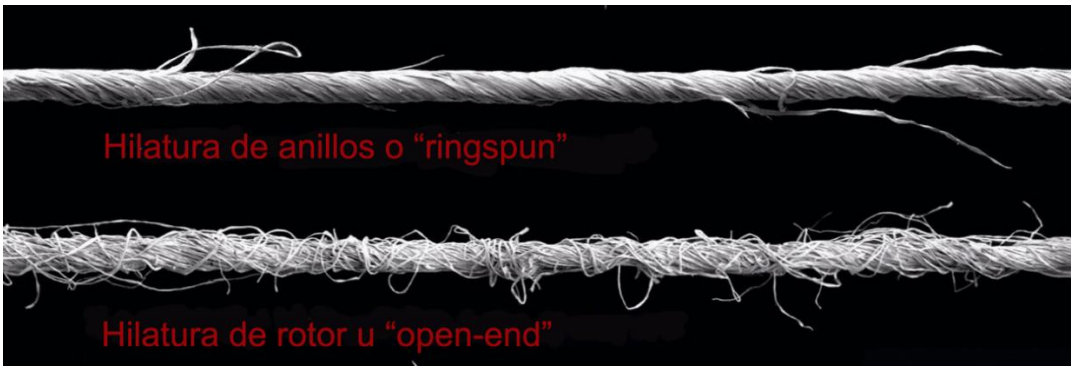
Título del hilo

Cuando el hilo es más grueso, la cantidad de fibras que contiene aumentará. Esta mayor concentración de fibras promueve que las fibras sueltas se desplacen hacia la superficie del tejido, lo que eleva las posibilidades de que se forme pilling. No obstante, si se comparan hilos del mismo título, los que están formados por fibras de mayor longitud tienen menor propensión al pilling. Esto es debido a que su longitud más larga permite una mejor cohesión interna del hilo y disminuye la liberación de fibras superficiales (Kasem et al., 2007).

Como se muestra en la **Figura 3**, los hilos fabricados mediante el sistema de hilatura *open-end* presentan una mayor tendencia a generar vellosidad superficial en comparación con los producidos por hilatura de anillos o peinada.

Figura 3

Vista ampliada de hilatura open end y anillos



Fuente:(Jeanero, 2024)

Biopulido

El biopulido es un tratamiento de acabado textil que utiliza enzimas celulasas para eliminar las microfibrillas sueltas de la superficie de los tejidos celulósicos, como el algodón. Este proceso busca mejorar la apariencia, suavidad y resistencia al pilling, sin recurrir a métodos mecánicos o químicos agresivos.

En términos funcionales, el biopulido permite obtener tejidos con un acabado más limpio, menor propensión a la formación de bolitas y mejor estabilidad dimensional. Por estas razones, su uso ha sido ampliamente adoptado por la industria textil comprometida con la sostenibilidad (Mojsov et al., 2020).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Enfoque y tipo de investigación

La investigación cuantitativa, originalmente desarrollada en el ámbito de las ciencias naturales, ha sido posteriormente adoptada en las ciencias sociales debido a su enfoque objetivo y de carácter deductivo. Esta metodología se basa en la medición precisa de fenómenos a través de procedimientos experimentales, lo que permite analizar y establecer patrones, relaciones o proyecciones dentro de una población mediante el uso de muestras representativas. Su principal fortaleza radica en la posibilidad de identificar relaciones causa-efecto entre variables, incluso en contextos sociales. Además, los resultados obtenidos a partir de datos cuantificables pueden ser utilizados como base para estudios posteriores, ya que permiten comparar y contrastar distintos escenarios mediante el apoyo de herramientas estadísticas (Alberto y Novoa, 2017).

La investigación cuantitativa se justifica por la necesidad de establecer relaciones de causa y efecto entre variables como el tipo de enzima, la temperatura de tratamiento y el grado de formación de pilling en tejidos de algodón. Este método permite aplicar procedimientos experimentales controlados, obtener datos medibles y realizar comparaciones objetivas entre condiciones de tratamiento.

3.2 Tipo de investigación

Investigación bibliográfica

La metodología bibliográfica es un enfoque de investigación que se basa en la revisión estructurada y crítica de fuentes científicas y académicas sobre un tema específico. Esta metodología permite seleccionar, analizar, interpretar y examinar aportaciones teóricas y resultados experimentales, con el fin de establecer un marco conceptual y fundamentar nuevas

investigaciones. Constituye una estrategia retrospectiva y sistemática que ofrece una visión general del conocimiento disponible del tema y de las lagunas existentes en la literatura.

Según Fernández y Guillén (2021), esta metodología combina la narrativa conceptual con criterios rigurosos de inclusión y valoración de la calidad de las fuentes. Se orienta a reunir información confiable y relevante, útil para orientar estudios posteriores.

El estudio se fundamentó a través de la metodología bibliográfica, que incluyó un análisis de estudios anteriores acerca de biopulido y pilling. Este método proporcionó un marco conceptual amplio, identificó aspectos poco estudiados y guió la elección de parámetros experimentales, asegurando la coherencia metodológica del trabajo.

Investigación experimental

La investigación experimental es un enfoque cuantitativo que se caracteriza por manipular intencionalmente una o más variables independientes para observar sus efectos sobre una variable dependiente, bajo condiciones controladas. Su objetivo principal es establecer relaciones causales entre fenómenos mediante la aplicación de un diseño riguroso, que incluye la medición previa y posterior a la intervención, el uso de grupos de control y la asignación aleatoria. Este tipo de investigación es ampliamente valorada por su capacidad de replicación y precisión en los resultados. Como señalan Sheppard (2020) “los experimentos permiten a los investigadores examinar el efecto directo de las intervenciones o tratamientos en condiciones estrictamente controladas, lo que fortalece la validez interna de los hallazgos”. Esta etapa describe el procedimiento experimental de la recolección de datos de la selección del tejido, aplicación de las enzimas en concentraciones ya establecidas.

Investigación comparativa

La metodología de la investigación comparativa permite el análisis de semejanzas y diferencias entre múltiples casos estudiados, con el propósito de descubrir patrones y relaciones causales. Este enfoque se basa en la recolección sistemática de datos y su análisis crítico, contrastando variables bajo condiciones controladas para comprender cómo influyen en los resultados.

Torres Reina (2021), sostiene que el método comparativo, el cual ha sido muy usado en ciencias sociales, es una herramienta fundamental para entender fenómenos complejos. Esto se debe a que ayuda a detectar diferencias y regularidades importantes en distintos contextos, lo que contribuye a la creación de un sólido conocimiento científico.

