

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**COMPORTAMIENTO DEL GRADO DE DEGRADACIÓN DEL  
COLORANTE INDIGO EN DENIM 100 POR CIENTO ALGODÓN  
DEBIDO A UN LAVADO INDUSTRIAL ENZIMÁTICO UTILIZANDO  
VARIABLES COLORIMÉTRICAS**

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**YÁSLIN KASTILLO RAMIREZ**

ASESORADO POR: ING. OSCAR PÁEZ LÓPEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICO**

GUATEMALA, ABRIL DE 2003

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **COMPORTAMIENTO DEL GRADO DE DEGRADACIÓN DEL COLORANTE INDIGO EN DENIM 100 POR CIENTO ALGODÓN DEBIDO A UN LAVADO INDUSTRIAL ENZIMÁTICO UTILIZANDO VARIABLES COLORIMÉTRICAS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química con fecha 3 de noviembre del 2003

**Yáslin Castillo Ramírez**

# UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

## FACULTAD DE INGENIERÍA



### NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO:	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I:	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II:	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III:	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV:	Br. Kenneth Issur Estrada Ruíz
VOCAL V:	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO:	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

### TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO:	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR:	Ing. Orlando Posadas Valdez
EXAMINADOR:	Ing. Julio Enrique Chávez Montúfar
EXAMINADOR:	Ing. Otto Raúl de León de Paz
SECRETARIO:	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**COMPORTAMIENTO DEL GRADO DE DEGRADACIÓN  
DEL COLORANTE INDIGO EN DENIM 100 POR CIENTO  
ALGODÓN DEBIDO A UN LAVADO INDUSTRIAL  
ENZIMÁTICO UTILIZANDO VARIABLES  
COLORIMÉTRICAS**

**YÁSLIN KASTILLO RAMÍREZ**

ASESORADO POR ING. ÓSCAR PÁEZ LÓPEZ

**GUATEMALA, ABRIL DE 2004**

## **DEDICATORIA:**

- A DIOS** Como una muestra de mi infinito agradecimiento por todas las bendiciones recibidas a lo largo de mi vida, y porque me ha permitido compartir ésta con los seres que amo.
- A LA VIRGEN MARIA** A ti, Santísima Virgen, por ser el modelo de mujer y madre que ha guiado mi vida.
- A MIS PADRES** Herlindo Castillo Cifuentes y Aura Lilia Ramírez de Castillo, dedico este acto a ustedes con todo el amor que anida en mi corazón como una muestra de agradecimiento por todos los esfuerzos realizados para hacer de mí una persona de bien.
- A MI ESPOSO** Oscar David, quise resumir en un par de líneas la forma de expresar lo tanto que te amo, pero comprendí que la manera más amorosa de hacerlo es decirte: “Gracias porque has hecho de mi vida, una vida feliz.”
- A MIS HIJOS** José David y María José por ser la razón de mi existencia, que este triunfo mío, sirva de ejemplo y motivación en sus vidas para ser personas de bien, recuerden que estoy para apoyarles y guiarles en cada momento de sus vidas, los amo con todo mi ser.
- A MIS HERMANOS** Yadira, Yaniri y Breiner, no hay nada más especial en este mundo que mi familia, y eso lo son ustedes, por eso les dedico este acto como una muestra de amor hacia ustedes y sus respectivas familias.
- A MI OTRA FAMILIA** David Morales, Alicia de Morales, Ingrid, Heidi, Guillermo, Alicia y Amauri realmente he encontrado en ustedes una familia más. Gracias por todo su apoyo y cariño.

## **A MIS AMIGOS**

Tonito Escobar, Irayda Hernández, Luis Fernando Tanchez, Javier Santiago, Patty Munguía, Frisly Cornejo, Vera de León, Luis Domínguez Lobos, Enrique Montes, José Alfredo Ruiz y Víctor Hugo Olivares porque a lo largo de mi vida han sido los tesoros que Dios ha puesto en mi camino.

## **AGRADECIMIENTOS**

**AI ING. OSCAR PÁEZ**

Por su valiosa asesoría en el desarrollo de este trabajo de graduación.

**AI ING. JOSÉ ALFREDO RUIZ**

Por su valioso apoyo en la realización de este trabajo.



# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b> .....	III
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	V
<b>GLOSARIO</b> .....	IX
<b>RESUMEN</b> .....	XIV
<b>OBJETIVOS</b> .....	XV
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	XVI
<b>1. MARCO TEÓRICO</b> .....	1
1.1. Contexto histórico de las fibras textiles.....	1
1.2. Fibras naturales.....	2
1.2.1. Fibras de origen animal.....	3
1.2.2. Fibras de origen vegetal.....	6
1.2.3. Fibras de origen mineral.....	8
1.3. Fibras químicas.....	9
1.3.1. Fibras artificiales .....	11
1.3.2. Fibras sintéticas.....	17
1.4. Proceso de manufactura del denim.....	27
1.5. El análisis colorimétrico.....	34
1.5.1. El diagrama de cromaticidad cie 1983.....	43

<b>2. METODOLOGÍA.....</b>	<b>57</b>
2.1. Recursos.....	57
2.1.1. Humanos.....	57
2.1.2. Físicos.....	57
2.2. Equipo.....	58
2.3. Procedimiento Experimental.....	58
2.3.1. Corte de muestras.....	58
2.3.2. Elaboración de tubos.....	58
2.3.3. Calibración del espectrofotómetro.....	59
2.3.4. Medición de muestras por medio del espectrofotómetro....	59
2.3.5. Proceso de lavado industrial.....	60
2.3.6. Proceso de lavado por utilizar para el lavado industrial....	61
2.4. Análisis estadístico de datos.....	62
<b>3. RESULTADOS.....</b>	<b>65</b>
3.1. Discusión de resultados.....	69
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>73</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>75</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>77</b>
<b>APÉNDICE.....</b>	<b>79</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1	CIELab tolerancias	48
2	Lote aceptable	49
3	Elipse aceptable	49
4	Elipses de aceptabilidad	50
5	CIELab talla de tolerancias aceptables	50
6	CIELab parámetros de tolerancia	51
7	CIELab DE* tolerancias	52
8	Variación del lote	55
9	DL gráfico de producción	56
10	Sesgado de la distribución de lotes	56
11	Proceso de lavado estándar con variación de tiempo de abrasión y adición de coadyugantes requeridos	61
12	Curva de degradación del colorante índigo a través de la variable DE CMC en el tiempo	65
13	Curva de degradación del colorante índigo a través de la variable DH CMC en el tiempo	66
14	Curva de degradación del colorante índigo a través de la variable DL CIELab en el tiempo	67
15	Curva de evaluación de costo a través de la variable DE CMC respecto al tiempo de abrasión	68
16	Variable DE en método CMC	85
17	Variable DH en el método CMC	85
18	Variable DL en e metodo CIELab	86

## TABLAS

I	Resultados espectrofotométricos y datos estadísticos de los procesos de de 0 a 10 minutos de abrasión enzimática	79
II	Resultados espectrofotométricos y datos estadísticos de los procesos de de 15 a 25 minutos de abrasión enzimática	80
III	Resultados espectrofotométricos y datos estadísticos de los procesos de de 30 a 40 minutos de abrasión enzimática	81
IV	Resultados espectrofotométricos y datos estadísticos de los procesos de de 45 a 55 minutos de abrasión enzimática	82
V	Resultados de datos promedio por corrida con datos calculados de UCL/ LCL y límites superior e inferior	83
VI	Resultados de las ecuaciones correlacionadas de las variables espectrofotométricas o el costo contra el tiempo de abrasión	84

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Sigma$	Sumatoria de datos.
<b>B(b*)</b>	Cromaticidad amarillo-azul.
$\beta_0$	Ordenada al origen.
<b>Chroma (C*)</b>	Saturación o pureza. Permite, en la sensación visual, realizar una estimación de la proporción de color cromáticamente puro (monocromático) contenido en la sensación visual total. A nivel psicosensores, la saturación define subjetivamente el carácter más o menos coloreado de una fuente luminosa o de la superficie de un objeto por oposición al blanco (acromático) desprovisto por definición de cualquier tono propio.
<b>Cielab(Ciel*a*b*)</b>	Método internacional instituido por la Comisión Internacional de la Iluminación, la única organización internacional de recomendación y normalización para la iluminación, el color y la colorimetría, creada en 1913.

<b>CMC (CMC 2:1)</b>	Se le conoce por un sistema modificado a partir del método de CIELAB, sobre la base de elipsoides de aceptación en el plano cromático y el eje de claridad.
<b>Da*</b>	Representa el delta o variación del componente cromático rojo-verde.
<b>Db*</b>	Representa el delta o variación del componente cromático amarillo-azul.
<b>DC*</b>	Representa el delta o variación del croma o la saturación.
<b>DE*</b>	Es la raíz cuadrada de suma de los cuadrados de DL, Da, Db.
<b>DH*</b>	Representa el delta o variación del ángulo de tono o la tonalidad cromática.
<b>H (h*)</b>	Representa el ángulo de tono o la tonalidad cromática.

<b>Hue (h)</b>	Tono o tonalidad cromática. Es el atributo de la sensación visual que ha dado lugar a las denominaciones de color como: violeta, azul, verde, amarillo, anaranjado, rojo, púrpura, etc. Es el elemento psicosensorial, que corresponde aproximadamente a la longitud de onda dominante.
<b>HZ</b>	Hertz, medida de frecuencia.
<b>L*</b>	Representa la claridad.
<b>LCL</b>	Límite inferior de control.
<b><math>\mu/x</math></b>	Promedio.
<b>min</b>	Minutos.
<b>ml</b>	Mililitros.

<b>mm</b>	Milímetro.
<b>n</b>	Número de datos.
<b>nm</b>	Nanómetros.
<b>plg</b>	Pulgadas.
$\sigma$	Desviación estadística.
<b>SS<sub>xy</sub></b>	Pendiente de la recta.
<b>UCL</b>	Límite superior de control.