La investigación comparativa se utilizará para analizar el impacto del biopulido con enzimas celulasas ácidas en comparación con las neutras, en tejidos de 100% de algodón de tipo jersey, tomando en cuenta factores como la temperatura, el pH y la duración del tratamiento.

3.3 Técnicas de investigación

Como lo menciona Merlo (2018), una técnica de investigación es el conjunto de procedimientos prácticos que permiten al investigador recopilar, analizar y organizar información para responder a un problema o pregunta científica. Este estudio empleará una metodología experimental para analizar cómo el biopulido con enzimas celulasas ácidas y neutras influye en la formación de pilling, bajo condiciones controladas en laboratorio.

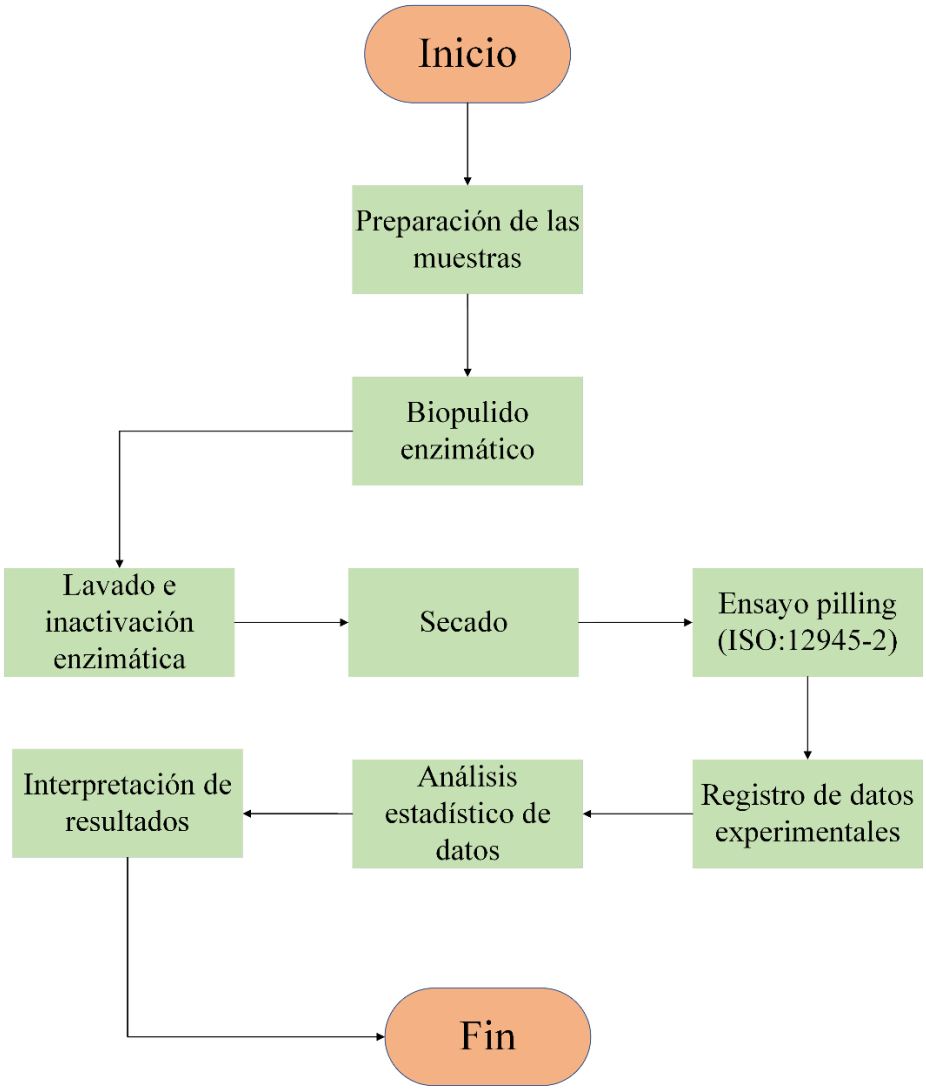
3.4 Flujogramas

El uso de flujogramas fue importante en el desarrollo del estudio, ya que facilitó la representación visual secuencial de cada etapa del proceso, permitiendo una comprensión estructurada y precisa del procedimiento experimental realizado.

Flujograma general

La **Figura 4** presenta el flujograma general que describe las etapas prácticas de la investigación, comenzando con la selección adecuada de las condiciones de tratamiento enzimático tanto con celulasas ácidas como neutras, con el objetivo de evaluar su influencia en la formación de pilling en tejidos de punto, de acuerdo con los procedimientos establecidos en la norma ISO 12945-2.

Figura 4
Flujograma general



Fuente: Propia

Las muestras fueron sometidas al proceso de biopulido enzimático, tras lo cual se procedió a asignar la siguiente codificación en: M1_ST, M2_ST, M3_ST, esto para las muestras sin tratamiento con enzimas, únicamente con el proceso de lavado; en la **Figura 5** se detallan las concentraciones de cada tipo de enzima en sus diferentes temperaturas junto con las respectivas codificaciones.

Donde:

M = Muestra (1, 2, 3)

T = Temperatura de tratamiento

- T1 = 40ºC
- T2 = 60ºC

ST = Sin tratamiento

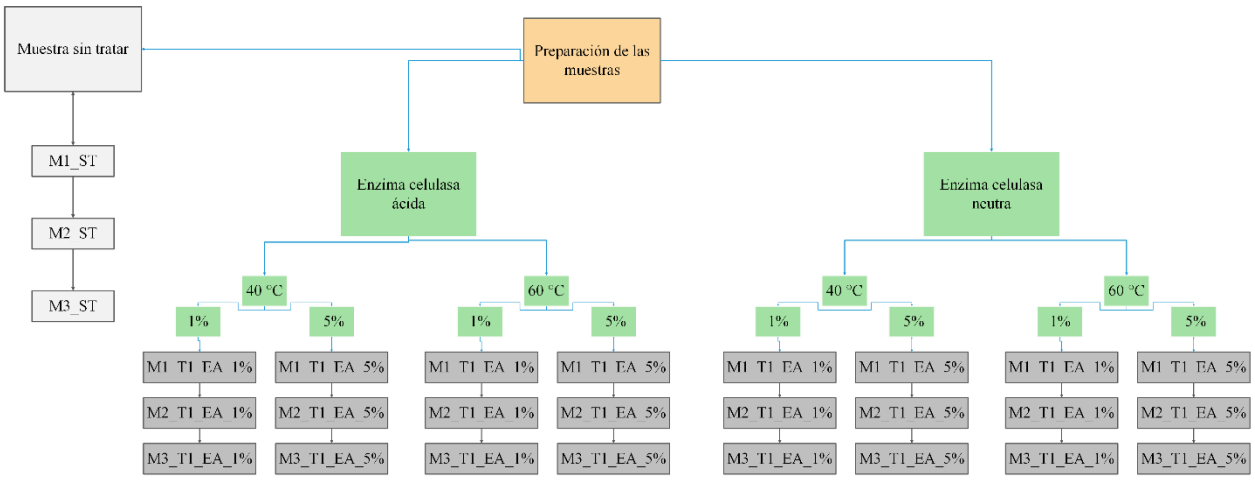
EN = Enzima neutra

EA= Enzima ácida

% = Concentración enzimática

Figura 5

Flujograma de muestras



Fuente: Propia

3.5 Materiales

Para este estudio se seleccionó un tejido de punto con las características descritas en la **Tabla 1** elaborado con hilos de hilatura de anillos, ampliamente utilizados en la industria textil por su versatilidad, resistencia y adaptabilidad en prendas de uso cotidiano.