## GLOSARIO

<b>Abrasión</b>	Proceso por medio del cual se utilizan sustancias comerciales utilizables en forma de arena o polvo para dar forma, limpiar o pulir superficies. El proceso de abrasión consta con abrasivos que tienen gran dureza, porosidad, alto punto de fusión y son químicamente inertes. Algunos ejemplos de estos abrasivos son, la perlita, la piedra pómez, arena sílice.
<b>B(b*)</b>	Representa el componente cromático amarillo-azul.
<b>Chroma (C*)</b>	Saturación o pureza. Permite, en la sensación visual, realizar una estimación de la proporción de color cromáticamente puro (monocromático) contenido en la sensación visual total. A nivel psicosensorial, la saturación define subjetivamente el carácter más o menos coloreado de una fuente luminosa o de la superficie de un objeto por oposición al blanco (acromático) desprovisto por definición de cualquier tono propio.
<b>CIELe<sub>lab</sub>(Cie<sub>l</sub>*a*b*)</b>	Método internacional instituido por la Comisión Internacional de la Iluminación, la única organización internacional de recomendación y normalización para la iluminación, el color y la colorimetría, creada en 1913.
<b>CMC (2:1):</b>	Se le conoce por un sistema modificado a partir del método de CIELAB, en base a elipsoides de aceptabilidad con distribución en el plano cromático y el eje de claridad.

<b>Cromaticidad</b>	Relativo a los colores, dicese del sistema que procede por semitonos: escala cromática. Aplicase al cristal o instrumento que presenta los objetos contorneados con los colores del arco iris.
<b>Da*</b>	Representa el delta o variación del componente cromático rojo-verde.
<b>Db*</b>	Representa el delta o variación del componente cromático amarillo-azul.
<b>DC*</b>	Representa el delta o variación del croma o la saturación.
<b>DE*</b>	Es la raíz cuadrada de suma de los cuadrados de DL, Da , Db.
<b>Desactivación</b>	Pérdida de la actividad y/o selectividad del catalizador, causada por depósito de sólidos, por envenenamiento, por cambios en la estructura del catalizador o soporte por la temperatura, presión, etc. El proceso de desactivación se denomina por analogía con los biológicos.
<b>Desengome</b>	Proceso por medio del cual, se eliminan los aprestos a una prenda a través de un proceso enzimático.
<b>Dh*</b>	Representa el delta o variación del ángulo de tono o la tonalidad cromática.
<b>Electromagnéticas</b>	De electromagnetismo. Parte de la física que estudia las acciones y reacciones de las corrientes eléctricas sobre los campos magnéticos.

Elipses	Curva plana convexa y cerrada, con dos ejes de simetría que se cortan perpendicularmente.
Enzima celulosa	Sustancia proteínica producida por células vivas, que actúa como catalizador en los procesos de metabolismo. Es específica para la celulosa.
Extractado	Proceso por medio del cual se separa el agua excedente de una prenda mojada, la cual interesa secar.
Filamento	En una bombilla o lámpara, con hilo metálico conductor que se pone incandescente al pasar la corriente.
GretagMacbeth	Marca registrada de equipo de laboratorio para laboratorios textiles.
H (h*)	Representa el ángulo de tono o la tonalidad cromática.
Hue (h)	Tono o tonalidad cromática. Es el atributo de la sensación visual que ha dado lugar a las denominaciones de color como: violeta, azul, verde, amarillo, anaranjado, rojo, púrpura, etc. Es el elemento psicosensoial, que corresponde aproximadamente a la longitud de onda dominante.
Huso	Artículo muy antiguo para la fabricación de hilo, el cual consta de un rodete y pedal.
<b>Incandescencia</b>	Estado de un cuerpo que, a causa de una temperatura elevada, se ha vuelto luminoso.

<b>L*</b>	Representa la claridad u oscuridad de un color en el sistema CIE Lab.
<b>LCL</b>	Límite inferior de control.
<b>Metamerismo</b>	Está presente cuando dos objetos de curva espectral diferente, presentan apariencias coloreadas idénticas bajo una condición definida de iluminación y de observación, y apariencias diferentes cuando cambian las condiciones de iluminación. A nivel colorimétrico, el metamerismo se da cuando los valores triestímulos XYZ, de los objetos son idénticos bajo un iluminante y diferentes bajo otro.
<b>Planckiano</b>	Se le denomina a una fuente perfectamente difusora denominada cuerpo negro.
<b>Prisma</b>	Cuerpo geométrico limitado por dos polígonos paralelos e iguales, llamados bases, y por tantos paralelogramos como lados tenga cada base. Sólido triangular de materia transparente que desvía y descompone los rayos luminosos.
<b>Propalette Textile Silver</b>	Programa de computación registrado por GretagMacbeth.
<b>Radiaciones</b>	Emisión de ondas, rayos o partículas. Elemento de una onda luminosa o electromagnética: radiación infrarroja.
<b>Rinse</b>	Traducción del inglés, enjuagar. Proceso por medio del cual se elimina el químico residual del proceso anterior a un lavado industrial.

<b>Secado</b>	Separación total o parcial del líquido volátil que contiene un cuerpo no volátil. Aunque la sustancia que se va a desecar puede ser sólida, líquida o gaseosa y el líquido volátil cualquiera, el caso más corriente es el secado de sólidos que contiene agua en forma de humedad.
<b>Tonalidad</b>	Se le conoce como el cambio de color de claro a oscuro, existente en una tela a lo largo de una distancia específica.
<b>Trinomio</b>	Expresión algebraica compuesta de tres términos.
<b>UCL</b>	Límite superior de control.

## RESUMEN

La evaluación calorimétrica realizada por medio de lecturas espectrofotométricas utilizando las variables DE CMC, DH CMC y DL CIELab para evaluar el comportamiento de la degradación del colorante índigo en tela denim 100 por ciento algodón, afectada por un lavado enzimático, a diferentes tiempos de abrasión, con la conservación de la misma relación de químicos en el baño de lavado industrial, se procedió como a continuación se describe.

Se realizaron tubos de tela denim 100 por ciento algodón teñida con índigo puro simulando piernas de pantalón, las cuales fueron sometidas a proceso de lavado industrial con abrasión enzimática a diferentes tiempos de proceso para degradar el colorante índigo a través de éste. Una vez lavadas las muestras se realizaron las mediciones espectrofotométricas respectivas a cada tiempo de abrasión con los dos métodos de evaluación, tomando en cuenta sólo las variables en estudio que fueron: DE y DH en CMC, y DL en CIELab.

Posterior a esto se realizaron las curvas de degradación del colorante índigo así como la determinación de la tendencia matemática que describiera el comportamiento de la degradación del mismo respecto al lavado industrial ya mencionado, así como se planteó la evaluación del costo, respecto a la variable DE en CMC, contra el tiempo de abrasión, con el fin de crear una herramienta útil para la evaluación de color y costo respecto a los estándares de un cliente cuando éste solicite dicho lavado industrial.

## OBJETIVOS

- **General**

Determinar la tendencia matemática que describa la degradación del colorante índigo en una tela de algodón, tomando en cuenta la variación del tiempo de abrasión en un proceso de lavado enzimático, descrito por las variables colorimétricas de DE, Dh en fórmula CMC y DL en fórmula CIELab para evaluación de color.

- **Específicos**

1. Establacer en las curvas de degradación del dolorante Indigo, el comportamiento de L vrs. tiempo, DH vrs. tiempo, DE(CMC) vrs. tiempo.
2. Calcular la variación costo, en un lavado enzimático industrial, en relación al tiempo de degradación del colorante índigo, en un proceso de base a una variación de DE mediante mediciones espectrofotométricas utilizando el método CMC 2:1.

## INTRODUCCIÓN

El teñido de fibras con el colorante índigo ha cambiado, en la actualidad las prendas que contienen índigo puro sin que éste sea mezclado con otros sustituyentes como los sulfuros u otros colorantes, son prendas de un valor más elevado y los procesos de manufactura para este tipo de tela deben ser más estrictos y por ende más cuidadosos. Ya que si este se remueve más de lo deseado en una carga de lavado industrial por efectos de desgaste con piedra o con enzimas, no hay forma de volver a agregar el colorante en la fibra nuevamente y se producen prendas fuera de especificación por color.

En el presente trabajo de graduación se estudia el comportamiento de degradación del colorante índigo por efectos de desgaste de las enzimas celulosas a diferentes tiempos de contacto en una tela *denim* 100 por ciento algodón, utilizando para la evaluación, las siguientes variables colorimétricas.

- DE \* (variable que mide la diferencia global perceptible por el ojo de color contra un estándar).
- DL\* (variable que mide las diferencias de color respecto a la intensidad del mismo contra un estándar dado).
- Dh\* (variable que mide las diferencias de croma de un color contra un estándar).

El proceso de lavado industrial enzimático posee estrictamente los siguientes pasos: desengomado, mediante el cual se elimina el apresto de la tela, posterior a esto se realiza un desenjuague que se utiliza para limpiar la prenda de residuos del paso anterior.

La abrasión en este paso del proceso se utiliza para degradar el colorante índigo y bajar la intensidad del mismo por medio de tres procesos que se dan dentro de una lavadora industrial:

- Mecánico-prenda
- Abrasión o desgaste enzimático
- Prenda-prenda

El mecánico-prenda consiste en la abrasión ocasionada por el contacto directo del bombo de una lavadora con la prenda. La abrasión o desgaste enzimático (enzimas celulosas) radica en un proceso de catalización de la velocidad de reacción, a la reducción de la celulosa en azúcares reductores que degradan paulatinamente el colorante índigo de la tela. Y la abrasión prenda-prenda, se basa en la abrasión que se origina por el contacto directo de una prenda con otra.

El siguiente paso del lavado es la desactivación de la enzima y se finaliza el lavado con un proceso de suavizado para obtener el tacto final deseado.