Tabla 1
Especificaciones del tejido

Ficha técnica	
Nombre comercial	Jersey APT
Tipo	Tejido de punto
Ligamento	Jersey
Composición	100% Algodón
Ancho útil	1,66 m
Gramaje	152 g/m^2

Fuente: Propia

La **Tabla 2** muestra los materiales que se usaron para el desarrollo de esta investigación.

Tabla 2
Materiales utilizados

Materiales	**Características**
Balanza analítica	Permite medir el peso con precisión
Termómetro	Permite medir la temperatura
Enzimas celulasas	Proteínas que degradan la celulosa
Auxiliares	Químicos que permiten mejorar el proceso
pH metro	Mide el nivel de acidez o alcalinidad

Fuente: Propia

3.6 Equipos

Máquina de prelavados

La **Figura 6** muestra la máquina de prelavado, la cual cuenta con un tambor interno perforado de rotación continua, así como con indicadores integrados de temperatura y nivel de agua. Su velocidad de operación es ajustable, lo que permite adaptar el proceso según los requerimientos.

Figura 6
Máquina de prelavado



Fuente: Propia

Equipo Martindale

El Martindale es un equipo que se ha creado para llevar a cabo ensayos de pilling y abrasión en tejidos, aplicando las normas internacionales, como ASTM D4966/D4970, ISO 12945-2 y otras. Como se muestra en la **Figura** ***7***, su operación se fundamenta en movimientos circulares que siguen trayectorias de Lissajous, los cuales imitan el desgaste por fricción bajo condiciones controladas.

Con este equipo es posible analizar una variedad de materiales, entre ellos el cuero, los tejidos de punto y planos, los revestimientos y la calcetería, a través de configuraciones que se pueden adaptar. El Martindale emplea insumos estandarizados como fieltros, espumas, paños abrasivos y fotos de referencia con el fin de asegurar que los resultados sean reproducibles. Se puede encontrar en configuraciones de 4, 6, 8 y 9 posiciones para maximizar la capacidad de ensayo y el espacio. En el experimento, la cantidad de ciclos de fricción oscila entre los 125 y los 7000.

Figura 7
Equipo Martindale de la CTEX



Fuente: Propia

La **Tabla 3** muestra las operaciones que realiza el equipo de acuerdo con el tipo de ensayo a realizar, ya sea pilling o abrasión, tomando en cuenta las especificaciones definidas por la norma que se va a aplicar.

Tabla 3
Características técnicas del Martindale

Operaciones	Pilling	Abrasión
Norma	ISO 12945 - 2	ISO 12947
Cantidad de probetas	Modelo: 1305 hasta 5	
Área expuesta	6,45 cm^2	6,45 cm^2
Presión de trabajo	2,5 cN/cm^2 tejido de punto	9 kPa – Prendas
	6,5 cN/cm^2 tejido plano	12kPa - Tapicería
Velocidad de rotación	47,5 ± 2,5 rpm	47,5 ± 2,5 rpm
Recorrido de unidades motrices	24 ± 0,5 mm	60,5 ± 0,5 mm

Fuente: (Heal y Co., 2014)

3.7 Normas de referencia

La norma ISO 12945-2 establece un método estandarizado para la evaluación de la resistencia al pilling de los tejidos mediante el uso del equipo Martindale. Esta prueba simula el desgaste que sufre un tejido durante el uso normal, aplicando fricción controlada mediante movimientos circulares repetitivos. Luego de un número determinado de ciclos, las muestras se evalúan visualmente utilizando una escala del 1 al 5, donde 1 indica pilling severo y 5 la ausencia total de bolitas (ISO, 2020).

3.8 Procedimiento

El procedimiento se desarrolló en el Laboratorio de Procesos Químicos, en la máquina de prelavados, y posteriormente las muestras fueron ensayadas en el Martindale según la norma ISO 12945-2 para la evaluación del pilling. Las etapas se describen a continuación:

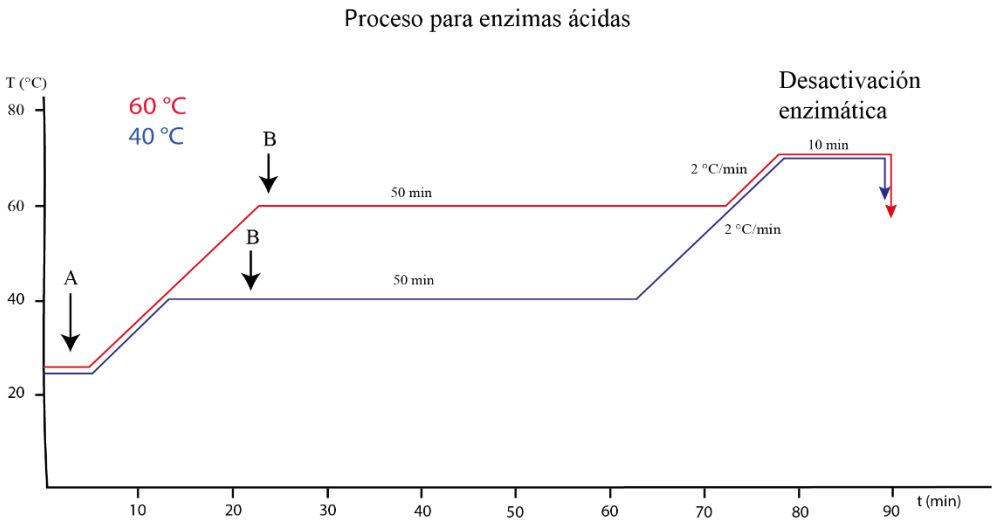
a) Se efectuó un prelavado del tejido de punto tipo jersey 100% algodón empleando una relación de baño 1:10, e iniciando el proceso a temperatura ambiente 23 °C. El material se

colocó junto con los auxiliares (humectante y detergente) y, posteriormente, se elevó la temperatura a 40 °C, manteniendo el proceso durante 20 minutos.

b) Como se presenta en la **Figura 8,** el tratamiento con enzima celulasa ácida se realizó empleando una concentración del 1 % y 5% spf, manteniendo un pH 5 y una relación de baño 1:12. Se trabajó con tres muestras a 40 °C y 60 °C, cada una con un tiempo de 50 minutos bajo agitación constante.