Después de haber sometido las muestras al lavado industrial ya descrito se realizará la medición colorimétrica respectiva a cada uno de los diferentes tiempos de contacto con la enzima, ésto será evaluado con un espectrofotómetro GRETAG MACBETH 2180uv. Utilizando el método CIELab y CMC 2:1.(Métodos estándar para la medición de las variaciones de color en textiles).

Las mediciones de color con el espectrofotómetro, se realizarán a las muestras antes de lavado enzimático y después de haber sometido éste a diferentes tiempos de contacto, incrementando el tiempo de 5 en 5 minutos hasta obtener la variación máxima permitida de 1.8 en DE en una muestra lavada medida en sistema CMC 2:1., el que es el parámetro de estandarización internacional definido por la Asociación Americana de Textiles, Colorantes y Químicos (AATCC).

Finalmente, mediante el sistema CIELab se determinará la tonalidad de la muestra, es decir, si se tiene una degradación del colorante que vire a cualquiera de los ejes del diagrama de color ya sea rojizo, azulado, amarillento o verdoso, con esto se obtendrá la tendencia matemática de degradación de colorante índigo utilizando variables colorimétricas que describan el tiempo óptimo de lavado.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 Contexto histórico de las fibras textiles

La naturaleza brinda una serie de recursos que el hombre puede aprovechar sin necesidad de alterarlos. El ser humano para cubrirse, utilizó en un principio las pieles de los animales luego descubrió otras clases de materiales y probó con algunas fibras, las cuales le brindaron mayor comodidad. Al final estas terminaron por reemplazar la piel de los animales. En los tiempos Neolíticos el hombre había aprendido a entrelazar fibras vegetales para formar rústicos tejidos que pronto embellecerían mediante el teñido y el estampado.

Alrededor del año 5.000 a.c. en las cunas de la naciente civilización ya se conocía el cardado y el hilado mediante la utilización del huso, retorciendo y humedeciendo las hebras el tejedor formaba un hilo largo y resistente a la tensión. La idea de entretrejer hilos horizontales y verticales, tal como se hacía con el mimbre y la paja para la fabricación de canastos, dio nacimiento al telar, instrumento perfeccionado más tarde por los egipcios, que se mantuvo sin variaciones hasta la edad media.

Las fibras son estructuras unidimensionales, largas y delgadas, que se doblan con facilidad y su propósito principal es la creación de tejidos. Estas tienen una longitud muy superior a su diámetro y están orientadas a lo largo de un solo eje.

Las diferentes clases de fibras para la elaboración de tejidos han tenido una gran evolución conjuntamente con la historia de la humanidad, y éstas pueden clasificarse de acuerdo a su origen de fabricación, en naturales y químicas.

## **1.2 Fibras naturales**

Son las fibras proporcionadas por la naturaleza en diversas formas o bien, se producen a partir de un desarrollo natural por creación biológica. Se clasifican de acuerdo a su origen que puede ser:

- Animal
- Vegetal
- Mineral

Las fibras de origen animal pueden provenir de:

- Bulbo pilífero (lana)
- Glándula (seda)

Las fibras de origen vegetal pueden provenir de:

- Semillas (algodón)
- Tallos (cáñamo, lino, yute)
- Hojas (sisal, cáñamo, manila , alóe)
- Frutos (coco, *kapoc*)

Las fibras de origen mineral pueden ser:

- Amianto
- Lanos de vidrio

### **1.2.1. Fibras de origen animal**

- Seda

Ha sido llamada la reina de las fibras, su calidad y brillo se asoció a las vestimentas reales y a las sagradas.

Se han encontrado restos de seda en momias que datan de un siglo antes de Cristo. Su comercialización se realizó entre Asia Central y los mercados romanos en el siglo II de nuestra era hasta el siglo XVI, esta comercialización se conoció con el nombre de la Ruta de la seda.

El gusano de seda había llegado a Japón cuatro siglos antes de la era cristiana, pero fue China el primer productor de esta fibra, más adelante Italia, en el siglo XVI, se convirtió en el centro de la seda de occidente.

Actualmente el mayor productor de seda es Colombia ya que aprovecha el clima que es propicio para el cultivo del árbol de la morera, principal alimento del gusano de seda.

El gusano que produce la seda es de fílum, artrópodo; clase, insecto; orden, lepidóptero, que nace de huevo, vive cinco etapas (huevo o semilla, larva o gusano, ninfa o crisálida y mariposa) su principal alimento como ya se mencionó son las hojas de árbol de la morera.

La larva hila su capullo segregando un jugo (fibroína) que endurece al contacto con el aire.

La seda es un filamento continuo proteínico compuesto por fibroína y cerisina (sustancia gomosa que mantiene unidos los filamentos). Goza de gran resistencia y gran poder de absorción por lo que recibe muy bien los tintes. Resiste las soluciones alcalinas débiles como los jabones, el bórax y los amonios. Los ácidos concentrados, la descomponen debido a su constitución proteínica. Los ácidos orgánicos no le producen ningún daño por lo que se puede utilizar en el proceso de acabado en la obtención de la fibra. Los quitamanchas la afectan poco. El oxígeno del aire la descomponen lentamente, por lo que hay que guardarla en sitios sellados.

Cada filamento que sale del capullo mide entre 1,000 y 1,300 yardas, tiene gran elasticidad y forma triangular, lo que permite reflejar la luz como prisma.

Para obtenerla en forma artesanal se colocan los capullos en agua caliente para eliminar la cerisina y luego se busca con una escobilla de bambú la punta de los capullos para desenredar la hebra. Luego se hila formando madejas, las cuales se dejan secar para que no se peguen. Para eliminar totalmente la cerisina de la fibra y dejar ésta en condiciones óptimas de teñido se colocan las madejas en lejía o en agua con jabón.

- Lana

Es una fibra animal proveniente del pelo de oveja (*Ovis aries*) compuesta por una sustancia proteínica llamada queratina, que le da elongación y resistencia, su estructura consta de tres partes: corteza, cutícula y médula. Esta última contiene el pigmento que da color a la fibra.

Las prendas de lana son muy confortables, elásticas y de tacto suave. Se adaptan a los movimientos del cuerpo humano y recuperan muy bien su forma inicial después de uso.

La gran voluminosidad se deriva de su rizado, que esconde una gran cantidad de aire, y su bajo peso hace de los tejidos de lana excelentes aislantes térmicos, lo que permite conservar muy bien el calor del cuerpo y protegerle del ambiente exterior.

La lana no ocasiona problemas de electricidad estática, razón por la cual los tejidos de esta fibra se mantienen más limpios al no atraer partículas de suciedad.

La lana absorbe una elevada cantidad de agua sin dar sensación de humedad, además posee la propiedad de retención de la llama o de flamabilidad, es decir, los tejidos de lana autoextinguen la llama y se queman muy lentamente.

Se tiñe fácilmente y del producto teñido se obtiene una buena solidez de los colores al lavado, a la luz y a la intemperie.

La lana es muy sensible a temperaturas extremas. El planchado debe realizarse con sumo cuidado y con temperaturas relativamente bajas para evitar provocar una apariencia de brillo en los tejidos. Las vellosidades del tejido de la lana cuando están expuestas al frote constante provocan la formación de mota. En tejidos donde el porcentaje de lana es mayor, dichas motas se desprenden apenas se han formado, la limpieza se ha de realizar en seco, ya que los tejidos de lana, en presencia de humedad, calor y acción mecánica, encogen y pueden reducir a la mitad las dimensiones originales de la prenda.

### 1.2.2. Fibras de origen vegetal

Las fibras naturales vegetales de mayor aplicación en el sector textil son tres: algodón, lino y ramio.

- **Lino**

Se extrae del tallo de la planta del lino o liberiana (*Linum usitatissimum*). Esta fibra es conocida también con el nombre de "hilo". Ocupa el primer lugar entre las fibras de los tallos, delante del cáñamo o del yute. Su obtención exige varias etapas, lo que se hace sentir en su precio, es una de las fibras más antiguas que existen en la historia de la humanidad.

Aunque el lino es muy buen conductor del calor, su tacto es frío debido a que absorbe mucha humedad, de modo que los tejidos producen una sensación refrescante, ideal para prendas de verano.

El teñido se suele realizar con colorantes de gran calidad por lo que su solidez a la luz, a la intemperie y al lavado es muy buena.

Para evitar la alteración de las dimensiones y el colorido de la prenda es conveniente que la limpieza de prendas de esta fibra se realicen en lavado en seco.

La operación de planchado se debe hacer con gran precaución, ya que a elevada temperatura el lino se amarillenta y los tejidos se desgastan cuando se plancha repetidamente sobre los mismos pliegues.

El lino se utiliza para prendas de gran calidad tales como pañuelos, mantelerías, ropa de cama, telas para velas, y en menor medida, para ropa de vestir y cuando es para este rubro, se confeccionan prendas muy exclusivas.

- **Ramio**

Las fibras de ramio se extraen de los tallos de las plantas del mismo nombre. Sus propiedades son similares a las del algodón y el lino.

Los tejidos de ramio son frescos y tienen elevada resistencia a la putrefacción, al moho y a otros microorganismos.

El ramio al igual que otras fibras ya tejidas tienden a arrugarse y a encogerse por lo que es muy conveniente lavar las prendas de vestir en seco para evitar modificaciones de las dimensiones y degradar el tono de las prendas.

El ramio se utiliza para la fabricación de determinados artículos sometidos a extremas condiciones atmosféricas y a fuertes rozamientos, entre los artículos que podemos mencionar están las cintas, velas y toldos.

- **Algodón**

Su origen se ubica en Sudamérica, Asia y África en forma simultánea. Los primeros tejidos elaborados con algodón datan del primer milenio antes de Cristo. Los más antiguos son de América en la zona andina, existen tejidos de algodón hallados en Nazca y Paracas, de inmensurable valor histórico.

Existen diferencias botánicas debido a la adaptación en diferentes zonas de cultivo por el clima. Es la fibra de semilla más importante.