Figura 8

Curva de proceso para enzimas ácidas



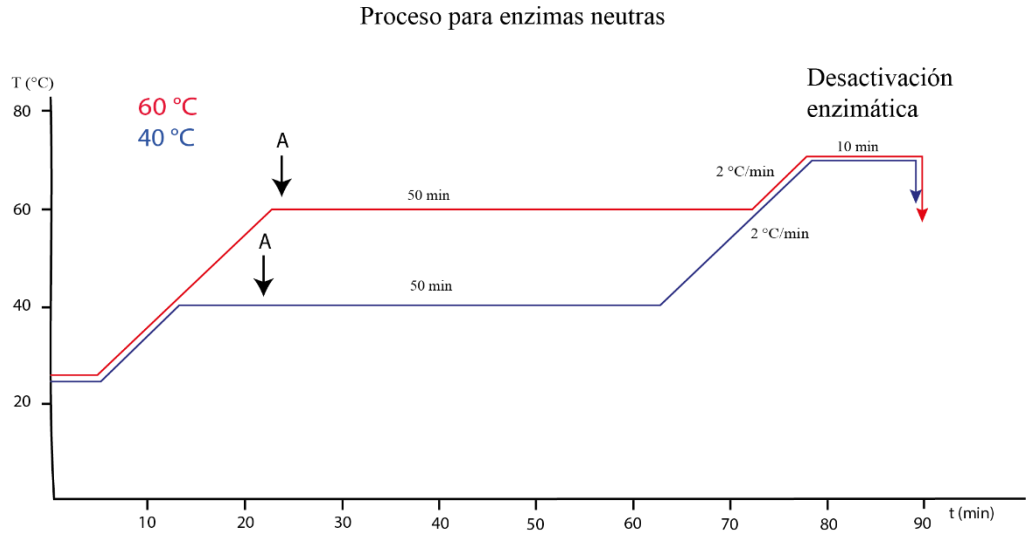
A: Ácido (hasta obtener pH 5)
B: Enzimas ácidas - 1% -5%

Fuente: Propia

c) También, se aplicó el biopulido con enzima celulasa neutra como se muestra en la **Figura 9**, utilizando una concentración del 1 % y 5% spf, con pH 7 y la relación de baño 1:12. Para este tratamiento también se realizaron tres muestras por cada temperatura (40 °C y 60 °C), con un tiempo de 50 minutos.

Figura 9

Curva de proceso para enzimas neutras



A: Enzimas neutras 1% y 5%

Fuente: Propia

d) Para la desactivación enzimática, tanto en los tratamientos con celulasa ácida como con celulasa neutra, se elevó la temperatura del baño hasta 80 °C durante 10 minutos. Este procedimiento se realizó posteriormente al proceso de biopulido para la inactivación total de la enzima y evitar la posibilidad de una hidrólisis excesiva que pudiera afectar la resistencia y estabilidad del tejido.

e) Para evaluar la propensión a la formación de pilling en las muestras tratadas y en la muestra de control, se utilizó el equipo Martindale, según los parámetros de la norma ISO 12945-2. Este ensayo consiste en someter las muestras a un desgaste por fricción mediante movimientos circulares bajo presión controlada, simulando el roce que ocurre durante el uso normal de la prenda. Cada muestra fue expuesta a 7000 ciclos en el equipo Martindale, de acuerdo al procedimiento que se describe a continuación

- Los grupos de muestras correspondientes a los tratamientos con enzimas celulasas ácidas y neutras, en sus diferentes temperaturas de aplicación, así como la muestra

sin tratamiento enzimático, fueron cortados utilizando una cortadora circular (sacabocados).

- En total se obtuvieron 21 muestras circulares con un área de 154 cm^2.
- En primer lugar, se colocó la probeta de tejido previamente cortada; en segundo lugar, se añadió el fieltro, que actúa como soporte y distribuye la presión; y finalmente se colocó el contrapeso, cuya función es aplicar la carga normalizada sobre la muestra durante el ensayo de abrasión.
- Cada probeta fue montada en los discos del equipo Martindale.

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Resultados

En este capítulo se presentan los resultados del biopulido y del ensayo Martindale, permitiendo comparar el efecto de enzimas celulasas neutras y ácidas en la formación de pilling. Los resultados se enfocaron en las muestras tratadas con enzimas, excluyendo las muestras sin tratamiento, ya que los resultados se orientan a comparar el comportamiento del tejido sometido al proceso enzimático.

Se llevó a cabo un diseño factorial multinivel con un total de 24 corridas. El diseño se realizó en tres bloques. El orden de los experimentos ha sido completamente aleatorizado. Los grados de libertad para el error se establecen en 15. La variable respuesta es el grado de pilling después de 7000 ciclos.

La unidad experimental se estableció como tejido de algodón. Los factores de estudio considerados fueron el tipo de enzima que fue ácida y neutra, la concentración de 1% y 5%, así como la temperatura de proceso de 40 °C y 60 °C. El diseño experimental se realizó con tres réplicas por tratamiento, que permitió asegurar la confiabilidad estadística de los resultados. Para el análisis de los datos se empleó el software STATGRAPHICS Centurión, versión 16.1.18.

4.1.1 Resultados del proceso de biopulido

El proceso de biopulido se llevó a cabo en la máquina de prelavados utilizando tres probetas de tejido de algodón por cada combinación, bajo las condiciones especificadas anteriormente. Para las formulaciones ácidas se trabajó con un medio controlado a pH 5, mientras que para las formulaciones neutras se mantuvo un pH 7. La aplicación se realizó siguiendo parámetros establecidos en estudios previos, permitiendo una interacción adecuada entre las enzimas y las

fibras, facilitando la eliminación de la vellosidad superficial sin comprometer la integridad del tejido. Al finalizar el tratamiento se evidenció en el interior de la máquina la presencia de fibrillas desprendidas del tejido, resultado directo de la acción enzimática sobre las microfibrillas superficiales, lo que pone de manifiesto la acción enzimática durante el tratamiento.