Es una forma pura de celulosa con alta cristalinidad. Está constituido por el suave pelillo celular que cubre las semillas de las plantas de algodón. Para su procesamiento se requiere menos etapas y es mucho más barato. Dura mucho y se tiñe con facilidad, absorbe con rapidez el agua pero se seca más rápido que otras fibras. Si está pre-encogido, es estable a los lavados y se puede planchar a temperaturas muy altas. Es la más elástica de las fibras vegetales, con la humedad su resistencia aumenta de un 10 a 120 por ciento más. Expuesta a aire seco a 144 °C se descompone gradualmente. Es resistente a los álcalis como los jabones y detergentes que se usan en diferentes procesos a los que se someten las fibras. Los ácidos fuertes destruyen el algodón. Es resistente a los solventes orgánicos y a los usados en los procesos quitamanchas. La principal desventaja es que se arruga con facilidad y es muy inflamable a la llama. Una prolongada exposición al sol, amarillenta y daña la fibra, sobre todo con la humedad, motivo por el cual es recomendado guardarlo en lugares secos y oscuros.

### **1.2.3. Fibras de origen mineral**

- **Amianto**

El nombre "**amianto**" indica un material el cual está confeccionado de fibras de uno de los dos siguientes minerales **serpentina** o **anfíbola**. Las fibras de amianto son fuertes y flexibles a la misma vez.

Este material es también térmico y eléctrico-aislante, resistente ante componentes químicos como el ácido o componentes blanqueadores, además contiene un alto estado de fricción. El nombre de amianto viene del griego asbestos, que quiere decir imperecedero o indestructible.

Este mineral tiene unas propiedades de las cuales se vale para trabajar de una manera más cómoda. Por eso es más barato en comparación con las fibras sintéticas.

Es mayormente usado como textil resistente a altas temperaturas, en especial para trajes de bomberos, en planchas refractarias, como capa inferior en enmoquetadores, en juntas y filtros de industrias químicas e industrias de alimentos. Además, este material actualmente es más empleado para fabricar frenos, material de fricción y aislantes.

### **1.3. Fibras químicas**

Por miles de años el uso de las fibras fue limitado por las inherentes cualidades de utilización de las fibras naturales, como el algodón y el lino entre otras.

El más antiguo registro de intento de crear una fibra artificial tomó lugar en 1664, cuando un naturalista inglés Robert Hooke sugirió la posibilidad de producir una fibra no tan buena ni mejor que la seda, pero que podía reproducirse en forma no natural.

La primera patente de una seda artificial se dio en Inglaterra en 1855 cuando un químico suizo llamado Audemars, disolvió químicamente la fibra de la corteza del árbol de la Mora, para modificarla y con ello producir la celulosa.

Audemars formó hilos por inmersión de la corteza en una solución, pero nunca encontró la forma de emulsionarla y extraerla, lo único que pudo realizar fue la celulosa líquida lo cual dejó un abismo en el proceso de obtención de una fibra artificial pura. Hasta 1880 Joseph W. Swan un químico inglés y también electricista quien trabajó con Thomas Edison, el inventor de la lámpara incandescente, quien realizó experimentos con la solución de celulosa líquida, la cual pudo extraer y la utilizó como un filamento de carbón para el invento de Edison. A Swan se le ocurrió que este filamento podría ser utilizado para la manufactura de textiles y hasta 1885 exhibió en Londres algunas telas a croché realizadas por su esposa con esta nueva fibra, pero le fue más interesante los usos eléctricos y abandonó esta aplicación.

En 1889 un químico francés Count Hilaire de Chardonnet fabricó la primera seda artificial causando gran sensación en París, dos años después desarrolló el rayón, y hoy es conocido como “El padre del rayón industrial”, esta fibra es la primera de las fibras manufacturadas por el hombre, y es en ese momento que se realizó una revolución en los textiles, creándose así las primeras fibras químicas.

Las fibras químicas se han podido clasificar como:

- Fibras artificiales
- Fibras sintéticas

Entre las fibras artificiales tenemos:

- Rayón viscosa
- Rayón cupro
- Rayón modal
- Rayón acetato

Entre las fibras sintéticas está:

- La poliamida o nylon
- El poliéster
- El acrílico
- El poliuretano
- La oleofina
- El spandex

### **1.3.1 Fibras artificiales**

La principal materia prima para la elaboración de fibras artificiales es la madera, la cual ha sido para el hombre uno de los principales recursos naturales. Gracias a la tecnología moderna, la madera sirve para muchísimos usos de los que pudieron soñarse hace muy pocos siglos. Cinco de las necesidades más importantes del hombre (albergue, combustible, ropas, alimento y transporte) pueden satisfacerse hasta cierto punto con la madera.

La madera como tal se usa extensamente en la industria química a causa de sus propiedades físicas y mecánicas; tiene un precio razonable, es fuerte, puede trabajarse sencillamente, es resistente a los ácidos débiles y es un buen aislante térmico y eléctrico.

Entre otras cualidades de la madera ésta tiene un coeficiente elevado peso/resistencia, como materia prima química, puede usarse para obtener muchos productos de gran valor. A diferencia de la mayor parte de las otras materias primas, es un recurso renovable.

El tratamiento químico de la madera puede dividirse en 2 tipos:

- Modificación química y mecánica de las propiedades de la madera sin la destrucción de su estructura; corresponden a este tipo los tratamientos ignífugos, con preservativos y la fabricación de dimensiones estables o comprimidas, como *impreg*, *compreg*, *staypac* y madera acetilada.
- Conversión de la madera en productos fibrosos, como papel, madera y láminas contrachapadas, en la fabricación de textiles como el rayón y productos celulósicos, como películas, plásticos y explosivos.

- **El rayón**

Los primeros hilados artificiales que logró fabricar el hombre recibieron el nombre genérico de "seda artificial". Tal denominación fue objetada por razones principalmente técnicas, la naturaleza química de aquellas fibras no tenían semejanza alguna con la seda natural y su afinidad tintórea las asemejaba más al algodón que a la seda. Tampoco mostraban una característica de la seda como la de aceptar carga con sustratos curtientes. Asimismo surgieron objeciones de origen comercial, en Italia se consideró que la denominación "seda artificial" implicaba un engaño. Pero sólo existían razones para el rechazo de la denominación, no así para su aceptación.

Las cualidades del artículo como su brillo, el título fino que permitía la comodidad de fibra natural, la similitud en el tacto, la caída y la resistencia al planchado terminaron por hacer prevalecer la denominación.

La lana y el algodón han sido conocidos y usados por el hombre desde hace milenios, pero es, en el maravilloso proceso del gusano de seda donde surge la idea de la producción de un hilo continuo. Este proceso que el hombre logra imitar después muchos intentos, consta de varias etapas.

- Transformar la materia prima en una sustancia viscosa extruible, lo que realiza el gusano con sus glándulas situadas en la parte inferior de su cuerpo.
- Extruir a través de una boquilla la sustancia viscosa, que coagulará en el medio en el que es extruída (aire o baño coagulante). Esto también lo realiza el gusano a través de dos orificios en su cabeza.
- Regular el título del hilado por la relación entre el volumen a extruir y la longitud del hilado a obtener.
- Dar orientación molecular al hilado mediante un "estiro" adecuado.

La primera pregunta sobre el proceso de fabricación es cómo transformar las hojas del moral (el arbusto del que se alimenta el gusano, distinto de la morera) en una sustancia que el hombre pudiera hilar. Del líber de dicha planta, nitrado y disuelto en alcohol o éter, obtuvo Audemars los primeros kilos en 1855, dando así el paso inicial en el uso de la celulosa como materia prima.

- Primera etapa

Se trata de transformar la materia prima en sustancia viscosa extruible. Los tres procedimientos que se describen a continuación dieron cada uno origen a tres tipos distintos de seda artificial.

- a. Proceso de nitración, desarrollado por Chardonnet (1894) y disolución de la nitrocelulosa.
- b. Proceso de disolución de la celulosa en óxido de cobre amoniacal, ideado por Despaissis y desarrollado por Pauly en 1897.
- c. Proceso "seda viscosa". El tratamiento de la celulosa se realiza en tres subetapas para lograr su disolución. La primera consistía en atacar la celulosa con soda cáustica, formando el "*álcali celulosa*". La segunda es la "*xantogenación*", atacando el álcali celulosa con sulfuro de carbono. La tercera disuelve aquel producto en soda cáustica diluída, dando una sustancia viscosa, extruible y coagulable.

- Segunda etapa

A semejanza del gusano de seda, se realiza la extrusión de la solución viscosa haciéndola pasar por un orificio o una hilera de múltiples orificios a cuya salida comienza la coagulación, que puede consistir en la evaporación del solvente (seda *chardonnet*) o en la regeneración de la celulosa (seda viscosa). En esta operación son decisivas la calidad del material de las boquillas y su perfección mecánica.

- Tercera etapa

El proceso natural que realiza el gusano regulando la extrusión del líquido viscoso en proporción a la longitud de hilo formado, requirió en la industria una precisión de alta mecánica en las bombas de engranajes dosificadores, con un mando común para todas las posiciones de hilatura y una coordinación mecánica que relaciona su velocidad con la guía enrolladora del hilo.

- Cuarta etapa

La resistencia del hilo depende en gran parte de la orientación molecular que se logre durante la coagulación, con un estiro del hilo en formación. El gusano de seda lo logra volviendo la cabeza periódicamente hacia atrás mientras mantiene la extrusión continua de la sustancia. Las máquinas de hilatura cuentan con dos guías rotantes del hilo que coagulan. Entre estas guías hay una diferencia de velocidad que es la causa del estiro mecánico.

El hilo ya está formado a esta altura del proceso, pero falta todavía realizar una serie de operaciones (maduración, desulfurado, blanqueo, secado y enconado) antes de disponerlo para su uso textil.

El desarrollo técnico de una idea simple como fue imitar el proceso natural no se detuvo en el éxito alcanzado al lograr el rayón viscosa. Las patentes de los procedimientos para solubilizar la celulosa y para regenerarla como hilo brillante por medio de un baño de sales amónicas fueron aplicadas por varias fábricas, que empezaban a multiplicarse en el mundo industrializado. Este éxito constituyó un punto de partida para ulteriores avances.

Así fueron fijándose distintas metas en cuanto a la obtención de características especiales del hilo, que fueron las siguientes:

- Obtener un hilado con torsión logrado directamente en la máquina de hilatura.
- Fibras con título y longitud variable para mezclar con otras fibras naturales (algodón, lana o lino) y obtener un hilado en el que las distintas fibras aporten sus características propias (brillo, suavidad, resistencia, etc.).
- Hilados con alta resistencia para las aplicaciones industriales (hilados de alta tenacidad).
- Fibras rizadas.
- Fibras con alta resistencia en húmedo (polinósicas).
- Hilados y fibras teñidos en masa con pigmentos colorantes o deslustrados con la incorporación de titanio.

Estos objetivos se buscaban en forma simultánea, como lo demuestra la profusa aparición de patentes, los desarrollos demandaron estudios y soluciones específicas. En algunos casos se necesitaron soluciones mecánicas, como el retorcido en húmedo del hilado. Otros requirieron el estudio profundo de las condiciones químicas de la coagulación y las condiciones mecánicas para lograr los hilados de alta tenacidad y la fibra polinósica, o la precisión de la inyección sobre el caudal de viscosa, de la dispersión de los pigmentos o del bióxido de titanio a incorporar al hilado.

### 1.3.2 Fibras sintéticas

Son aquellas que parten de una sustancia química (monómeros) como materia prima y mediante procesos de polimeración se obtiene filamentos de aplicación textil, en base a cualquiera de los dos siguientes procesos:

- **Por adición:** se realiza una poliadición (unión de monómeros) y no se desprende parte alguna de sus moléculas. Generalmente dichos monómeros son moléculas tipo vinílico (entre las fibras vinílicas está el *kurano*, *synthofil*, *vinylal* y *vinylon*) y tipo acrílico (entre las fibras acrílicas están el *darvan*, *crysel*, *acrilan*, *orlon*)
- **Por condensación:** Se realiza una policondensación en donde los monómeros ya sean ácidos, alcoholes o amidas reaccionan con otros eliminando los radicales generalmente agua, ácido clorhídrico o amoniaco. Entre éstas encontramos las fibras poliéstericas (como *avitron*, *diolen*, *trevira*, *dacrón*, *enkalon*, *tergal*, *terlenkan*) y las fibras poliamidas (como perlón o *nylon 6* y el *nylon 6.6*).

- **Nylon o poliamida**

Esta fibra fue descubierta por Wallace H. Carothers, especialista en química orgánica de la Universidad de Harvard la cual abandonó para emprender el trabajo de investigación en la compañía química americana Du Pont.

En 1927 Carothers emprendió sus estudios hacia los polímeros, cuando la compañía Du Pont decidió establecer un laboratorio con un grupo de destacados científicos para la investigación y desarrollo de fibras.

La teoría partió de hacer reaccionar un alcohol etílico y ácido acético para formar acetato de etilo (éster), asumiendo que del mismo modo debería reaccionar un dialcohol (glicol) con un diácido para formar otro éster, pero este reaccionaría formando una molécula de doble longitud y así sucesivamente construyendo moléculas que tuvieran grupos funcionales en cada extremo, a partir de este principio logró Carothers conseguir moléculas muy largas, cuando éstas se obtuvieron a partir de glicoles y ácidos se denominaron poliésteres, los cuales fueron la primera pista hacia la fabricación de fibras para uso textil.

Uno de los químicos ayudantes de Carothers introdujo una varilla de vidrio a uno de los destiladores de poliéster y cuando la saco, la solución se adhería a ella estirándose y formando un filamento sólido, con esto quedaba demostrado el razonamiento de Carothers de reaccionar moléculas por ambos extremos para obtener cadenas largas de ellas, las moléculas largas en relación con sus demás dimensiones presentan propiedades capaces de formar fibras.

A pesar de este notable éxito quedaba mucho que observar, pues las fibras a partir de poliesteres no eran satisfactorias ya que carecían de resistencia, basándose en esto Carothers notó que al sustituir poliesteres por poliamidas se obtenían fibras más fuertes, así dos moléculas de este producto por condensación reaccionarían consigo mismas para ir formando un largo polímero obteniéndose así el *nylon*.

En 1939 Du Pont fabrica *nylon 6.6* el cual se presentó al público en medias para dama con un éxito instantáneo, que hicieron que llegara a adquirir el nombre de la fibra milagrosa ya que era más fuerte y resistente a la abrasión que cualquier otra fibra.

En 1939 el Dr. Paúl Schlak en Berlín logró polimerizar el ácido aminocaproico, produciendo una masa perfecta extruible por hileras para tener filamentos continuos útiles en la industria textil, este monómero de 6 átomos de carbono recibe el nombre de *perlón* en Alemania, pero es el *nylon 6*.

Toyo en Japón procesa *nylon* con el nombre de *amilan*. Los países bajos con el nombre de *bifil* y Alemania con el nombre de *perlón*, con un nombre comercial de *rilsam* en Italia, Brasil y Francia. En México el *nylon* es *nyfil*, en Argentina es *perfilo* y en Venezuela *sudalón*.

El *nylon* se tiñe con colorantes de dispersión lo cual requiere un medio ácido en el proceso de teñido, lo cual le da una excelente solidez a la luz, a la intemperie y al ozono. Entre otras de sus cualidades tenemos que es mal conductor de la electricidad, se amarillenta a 150 °C, no se pudre y resiste al moho.

Por su alta resistencia se ha hecho insustituible en paracaídas, cuerdas o cintas adecuadas para cables de arrastre de los planeadores, es ideal para hilos de costura, por su elasticidad y resistencia permite fabricar medias muy finas, también es usado para fabricar chamarras, fajas para neumáticos; por su resistencia al moho y polillas se usa en pantallas mosquiteras.

- **Poliéster**

El descubrimiento del poliéster tiene su origen en los trabajos del Dr. W. H. Carothers, iniciados en 1920 con la mira de construir moléculas gigantes.

Antes de experimentar con poliamidas, comenzaron con poliéster, con los que obtuvieron elevados pesos moleculares; pero con poca estabilidad. Debido a las desventajas que presentaba, la compañía Du Pont, discontinuó el trabajo sobre el poliéster a favor del *nylon*.

En 1939, los ingleses J. R. Whinfield y J. T. Dickson de la compañía Calico Printers Association tomando como base la experiencias y proyectos de Carothers, empieza a estudiar las macromoléculas del tipo poliamidas, así como los efectos de la de la simetría molecular de los polímeros condensados. Y en 1940 descubren la primera fibra utilizable el *terylene*, que fue producto de la reacción del etilenglicol y el ácido tereftálico; misma que patentaron, controlando los derechos de producción en todo el mundo.

En 1944 la compañía ICI de Inglaterra, obtuvo la patente para producir el terylene solo que en esta ocasión el proceso se demoró debido a la segunda Guerra Mundial, continuando en 1947 para producir en una planta piloto al año siguiente.

En 1946 la compañía Du Pont adquirió el derecho exclusivo de fabricar polyester en Estados Unidos de América, a esta fibra se le dio el nombre de dacrón (debe pronunciarse “deicron”) y se produjo por primera vez en forma comercial en 1953.

La comisión federal del comercio de Estados Unidos especificó que el término polyester debería usarse para fabricar el tipo de tereftalato de poliestireno. La definición que hizo de la fibra de polyester fue la siguiente:

Polyester es una fibra manufacturada en la cual la sustancia que la constituye es cualquier cadena larga de polímero sintético compuesto por lo menos del 85 por ciento de su peso de éster de un alcohol híbrido y ácido tereftálico.

Existen dos tipos de fibras de polyester:

- **Polyester normal:** clasificada con el número 54, la cual no presenta radicales iónicos libres. Estas son producidas por la reacción del ácido tereftálico y el dietilenglicol, productos y funcionales, es decir, que tiene grupos iguales a ambos lados de su cadena molecular, que ayuda a la reacción para formar polímeros lineales de cadena larga. (La fibra es 100 por ciento polyester, obtenida por la polimerización del tereftalato de poliestireno).
- **Poliéster modificado:** clasificado con números diferentes al polyester normal, como por ejemplo, polyester 64, el cual si presenta radicales aniónicos libres, por lo que pueden teñirse con colorantes catiónicos. Al igual que el polyester normal, se produce a partir del ácido tereftálico y dietilenglicol; pero el ácido tereftálico de polietileno formado se-co-polimeriza con derivados del ácido 5- sulfoisoftálico (5 sulfoisoftálico de sodio). La fibra es por lo menos 85 por ciento poliéster y el 15 por ciento restante del co-polímero adicionado. Al ser modificado este tipo de polyester se altera la estructura cristalina de la fibra (respecto del polyester normal), incrementado las zanasamorfias, lo cual produce los siguientes cambios físicos y químicos en la fibra:

- Reducción de la resistencia.
- Reducción del punto de transición vítrea.
- Incremento de encogimiento.
- Incremento de la difusión de los colorantes.
- Sensibilidad a la hidrólisis y presencia de ácidos, de álcalis o *carriers*.
- Sensibilidad a la temperatura.

Los filamentos de poliéster tienen una gran aplicación en tejidos para ropa de mujer, gabardina, tejidos con pliegues permanentes, corbatas, ropa en general, mantas, cortinas y artículos de malla y punto. Para usos industriales: filtros para aire caliente, revestimientos para rodillos de lavadoras, ropa de tintorería, cintos, bandas, mangueras contra incendios, neumáticos, velas, cables y redes de pescar.

Las fibras para hilados se mezclan puras y con otras fibras sirven para elaborar tejidos de ropas masculinas o femeninas y ropas deportivas. Además, se utilizan como rellenos de colchas y de almohadas.