4.1.2 Resultados de la evaluación a la tendencia a la formación de pilling

La **Tabla 4** presenta los valores evaluados que fueron considerados en el diseño experimental, en la cual se especificaron los niveles de cada variable con sus respectivas unidades de medida. Estos factores fueron definidos con el objetivo de analizar el comportamiento del tejido frente a la formación de pilling después del proceso de biopulido a diferentes concentraciones y temperaturas.

Tabla 4
Factores de estudio

Factores	Bajo	Alto	Niveles	Unidades
Enzimas	Neutra	Ácida	2	
Temperatura	40	60	2	(°C)
Concentración Enzima	1	5	2	(%)

La **Tabla 5** presenta los valores promedios obtenidos por cada probeta (24 en total) luego de evaluación a la formación de pilling, realizada en el equipo martindale. Cada bloque corresponde a un conjunto de pruebas realizadas bajo las condiciones experimentales establecidas previamente. Los resultados permiten observar variación en el comportamiento de los tejidos frente al desgaste superficial, evidenciando la influencia de los tratamientos aplicados

Tabla 5
Resultados del diseño experimental y tratamientos

Bloque	Enzimas	Temperatura (°C)	Concentración (%)	Promedio C/P
1	Ácida	60	1	1,5
1	Neutra	40	1	4,16
1	Ácida	60	5	1,5
1	Neutra	60	5	2,66
1	Ácida	40	1	1,33
1	Ácida	40	5	1,16
1	Neutra	60	1	1,16
1	Neutra	40	5	3,83
2	Ácida	60	5	1,41
2	Ácida	60	1	1,58
2	Neutra	60	5	2,66
2	Neutra	40	1	3,91
2	Ácida	40	1	1,16
2	Neutra	60	1	1,16
2	Neutra	40	5	4,33
2	Ácida	40	5	1,16
3	Neutra	60	5	2,75
3	Neutra	60	1	1,16
3	Ácida	60	5	1,5
3	Ácida	40	1	1,25
3	Neutra	40	1	4,08
3	Ácida	40	5	1,33
3	Ácida	60	1	1,66
3	Neutra	40	5	4,08

La **Tabla 6** presenta los resultados óptimos determinados para las variables de estudio, obtenidos a partir del análisis de los resultados experimentales y de la evaluación de los efectos principales de los factores considerados en el diseño experimental. La combinación corresponde al punto de operación más favorable dentro del rango evaluado ya que, constituye una mejora de la resistencia a la formación de pilling en el tejido de algodón.

Tabla 6
Condiciones óptimas para el biopulido

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Enzimas	Neutra	Ácida	Neutra
Temperatura (ºC)	40	60	40
Concentración Enzima (%)	1	5	5

4.2 Discusión de resultados.

En esta sección se recopilaron los datos obtenidos para el análisis estadístico de las muestras en los ensayos de evaluación de la tendencia a la formación de pilling antes y después del proceso de biopulido. El análisis estadístico se realizó mediante análisis de varianza ANOVA, con el fin de evaluar la influencia de las variables de estudio.

4.2.1 Análisis de la varianza en la formación de pilling

La **Tabla 7** muestra los resultados del análisis de la varianza (ANOVA) aplicado al grado de pilling posterior al ensayo Martindale, considerando el tipo de enzima, la concentración y la temperatura. Los resultados mostraron que los tres factores principales ejercen una influencia estadísticamente significativa sobre la formación de pilling ($p < 0,05$), siendo el tipo de enzima el factor con mayor impacto, como lo indica su mayor valor de Razón-F.

Asimismo, las interacciones entre los factores (AB, AC y BC) también resultaron significativas, lo que sugiere que el efecto de cada variable está influenciado por las demás. Por otra parte, los bloques no presentaron significancia estadística, confirmando la adecuada consistencia entre las repeticiones experimentales. Los resultados obtenidos indican que la optimización del biopulido responde al efecto combinado de las variables analizadas.

Tabla 7
Análisis de la varianza del grado de pilling

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Enzimas	15,6817	1	15,6817	207,80	0,0001
B: Temperatura	5,11527	1	5,11527	67,78	0,0001
C: Concentración Enzima	0,75615	1	0,75615	10,02	0,0064
AB	8,88167	1	8,88167	117,69	0,0001
AC	1,08375	1	1,08375	14,36	0,0018
BC	0,75615	1	0,75615	10,02	0,0064
Bloques	0,0191083	2	0,00955417	0,13	0,8820
Error total	1,13198	15	0,075465		
Total (corr.)	33,4257	23			

Nota: R-cuadrada = 96,6135%; R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 94,8073%; Error estándar del est. = 0,274709; Error absoluto medio = 0,20316; Estadístico Durbin-Watson = 1,56066 (P=0,0646); Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,185977

El modelo obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 96,6135 % y un R^2 ajustado de 94,8073 %, lo que indica que las variables evaluadas explican gran parte de la variabilidad observada en el grado de pilling. La diferencia reducida entre ambos valores indica que el ajuste del modelo es adecuado.

El error estándar del estimado (0,274709) y el error absoluto medio (0,20316) reflejan una variabilidad reducida de los residuos. En cuanto al estadístico Durbin-Watson (1,56066; p = 0,0646), no se detectó autocorrelación significativa, lo que indica independencia en los errores del modelo.

A partir de los coeficientes estimados se observa que el tipo de enzima es variable con mayor influencia dentro del modelo, ya que explicó aproximadamente el 46,9% de la variabilidad

total observada en el grado pilling. La contribución porcentual de cada factor fue calculada a partir de las sumas de cuadrados del ANOVA.

La temperatura y la concentración también influyen en el modelo, aunque en menor proporción, aportando aproximadamente un 15,3 % y un 2,3 % de la variabilidad total del grado de pilling, respectivamente, en comparación con el tipo de enzima que representa la mayor contribución dentro del modelo. En cuanto a las interacciones, su efecto es más reducido, pero forman parte del comportamiento conjunto de las variables dentro del rango evaluado. En la **Tabla 8** se muestran los datos de los coeficientes estimados y la interacción que existe entre los factores.