- **Acrílico**

La fibra acrílica está basada en el poliacrilonitrilo, siendo éste uno de los triunfos más notables desde la aparición de la primera fibra sintética (*nylon*).

En 1893, el químico alemán Moreas fue el primero en obtener monómeros de acrílico (acrilonitrilo). Desde esa época hasta los fines de los años 30, los estudios sobre estas fibras permanecieron prácticamente estáticos. En 1931 se realizaron los primeros intentos para transformar el acrilonitrilo en fibras, sin lograrlo, debido a las siguientes dificultades técnicas:

- No era posible hilar por extrusión a partir del polímero fundido, puesto que el punto de fusión del acrilonitrilo está inmediatamente debajo de su composición.
- No era posible hilar a partir de solución del polímero, pues no se conocía ningún disolvente apropiado.

Fue hasta 1942 cuando H. Ríen comprobó que el poliacrilonitrilo se disolvía en dimetilformamida y que a partir de esa solución se podía hilar fibras. Basándose en esto, se inicio la producción experimental de estas fibras, en forma simultánea en 1943, en las compañías I. G. Farbenindustrie, en Alemania y Du Pont en Estados Unidos, la última planta produjo una fibra de poliacrilonitrilo, misma que ofreció al gobierno de su país para aplicaciones militares.

En 1945, Du Pont, produjo la primera fibra a un nivel más alto que el experimental, esta fibra era tan fuerte como el *nylon*, sólo que con una resistencia más alta a los agentes químicos y a la luz solar, estas características presentaron dificultad para que las moléculas de colorante penetraran dentro de las fibras, por lo que no pudo teñirse.

Du Pont continuó realizando pruebas sin lograr mejores resultados y fue hasta en 1950 cuando en Camden South Carolina se produjo la primera fibra acrílica que se lanzó al mercado con el nombre de Orlon 41. Sin embargo, esta fibra aún presentaba problemas de teñido pues su punto de transición vítrea estaba por encima de los 100 grados celsius. Y no poseía radicales libres o iónicos a los cuales pudiera unirse el colorante, por esta razón tuvo que ser modificada.

Tal modificación consistió en la introducción de monómeros no iónicos, para bajar el punto de transición vítrea y otros monómeros iónicos para dotar a la fibra de terminales a los cuales se pudiera unir el colorante. La fibra ya modificada la produjo Du Pont a partir de 1952, con el nombre de Orlon 42. Desde entonces a la fecha, se han desarrollado otras que han aumentado la demanda de las fibras acrílicas, para diferentes usos, ya sea solas o en mezclas con otras de origen natural o sintético.

Existen varios tipos de fibras acrílicas las cuales son:

- **Fibra acrílica o verdadera:** es aquella hecha por el hombre, la cual está formada por un polímero sintético de cadena larga, compuesta por lo menos de un 85 por ciento en peso de unidades de acrilonitrilo.
- **Fibra modificada o modacrílica:** también es elaborada por el hombre solo que el polímero sintético, está formado de menos del 85 por ciento y mayor del 35 por ciento de acrilonitrilo. Teniendo mayor calidad que otros polímeros para formar el co-polímero, los cuales son: cloruro de vinilo ( $\text{CH}_2\text{CHCl}$ ), cloruro de vinilideno ( $\text{CH}_2\text{CCl}_2$ ) o dicianuro de vinilideno ( $\text{CH}_2\text{CCN}_2$ ). La fibra modacrílica, es similar en sus propiedades a las acrílicas; la diferencia principal que presentan es el efecto retardante del fuego. Estas fibras son usadas principalmente en ropa de dormir para niños, cortinas de fabricación especial, imitación de piel y pelucas.

Las fibras acrílicas son utilizadas para la fabricación de alfombras (por su buena resistencia), para cortinas, tapicería de autos, medias, calcetines, hilos para tejer (estambres), imitación de piel, artículos para la moda como guantes y pantalones (por su abrigo y escasa higroscopicidad).

Combinada con lana se obtiene prendas vistosas y livianas, como los abrigos. Los hilos voluminizados han encontrado un campo extenso en lo que se refiere a las prendas de vestir, ropa y prendas para bebés.

- ***Spandex***

Una fibra elastomérica puede ser hecha de cualquier material, ya sea polímero natural o sintético, que tenga alta elasticidad y buenas propiedades de recuperación. En el presente, únicamente el hule natural y los polímeros de uretano, son materias primas para comercializar con éxito las fibras elastómeras. Anteriormente se hicieron intentos para introducir comercialmente fibras basadas en elastómeros poliamídicos, poliésteres y poliacrilonitrilos, pero estos intentos no fueron exitosos debido a problemas económicos y diferencias mecánicas en fibras experimentales. Durante los tiempos de escasez del hule natural durante la segunda guerra mundial, el neopreno (policloropreno) había sido utilizado como materia prima para fibras elastómeras, pero por el alto costo y las características de calidad poco deseable, no se uso para abastecer bajo condiciones normales.

Las fibras elastómeras basadas en polímeros uretanos y sus técnicas para la producción experimental fueron reportadas primero en 1950, por Farbenfabriken Bayer, un pionero en la química del uretano y del ditiocianato. No fue hasta después de los años 50 que las fibras elastómeras de poliuretano serían las primeras en introducirse al mercado en una escala semicomercial, a estas fibras se les dio una designación química de Spandex. El término *Spandex* se ha incorporado dentro del lenguaje común del mercado por todo el mundo para referirse a las fibras basadas en polímeros elastómeros de uretano.

En 1977, había sólo tres productores de *spandex*: *Glospan Cleerspan* de *Globe Manufacturing*, *Lycra* de Du Pont y *Numa de Ameliotex*.

Las fibras *spandex* se forman haciendo reaccionar moléculas previamente moldeadas de poliéster o poliéster con di-isocianato y después, polimerizándolas para formar cadenas largas. Los filamentos se obtienen por diferentes procesos.

Lo mismo que todas las fibras artificiales, la solución de hilatura deben contener agentes deslustrantes, receptores de tintes, blanqueadores y lubricantes.

El *spandex* es una fibra elastomérica artificial donde la sustancia que la forma es un polímero de cadena larga formada por un mínimo de 85 por ciento de poliuretano segmento.

El *spandex* está constituido por segmentos rígidos (que forman fuertes enlaces de valencia secundaria y son altamente cristalinos) y flexibles (largos móviles y amorfos). En la cadena del polímero los segmentos flexibles proporcionan la elasticidad y los segmentos rígidos mantienen unidad a la cadena. Cuando se aplica una fuerza, los segmentos doblados o rizados se enderezan; cuando la fuerza se retira vuelve a sus posiciones originales. Las diversas proporciones de segmentos duros y suaves se utilizan para controlar la cantidad de alargamiento.

Las fibras de elastano son cada vez más utilizadas en la fabricación de textiles elásticos. A ello contribuye su buen comportamiento y también la moda actual, por ejemplo en trajes de baño, corsetería, prendas deportivas y artículos ortopédicos.

#### 1.4. Proceso de manufactura del denim.

- Historia del origen de los Blue Jeans

En California, 1850, la fiebre del oro se encontró en la plena agitación y muchos hombres partieron en caravanas en dirección a la cuesta oeste americana en busca de la gloria y sobretodo, la fortuna.

Entre muchos hombres se encontraba un joven de 23 años de origen alemán llamado Levi Strauss quien se unió al grupo en búsqueda de riqueza, aunque no exactamente detrás de la ilusión del oro, como tantos otros iniciaron su aventura en El Dorado, California.

Cuando el joven descubrió el panorama de la afamada bahía de San Francisco, cuatro años después de los pioneros, más de 100 mil personas los habían precedido, colonizando el lugar, con la esperanza de hacer fortuna clavada en el corazón. Levi Strauss interceptó rápidamente las posibilidades que se abrían en las comunidades que empezaban a surgir junto a las minas californianas, y cargado grandes rollos de lana para cabellones y cobertizos de carretón Levi Strauss llegó a California a hacer comercio. En poco tiempo con su astucia y su percepción para las oportunidades hubo descubierto una verdadera mina de oro en potencia, y fue bien sucedido en la proeza de inventar un nuevo producto único que más de un siglo después de su aparición, aún esta en auge.

Ese producto es el *blue jeans*. El origen del nombre parece provenir de la ciudad italiana de Génova, el primer *jeans*, La celebre creación de Levi Strauss fue diseñado con el molde del pantalón que usaban los marineros de Génova (nacionalidad de la mayoría de los marineros que constituían la tripulación de los barcos que llevaban los tejidos de Europa).

Su tejido era de los más groseros y rústicos, pues su primera idea fue la de vender a los mineros de oro, que necesitaban un traje firme y durable utilizando la tela oscura que originalmente servía para hacer pabellones.

La noticia no tardó en difundirse en toda la región y Levi Strauss, para no perder aquella oportunidad, empezó a producir decenas de pantalones, que rápidamente desaparecían de sus manos por su gran éxito.

Debido a la gran búsqueda del pantalón surgió la necesidad de encontrar materia prima. Así en 1860, Levi se acordó de un soberbio tejido de algodón puro y de calidad perfecta, que servía para hacer los trajes de los esclavos de los plantíos. La tela utilizada en los pantalones era oriunda de Nines, en Francia denominada "*Sarga de Nines*" (conocida hoy día como denim), era exportada en grandes cantidades para las América en su versión teñida de índigo de modo que Levi no fue responsable por la opción del color, es una tela algodón con la urdimbre teñida con índigo y trama cruda.

En 1890 la Levi's 501 terminaba de nacer. Este nombre proviene del número de referencias que constaba en los números de lote de tejido importado.

El blue jeans poco a poco pasó a ser parte de la vida cotidiana de los mineros. Mientras tanto en el oeste el blue jeans tomaban auge entre los *cowboys*, quienes se dedicaban a la crianza de ganado, otro trabajo rudo que necesitaba prendas resistentes como el de las minas y los *cowboys* fueron incorporando esta prenda de vestir en su vida cotidiana.

En 1873, el blue jeans recibió los atributos que le faltaban. Un cierto Jacob Davis trabajaba como fabricante de pantalones en Nevada, pero en verdad ganaba la vida principalmente confeccionando cobertizos, pabellones y mantos para caballos. Inesperadamente vino un minero panzudo y rabioso quejándose que sus bolsillos se rompían por el peso de las herramientas, le vino entonces la inspiración de reforzar los puntos de los bolsillos con los mismos roblones de cobre que se utilizaban para fijar las correas de los caballos a los mantos, temiendo que le robase una idea tan promisoriosa y no teniendo medios de registrar patente, Jacob ha mandado una carta a Levi proponiendo una sociedad, y juntos patentaron en nuevo dibujo con la utilización de roblones. Como punto final de la historia, vale la pena comentar que después de Levis entraron en escenas las marcas Lee y Wrangler.

Actualmente el término denim abarca trajes populares y coloridos utilizados en el entretenimiento y en el día a día. Los tejidos encontrados en el comercio denominados “denim” se constituyen de hilo urdimbre teñido y trama de algodón crudo.

El denim es compuesto principalmente por dos materias primas: el algodón y el índigo.

- **Colorante índigo**

La indigofera es una planta originaria de la India y de ella es obtenido el índigo, es un árbol de altura variable, según el lugar de cultivo y los cuidados que recibe y se extrae de las hojas del mismo.

El índigo llamado “el rey de las tintas” era utilizado por la gente de la edad de piedra para pintar sus cuevas, pero probablemente, la primera vez que fue utilizado como colorante fue 3000 años antes de Cristo ya que se ha encontrado en el lino usado para cubrir a las momias egipcias embalsamadas. En 1615 hay registros de envío de índigo desde la compañías de la India a Europa. Su época de apogeo fue en la mitad del siglo XIX, se pasaron varios años hasta principios del siglo XX para que se empezase la producción del índigo artificial.

Su ilimitada riqueza de color no pudo ser imitada y el aspecto natural que ofrece al tejido y las piezas son apreciadas por su propiedad única de “color vivo”, que va cayendo gradual y naturalmente durante la vida de la pieza.

El índigo es un colorante de la familia de los indigoides por lo que es un colorante de molécula grande, es un compuesto puro (2,2-biseudoindoxilo) que se forma como cristales de color azul intenso con brillo metálico de color rojo cobre, (por recristalización en anilina o por sublimación). Se funde a 390-392 °C con descomposición y se sublima en forma de vapor de color rojo violeta.

Por ser un colorante de molécula grande al ser oxidado en la fibra, éste se une superficialmente lo cual permite ser removido con facilidad y al pasar el tiempo conforme se usan las prendas teñidas con índigo, éstas van perdiendo gradualmente este colorante y adquieren esa gustosa apariencia a desgaste.

- **Hilatura**

Este es el proceso por medio del cual se transforma la fibra en hilo. Es la agrupación de un conjunto de fibras heterogéneas y sueltas, colocadas paralelamente y ligadas por torsión para obtener una hebra o hilo.

El primer paso es la apertura, en dicho paso las fibras de algodón en pacas o fardos prensados son abiertos y mezclados tratando de uniformizar la variación de tonalidad propia del algodón. Posterior a esto pasa por el proceso de limpieza en donde son eliminadas partículas extrañas como cascarillas, tierra y pequeñas basurillas que trae el algodón por su proceso de recolección.

Después de limpiadas las fibras pasan al cardado, en este proceso se ponen en forma paralela las fibras separando las de menor tamaño de las más largas, y luego son transportadas a las cardas por medio de tolvas mecánicas que son inyectadas con aire a presión para formar una hebra continua llamada carda.

Estas cardas son fibras limpiadas, orientadas, simétricas y continuas las cuales son transportadas y enviadas a un proceso de estiramiento y paralelización, dando mayor orientación a las cardas para posteriormente pasar al proceso de torsión y producir el hilo. Existen dos procesos de hilado el convencional y de *open end*.

La hilatura de convencional es mayormente conocida como hilatura *ring*, en este proceso las fibras de algodón son torcidos y cohesas en una dirección uniforme, esta torsión implica que el acondicionamiento de las fibras sea más paralela, disminuye la pilosidad y aumenta la resistencia del hilo.

En la hilatura de *open end* las fibras sufren una torsión falsa a través del soplo de las fibras de algodón en dirección distinta o desordenada, este proceso tiende a crear hilos voluminosos de superficie pilosa y ásperos, debido a que no dan una torsión uniforme a las fibras, los hilos de este proceso poseen una resistencia menor que la del hilado convencional, la ventaja que presenta el hilado *open end* es que es más eficiente y por ende abarata el proceso de hilatura.

- **Teñido de índigo**

Como paso previo al teñido se realiza el proceso de urdido, que es la reunión de varios hilos para la formación de una cuerda la cual es el producto de unir sin enredar entre 330 a 360 hilos para formar uno solo.

Un grupo entre 24 a 36 cuerdas son sometidas simultáneamente al proceso de teñido. Estas cuerdas para ser teñidas pasan a un proceso múltiple de inmersión en tinas de colorante índigo y de aireación. Al salir de cada tina la aireación permite la reacción de oxidación de colorante en los hilos de algodón.

Al salir de la última tina las cuerdas pasan por rodillos para eliminar los excesos de colorante y luego al secado.

Las cuerdas ya secas son abiertas, y los hilos teñidos son paralelizados y engomados. El engomado es la impregnación de almidón, ceras y otros

aditivos para hacer de estos hilos más resistentes y manejables en el proceso de tejeduría.

- **Tejeduría**

Es el proceso que consiste en entrelazar los hilos de urdimbre y trama para formar un tejido o tela.

Los hilos de urdimbre en el proceso de fabricación del denim son los hilos teñidos con índigo y se encuentran a lo largo del tejido.

Los hilos de trama en el proceso de fabricación del denim son los hilos crudos o blanqueados que se encuentran a lo ancho del tejido.

En el proceso de tejeduría se dan los diferentes ligamentos, es decir, la forma en la cual se están entrelazando los hilos de la urdimbre y de la trama para darle la forma al tejido.

La sarga produce una unión diagonal que sobresale en la superficie del tejido, cuando está va direccionada hacia la derecha se denomina *right hand twill (RHT)*, cuando está va direccionada hacia la izquierda se denomina *left hand twill(LHT)* y cuando está direccionada para ambos lados se denomina *Broken twill*.

Dentro de las sargas existen innumerables opciones, la más usual para denim es la 3/1, lo que significa que un hilo de la trama se entrelaza una vez por arriba y 3 veces por debajo de los hilos de la urdimbre.

También existen la sarga 2/1 y la 1/1, esta última es denominada canvas la cual es la más simple forma de ligamento.

- Acabado

En este proceso se busca obtener un tacto rígido en la tela añadiendo productos químicos que faciliten y mejoren el manejo en la confección, se hace pasar por rodillos que eliminan la pelusa y fibras sueltas que dan mala apariencia.

En este proceso se da la estabilidad dimensional necesaria a través de procesos mecánicos. Dicho proceso es de suma importancia ya que es aquí donde se fijan los parámetros de encogimientos y/o estiramientos que pueda presentar la tela después de ser lavada.

También en este proceso es donde se fija el ancho y se regulariza el *skew* o torsión de la tela.

### **1.5. El análisis colorimétrico**

El color nos rodea y nos condiciona pero, ¿qué es realmente el color? No existe una respuesta sencilla porque el color no es una realidad física. Se encuentra en el cerebro y no en la materia. El color es, una interpretación realizada por los cortes perceptuales procedentes del ojo. Aunque se desconocen algunos detalles de esta interpretación, es muy posible que sea diferente de un individuo a otro.

En otras palabras, el cerebro elabora una descripción simbólica de la escena observada, utilizando la información contenida en las señales visuales. No hay imágenes internas sino asociaciones de símbolos, de hecho, ese proceso está íntimamente ligado a la educación del cerebro en la primera infancia.

Lo único que se ve es materia sin color, la materia sólo tiene la propiedad de reflejar más o menos determinadas radiaciones electromagnéticas a las cuales el ojo humano es sensible. El espectro de las radiaciones electromagnéticas es muy ancho. Una zona estrecha del espectro total de radiaciones es perceptible por el ser humano, eso es la luz. Al ser el flujo luminoso lo que activa el ojo, constituye el primer elemento de la visión, siendo el ojo el segundo. Un tercer elemento que modifica la distribución espectral de energía procedente de la fuente luminosa puede intervenir también el objeto. Por consiguiente existe un trinomio formado por la fuente luminosa, el objeto y el observador.

- El espectro visible

De acuerdo a la experiencia de Isaac Newton en 1666, que permitió descomponer la luz en un espectro de distintas luces coloreadas. Newton realizó esta experiencia iluminando una prisma de vidrio y observando que la luz descomponía una banda multicolor idéntica a la distribución coloreada del arco iris, esta descomposición de la luz en radiaciones coloreadas, pone de manifiesto que la luz blanca es el resultado de la asociación de un gran número de radiaciones coloreadas.

Numerosos científicos y en particular Louis de Broglie en 1924 han demostrado que las radiaciones son ondas electromagnéticas, al igual que los rayos X utilizados en la radiografía y las ondas radioeléctricas, por consiguiente, pueden ser definidas por su frecuencia o longitud de onda.

El espectro de las radiaciones visibles ocupa una parte muy pequeña del espectro total de las vibraciones electromagnéticas. Se considera generalmente que el espectro visible contiene radiaciones electromagnéticas de longitudes de onda de entre 380 y 780 nm.

La luz amarilla y anaranjada se considera a los 600 nm. Lo cual corresponde a una frecuencia de 5,1014 Hz. Así las nociones de color y de tono están directamente relacionadas con la longitud de onda, pero nadie percibe el color rojo como algo que representa el doble del color azul en términos de longitud de onda y la mitad en términos de frecuencia.