Tabla 8
Coeficiente de regresión

Coeficiente	**Estimado**
constante	5,56
A: Enzimas	-3,53125
B: Temperatura	-0,0727917
C: Concentración Enzima	-0,355
AB	0,0608333
AC	-0,10625
BC	0,008875

La ecuación ajustada constituye una herramienta analítica que permite describir y predecir la formación de bolitas en tejidos, integrando las variables experimentales consideradas y ofreciendo una base cuantitativa para la interpretación de los resultados. La ecuación ajustada es:

$$Grado\ de\ pillig: 5{,}56 - 3{,}53125A - 0{,}0727917B - 0{,}355C + 0{,}0608333AB - 0{,}10625AC + 0{,}008875BC$$

Donde:

A = Tipo de enzima

B = Temperatura (°C)

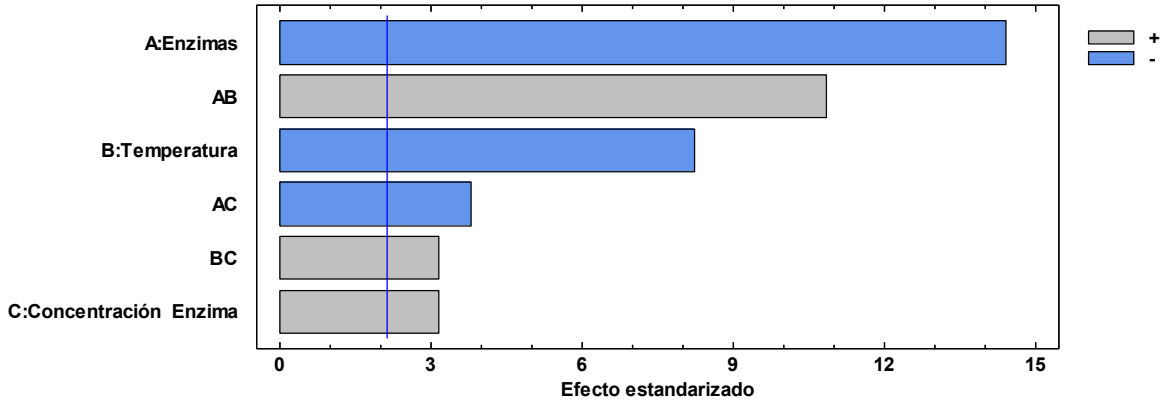
C = Concentración enzimática (%)

En el diagrama de Pareto que se observa en la **Figura 10** permite identificar qué factores tienen mayor influencia sobre la respuesta. Se observa que el tipo de enzima es el efecto predominante dentro del modelo, lo que confirma su papel determinante en la variación del grado de pilling.

De igual manera, la presencia de interacciones con valores relevantes indica que el comportamiento del tejido no depende únicamente de un factor aislado, sino de la combinación de las condiciones del proceso. Los efectos de menor magnitud, aunque presentes, tienen contribución más limitada dentro del rango experimental evaluado.

Figura 10

Diagrama de Pareto estandarizado



El hecho de que el factor enzima supere ampliamente el nivel de significancia refuerza lo observado en el ANOVA, donde presentó el mayor valor de Razón-F.

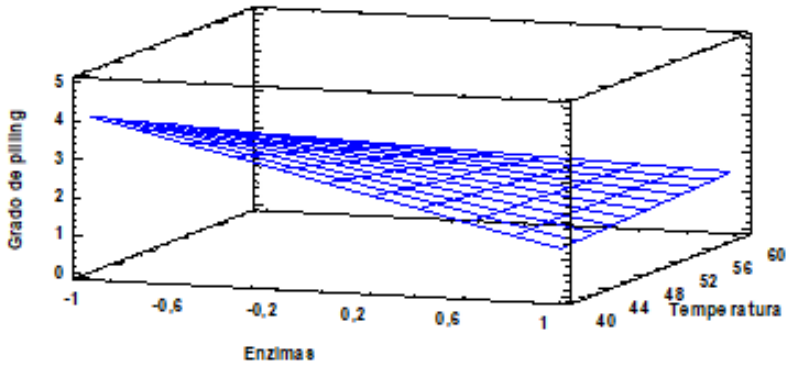
En la **Figura 11** se presenta la superficie de respuesta estimada para el grado de pilling en función del tipo de enzima y la temperatura, manteniendo constante la concentración enzimática

en 5 %. Se observa una tendencia descendente del grado de pilling cuando se emplea enzima ácida y se incrementa la temperatura, mientras que las mejores calificaciones se alcanzan con el uso de enzima neutra a 40 °C.

La inclinación del plano evidencia que el tipo de enzima ejerce una influencia más marcada que la temperatura, lo cual coincide con los resultados obtenidos en el análisis de varianza, donde este factor presentó el mayor valor de significancia estadística. La superficie de respuesta muestra la interacción entre las variables estudiadas y confirma que la combinación de enzima neutra y menor temperatura favorece una mejor resistencia a la formación de bolitas en el tejido de algodón.

Figura 11

Superficie de respuesta estimada tridimensional



De manera general, los valores obtenidos en el ensayo Martindale muestran variaciones significativas en el grado de pilling según el tipo de enzima, la temperatura y la concentración, lo cual se respalda con el análisis estadístico realizado. Los datos evidencian diferencias numéricas entre los tratamientos evaluados, así como la presencia de interacciones entre los factores dentro del rango experimental considerado. Estos resultados constituyen la base para el análisis e interpretación desarrollados en el siguiente apartado.

CAPÍTULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Tras realizar el análisis del efecto del tratamiento con enzimas celulasas ácidas y neutras en tejidos de algodón, sustentado en la revisión de fuentes bibliográficas especializadas como ScienceDirect y Scopus, se determinó que la información recopilada contribuyó de manera significativa al desarrollo del presente trabajo investigativo. Si bien la información disponible sobre el tema es limitada, esta permitió comprender de forma adecuada la interacción que existe entre las principales variables del proceso, así como la reacción de hidrólisis enzimática de los enlaces β-1,4-glucosídicos de la celulosa presentes en la fibra de algodón. A partir de este análisis, se determinó que variables como la temperatura de tratamiento y la concentración enzimática influyen directamente en el proceso de biopulido.
- Tras la aplicación del proceso de biopulido con enzimas celulasas ácidas y neutras, utilizando concentraciones del 1 % y 5 %, temperaturas de tratamiento de 40 °C y 60 °C, un tiempo de proceso de 50 minutos y pH de 5,5 para celulasas ácidas y pH 7 para celulasas neutras, se evaluó el efecto de estas condiciones en el proceso de biopulido. Los resultados obtenidos evidenciaron que la temperatura de 40 °C favorece una actividad enzimática adecuada, especialmente en el caso de las celulasas neutras, al mejorar la resistencia al pilling. En contraste, el incremento de la temperatura hasta 60 °C no mostró mejoras relevantes en la resistencia al pilling, al igual que la concentración que no mostró mejoras significativas con lo que se puede concluir que la temperatura constituye una variable crítica para la correcta aplicación del proceso de biopulido.

- Al evaluar la formación de pilling conforme a la norma ISO 12945-2:2020 los resultados mostraron que las muestras M_1, M_2, M_3_EN_T1_5% alcanzaron calificaciones visuales de 4–5 después de 7000 ciclos, lo que refleja una baja formación de pilling. Por otro lado, las muestras tratadas con enzimas celulasas ácidas y las muestras sin tratamiento presentaron calificaciones inferiores (1–2), se observó que el pilling en las muestras con enzimas ácidas, se manifestó en un mayor número de ciclos en comparación con las muestras sin tratar. Estos resultados indican que el biopulido con celulasas neutras proporciona una mejor resistencia al pilling del tejido.
- La comparación de los resultados, junto con el análisis estadístico mediante ANOVA y el análisis gráfico, permitió establecer las condiciones óptimas para la aplicación del biopulido enzimático en tejidos de algodón. El uso de enzimas celulasas neutras al 5 %, a 40 °C, durante 50 minutos y pH 7, resultó más efectivo para reducir el pilling. Estas condiciones favorecen una acción enzimática eficiente y controlada, sin afectar la apariencia del tejido. Asimismo, la literatura científica señala que las enzimas celulasas son biodegradables, lo que respalda su potencial de aplicación en procesos orientados a la sostenibilidad.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda ampliar la investigación bibliográfica mediante la inclusión de estudios más recientes y específicos sobre la interacción entre enzimas celulasas y fibras de algodón, especialmente aquellos que analicen con mayor profundidad la influencia de variables como el tiempo de tratamiento. Esto permitiría ampliar el sustento teórico del proceso de biopulido y permitir una comprensión más detallada de los fenómenos de hidrólisis

enzimática que influyen en el comportamiento superficial del tejido, sirviendo de base para futuras investigaciones con mayor alcance experimental.

- Se recomienda profundizar en el estudio del efecto de la temperatura de tratamiento en el proceso de biopulido enzimático, evaluando intervalos térmicos más específicos y combinándolos con diferentes tiempos de proceso, buscando mejorar la actividad enzimática sin comprometer la integridad del tejido. Asimismo, se recomienda evaluar la estabilidad y eficiencia de las enzimas celulasas bajo distintas condiciones operativas. Adicionalmente, se propone investigar la aplicación del biopulido enzimático asistido por ultrasonido, considerando el uso de equipos de ultrasonido como una alternativa tecnológica que podría mejorar la difusión enzimática, reducir tiempos de proceso y mejorar en desempeño del acabado.
- Se recomienda complementar la evaluación del pilling con otras pruebas físicas y de desempeño del tejido, tales como resistencia al desgarro, gramaje, capacidad de tintura, encogimiento y torque, con el fin de analizar para evaluar el efecto del biopulido enzimático sobre las propiedades del tejido. La realización de estas evaluaciones permitiría determinar si la aplicación de enzimas celulasas contribuye a la mejora o al deterioro de dichas propiedades, aportando más información sobre el impacto del tratamiento enzimático sobre la calidad final del tejido.
- Se recomienda que en la aplicación práctica del proceso de biopulido enzimático, se incorporen evaluaciones ambientales básicas del efluente, tales como pH, demanda química de oxígeno (DQO) y carga orgánica, y compararlos con procesos de acabados convencionales que tengan el mismo objetivo. La implementación de estas evaluaciones permitiría valorar de manera objetiva el impacto ambiental del biopulido y facilitar la toma

de decisiones para su adopción como una alternativa de acabado con menor impacto ambiental en la industria textil.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aceves, M. A. (2014). Enzimas: ¿qué son y cómo funcionan? *Revista Digital Universitaria*, *15*(12). https://www.revista.unam.mx/ojs/index.php/rdu/article/view/430

Asamblea Constituyente. (2013). *constitucion*.

Asanovic, K. A., Ivanovska, A. M., Jankoska, M. Z., Bukhonka, N., Mihailovic, T. V., & Kostic, M. M. (2022). Influence of pilling on the quality of flax single jersey knitted fabrics. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, *17*. https://doi.org/10.1177/15589250221091267

Cavaco-Paulo, A., & Gübitz, G. (2003). Catalysis and processing. In *Textile Processing with Enzymes* (pp. 86–119). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1533/9781855738669.86

Collier, B. J. ., Bide, M. J. ., & Tortora, P. G. . (2009). *Understanding textiles*. 564.

Easson, M., Condon, B., Villalpando, A., & Chang, S. C. (2018). The application of ultrasound and enzymes in textile processing of greige cotton. *Ultrasonics*, *84*, 223–233. https://doi.org/10.1016/J.ULTRAS.2017.11.007

Ejaz, U., Sohail, M., & Ghanemi, A. (2021). Cellulases: From bioactivity to a variety of industrial applications. In *Biomimetics* (Vol. 6, Number 3). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/biomimetics6030044

Ensminger, D., Leonard, J., & Bond. (2024). *Ultrasonics fundamentals, technologies, and applications*.

Esparza Leslie. (2019). *Influencia de las torsiones y título del hilo en la formación de pilling en tejidos de alpaca 100%*.

Guerrón Mireya. (2018). *Estudio Comparativo de los Ensayos de Pilling entre el Random Tumble Pilling y Martindale en Tejidos de Algodón 100%, Poliéster 100% y Poliéster/Algodón 65/35% de Género de Punto E laborados en Confecciones Recreativas Fibran*.

Gupta, S., & Kelkar-Mane, V. (2021). Use of uni-enzyme on cotton knitted fabric and its comparison with commercial formulation. In *Indian Journal of Fibre & Textile Research* (Vol. 46).

Hasanbeigi, A. (2010). *Energy-Efficiency Improvement Opportunities for the Textile Industry*.

Ho, L. Y., & Kan, C. W. (2022). Effect of Resin Finishing on Some Properties of 100% Cotton Light Weight Woven Fabric. *Coatings*, *12*(11). https://doi.org/10.3390/coatings12111791

Hoque, M. M. U., Rimu, S. H., Mallik, A. K., & Rahman, M. M. (2022). Ecofriendly pretreatment of cotton fabrics by ultrasonication and reusing bath chemicals. *Environmental Science and Pollution Research 2022 30:13*, *30*(13), 36904–36914. https://doi.org/10.1007/S11356-022-24947-W

Huang, G., Chen, S., Dai, C., Sun, L., Sun, W., Tang, Y., Xiong, F., He, R., & Ma, H. (2017). Effects of ultrasound on microbial growth and enzyme activity. *Ultrasonics Sonochemistry*, *37*, 144–149. https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2016.12.018

Hussain, A., & Khan, R. (2024). Anti-Pilling Properties of Polyester-Cotton Blend using Plasma and Chemical Finish. *Journal of Design and Textiles*, *3*(1), 71–104. https://doi.org/10.32350/jdt.31.05

Ikbal, M. S., Tisha, F. A., Asheque, A. I., Hasnat, E., & Uddin, M. A. (2024). Eco-friendly biopolishing of cotton fabric through wasted sugarcane bagasse-derived enzymes. *Heliyon*, *10*(4). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26346

ISO. (2020). *ISO 12945-2:2020 - Textiles — Determinación de la propensión de los tejidos a la formación de bolitas, pelusas o matas en la superficie — Parte 2: Método Martindale modificado*. https://www.iso.org/standard/75375.html

James H. Heal & Co. Ltd. (2014). *Martindale 1300 series Operator's Guide*. http://www.james-heal.co.uk

Jeanero. (2024). *Cómo se hace un par de jeans: el hilado (parte 2 de 6) – Jeanero*. https://jeanero.com/2017/07/04/como-se-hace-un-par-de-jeans-el-hilado-parte-2-de-6/comment-page-1/

Jiang, Y., Hu, J., & Ko, F. (1999). Characterizing and Modeling Bending Properties of Multiaxial Warp Knitted Fabrics. *Textile Research Journal*, *69*(9), 691–697. https://doi.org/10.1177/004051759906900910;CTYPE:STRING:JOURNAL

Kabir, S. Md. M., Koh, J., Kabir, S. Md. M., & Koh, J. (2021). Sustainable Textile Processing by Enzyme Applications. *Biodegradation Technology of Organic and Inorganic Pollutants*. https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.97198

Kadolph J., Sara. (2014). *Textiles*. Pearson Education Limited.

Kasem, M. H., Riva, A., De, E., Hilados, L., Características, Y., Los, D. E., De, T., & Parte, A. (2007). *Estructura de los hilados y características de los tejidos de algodón. parte 1: efecto de la estructura de los hilados sobre el pilling del tejido*.

Kazi Elias. (2021). *Effect of pilling properties on different knit fabrics and recommendation for deciding Pilling Requirement*.

Kirk, O., Borchert, T. V., & Fuglsang, C. C. (2002). Industrial enzyme applications. *Current Opinion in Biotechnology*, *13*(4), 345–351. https://doi.org/10.1016/S0958-1669(02)00328-2

Kushwaha, K. (2023). Bio-polishing: Sustainable way to enrich the Surface of Cellulosic Fabric using Enzyme. In *Advances in Biotechnology and Bioscience (Volume - 15)*. AkiNik Publications. https://doi.org/10.22271/ed.book.2455

Luana Bruna da Silva Oliveira. (2022). *Universidade do Minho Escola de Engenharia*.

Maps. (2023). *Google Maps*. https://www.google.com/maps/@0.3760272,-78.1222329,15z?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MTEwOS4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D

Merlo Milton. (2018). *Libro electrónico de investigación cualitativa, para los estudiantes de la maestría en actividad física, del instituto de postgrado de la universidad técnica del norte*.

Mojsov, K., Janevski, A., Andronikov, D., Jordeva, S., Golomeova, S., & Gaber, S. (2020). Enzymatic treatments for cotton. *Tekstilna Industrija*, *68*(2), 12–17. https://doi.org/10.5937/tekstind2002011m

Mora Muñoz, E., & Carrera, M. P. (2021). El modelo de producción y consumo denominado "moda rápida" analizado bajo aspectos toxicológicos y ecológicos The production and consumption model called "fast fashion" analyzed under toxicological and ecological aspects. *Revista Biorrefinería*, *4*, 2021.

Ocaña-Fernández, Y., & Fuster-Guillén, D. (2021). The bibliographical review as a research methodology. *Revista Tempos e Espaços Em Educação*, *14*(33), e15614. https://doi.org/10.20952/REVTEE.V14I33.15614

Rofi, M. R. I., & Rahman, M. R. (2025). A critical review on environmental pollution caused by the textile industry. *Explora: Environment and Resource 2025, 2(2), 025160032*, *2*(2), 025160032. https://doi.org/10.36922/EER025160032

Rogers, A., & Gibon, Y. (2009). Enzyme Kinetics: Theory and Practice. *Plant Metabolic Networks*, 71–103. https://doi.org/10.1007/978-0-387-78745-9_4

Roy Choudhury, A. K. (2019). Enzyme applications in textile chemical processing. In *Sustainable Technologies for Fashion and Textiles* (pp. 91–115). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102867-4.00005-0

Sheppard, V. (2020). *6.1 Experiments*.

Solé Antonio. (2014a). *El Pilling EnLos Articulos Textiles*.

Solé Antonio. (2014b). *Enzimas en la industria textil: biopulido*.

Torres Reina, D. (2021). El método comparativo en la investigación social y en el análisis histórico. *Historia y Espacio*, *17*(57). https://doi.org/10.25100/hye.v17i17.10117

Uddin, M. G. (2015). Effects of biopolishing on the quality of cotton fabrics using acid and neutral cellulases. *Textiles and Clothing Sustainability 2015 1:1*, *1*(1), 1–10. https://doi.org/10.1186/S40689-015-0009-7

Universidad Técnica del Norte. (2022). *Universidad Técnica del Norte – Ciencia y Técnica al Servicio del Pueblo*. https://www.utn.edu.ec/

Wagaw, T., Getnet, M., & Flatie, D. (2024). *Chemical Processing of Cotton Textiles*. 305–330. https://doi.org/10.1007/978-981-99-9149-5_12

ANEXOS

Anexo 1

Fibrillas desprendidas del tejido después del proceso de biopulido



Anexo 2

Corte y carga de muestras al Martindale



Anexo 3

Certificado de uso de laboratorio de la Carrera de Textiles

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
LABORATORIO DE PROCESOS TEXTILES DE LA CARRERA DE TEXTILES

IBARRA - ECUADOR
Carrera de Textiles
Ingeniería

Ibarra, 8 de junio del 2026

CERTIFICADO DE LABORATORIO

Yo, **MSc. José Rafael Posso Pasquel,** en calidad de responsable técnico del laboratorio de procesos textiles de la Carrera de Textiles:

CERTIFICO

Que el señor **Jonathan Santiago Pantoja Chalacan,** portador de la cédula de ciudadanía N° **1050259843**, ha realizado ensayos de laboratorio referentes al Trabajo de Titulación, con el tema: **"INFLUENCIA DEL BIOPULIDO CON ENZIMAS CELULASAS ÁCIDAS Y NEUTRAS EN LA FORMACIÓN DE BOLITAS PILLING EN TEJIDO 100% ALGODÓN"**, los equipos utilizados en el laboratorio fueron:

- **Balanza analítica**
- **Cortadora circular**
- **Martindale**

Además, se le ayudó con las asesorías necesarias para cumplir a cabalidad el proceso.

Atentamente:

MSc. JOSÉ POSSO.
RESPONSABLE TÉCNICO DEL LABORATORIO DE PROCESOS TEXTILES – CTEX