- **La luz**

La fuente luminosa constituye el primer elemento de trinomio. La luz puede obtenerse de distintos modos. En la colorimetría, se genera luz, calentando una materia hasta la incandescencia (por ejemplo, el filamento de una lámpara) o excitando átomos o moléculas por medio de un arco eléctrico o una descarga eléctrica en un gas (lámpara de arco en un gas).

Una fuente perfectamente difusora denominada cuerpo negro o radiador planckiano puede servir de referencia o de patrón para identificar el color de las fuentes luminosas. La temperatura equivalente a la del cuerpo negro expresada en grados Kelvin, cuyo aspecto visual es lo más próximo al de la fuente real de luz.

La principal fuente luminosa natural es el sol, es bajo esta luz, que observamos los colores de forma natural. La luz de día está formada por la luz solar directa y luz difusa propagada por la atmósfera.

Debe señalarse que la luz solar está influida por la latitud, la estación del año, las condiciones meteorológicas, la contaminación atmosférica, la hora. El espectro solar, que extiende desde 200 a 4000 nm. puede ser asimilable a la radiación de un cuerpo negro llevado a 5800 K.

En función de numerosos factores horarios o climáticos, la distribución espectral de la iluminación puede variar entre temperaturas de color de 4000 K. A 6000 K. Razón por la cual la fuente llamada luz de día ha debido normalizarse para las mediciones colorimétricas a fin de ser reproducible y constante.

- **Los iluminantes**

En colorimetría instrumental, sabiendo que el color observado depende de condiciones precisas y reproducibles, se procedió a definir condiciones normalizadas de emisión energética de luz en función de la longitud de onda. Los iluminantes han sido establecidos a partir de las características de distribución espectral de energía luminosa próximas a las fuentes de luces naturales. Los principales iluminantes normalizados por la Comisión Internacional de las Iluminación (CIE) (\*) son A (luz incandescente) y D65 (luz de día)

- **El objeto**

- **Atributos cromáticos de la materia**

El color está asociado a las ondas electromagnéticas y más concretamente a su distribución espectral en el espectro visible.

Las longitudes de onda de las radiaciones situadas entre el violeta y el rojo del espectro visible se extienden desde el 400 a 700 nm aproximadamente. La absorción selectiva de las radiaciones de determinadas longitudes de onda delimitan el color de los objetos. Las radiaciones que se absorben son entonces reflejadas o transmitidas por los objetos, siendo por tanto visibles por parte de los observadores.

Por ejemplo, los objetos amarillos presentan la característica de absorber la luz azul. Así mismo, los objetos rojos absorben la luz azul verde y amarillo.

En términos de física, el color de un objeto se mide y se representa por su curva espectrofotométrica, siendo ésta el trazado representativo de la parte reflejada o transmitida de la longitud de onda, en lo que se refiere al espectro visible de 400 a 700 nm.

- **El observador**
  - **La visión de los colores**

La percepción visual es el resultado de la interpretación efectuada por el cerebro, de la luz percibida por los ojos, modificada y transmitida por los objetos o emitida directamente por las fuentes luminosas.

Se ha observado que el ojo no tiene la misma sensibilidad a la luminosidad de la luz para todas las longitudes de onda en el espectro visible. Así mismo, la luz en su variación claro-oscuro (claridad) es percibida por el ojo y junto a las variaciones cromáticas (tono y saturación) y organiza los colores en un sistema tridimensional.

Se sabe desde hace largo tiempo de la dimensionalidad en la presencia de tres tipos receptores. Los progresos más importantes del conocimiento de nuestro sistema de visión han sido posibles desde que se han podido realizar mediciones directas de los receptores del ojo. Pero la comprensión de nuestro sistema de percepción del color, arranca en 1666 con los trabajos de Newton sobre la descomposición de la luz blanca por el prisma de vidrio.

En 1801, Thomas Young sugiere la teoría de la trivarianza visual, en la cual nuestro sistema de percepción visual de los colores se basa en tres tipos de receptores. Unos 50 años más tarde, esta teoría según la cual nuestro ojo contiene tres series de recepciones (rojo, verde, azul), fue retomada por Hermann Von Helmholtz.

En 1878, Ewald Hering propuso la hipótesis de que nuestro sistema de percepción visual está formado por seis colores independientes: rojo, verde, amarillo, azul, blanco y negro.

Más tarde, otras experiencias realizadas a partir de tres proyectores de luz coloreada (rojo- verde- azul) demostraron que mediante las variaciones de la intensidad luminosa de estos tres proyectores podía generarse una multitud de colores, permitiendo la evaluación de las respuestas tricromáticas del ojo (experiencias de síntesis aditiva, de W.D. Wright en 1928 y de J.D. Guild en 1931).

Hasta principios del siglo XX, muchas experiencias fueron realizadas por distintos investigadores, con el fin de conocer mejor el sistema de percepción del color. Las teorías de Young–Helmholtz y de Hering fueron negadas y contestadas hasta 1930, año en que E. Muller confirma la teoría de los 3 pares antagonistas u opuestos.

En efecto, Muller confirmó que la teoría de Young–Helmholtz que define la presencia de tres tipos de receptores en la retina era correcta, pero que las respuestas de estas tres series de receptores eran convertidas entre el ojo y el nervio óptico, en otras tres series de señales llamadas pares antagonistas u opuestos, como se define en la teoría de Hering, estos tres pares eran del tipo blanco-negro, rojo-verde y amarillo-azul.

La validez científica de la teoría de los pares opuestos ha sido corroborada por las experiencias como la de Russel De Valois del laboratorio de visión de primates de la universidad de Barkley en California. En 1966 gracias a los micro electrodos conectados a las fibras del nervio óptico de un simio, este científico De Valois, pudo demostrar la existencia neurofisiológica de tres tipos de señales: blanco-negro, rojo-verde y amarillo- azul.

La retina del ojo contiene los órganos receptores de la visión, los conos y los bastones. Los conos son responsables de la visión fototópica diurna o de día y son esencialmente sensibles a la percepción de los colores, mientras que los bastones son responsables de la visión escotópica nocturna o de noche y son esencialmente sensibles a la variaciones de la claridad. La distribución es de aproximadamente 7 millones de conos 120 millones de bastones, todos tienen la misma sensibilidad, pero los bastones están agrupados con una mayor sensibilidad a la visión lateral donde están situados en su mayor parte. Hay tres clases de conos: azules, verdes y rojos cuyas máximas sensibilidades se sitúan, respectivamente a 477, 540 y 577 nm. Su distribución media es de 40 verdes por 20 rojo y/o anaranjados y un azul. Los conos se encuentran en la retina y más concretamente en la fovea.

La visión coloreada en el espectro visible depende de la luminocidad, un efecto en fuerte aumento de las iluminaciones o de la fuente de luz, hace que los rojos y los azules-verdosos viren el lado azul del par antagonista, así pasa a un sistema de visión dicromática basado prácticamente en los colores amarillo y azul.

En la colorimetría visual e instrumental, debe asegurarse que las condiciones de iluminación sean normales de aproximadamente 1500 Lux es decir, equivalentes a las de la visión fototópica.

- **La colorimetría el sistema cie 1931**

La base científica de la medición del color se fundamenta en la existencia de tres distintos grupos de señales procedentes del ojo de un observador humano. Las respuestas espectrales de esos tres tipos de receptores del ojo, en función de la longitud de onda, son bien conocidas en la actualidad. A fin de poder identificar la respuesta de los estímulos de color mediante valores numéricos, los valores de las funciones colorimétricas del ojo han sido normalizados e incorporados a la definición “del observador patrón de la CIE”.

El observador patrón, con iluminante patrón, es en realidad una tabla de valores numéricos, representativos de un observador humano, medio, normal, pero las respuestas no son específicas de un observador en concreto.

- **Eficacia luminosa relativa del ojo**

Las respuestas de los tres pares de señales del ojo humano han sido establecidas a un nivel de luminosidad definido. Se sabe así mismo que la función de eficacia luminosa del ojo varía en función de la longitud de onda. Fue en 1923 que tras las experiencias realizadas sobre varios observadores, fueron fijados los valores de eficacia luminosa relativa del ojo en visión fototópica (diurna); estos valores fueron adoptados por la CIE en 1924 a fin de permitir los cálculos colorimétricos, es decir, los valores de eficacia luminosa relativa.

- **El observador patron cie 1931-2\***

A partir de las funciones tricromáticas  $r$ ,  $g$ ,  $b$  reales y definidas, se desarrollaron transformaciones matemáticas, seleccionando tres nuevas primarias patrón  $x$ ,  $y$ ,  $z$  que permitieron la identificación de un estímulo de color basada en tres números. En realidad, cualquier transformación habría podido ser válida, pero el objeto era obtener por medio de esta operación las máximas ventajas, especialmente para la simplificación de los cálculos.

Partiendo de esta base, una transformación matemática fue establecida con las siguientes características:

- Eliminación, en las ecuaciones de los valores negativos difícilmente tratables en aquella época por la electrónica.
- Elección de un nuevo sistema de tres variables primarias “imaginarias” ( $x$ - $y$ - $z$ ), de modo que el *spectrum locus* (lugar del espectro) fuese inscrito dentro del triángulo definido por estas tres variables.
- Fue elegida y calculada para ser equivalente a la función de eficacia luminosa ( $A$ ) (CIE 1924) a fin de simplificar los cálculos.
- La función  $z$  fue seleccionada para ser igual a cero, para la mayor parte del espectro visible, igualmente con el objeto de simplificar los cálculos.
- Los cálculos fueron efectuados para una fuente de igual energía para el conjunto del espectro y para que las superficies de cada función  $x$ ,  $y$ ,  $z$  fuesen iguales.

El resultado de esta transformación fue un conjunto de funciones llamadas funciones colorimétricas CIE  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , que no se representan funciones reales, sino funciones medias, representativas de un observador medio.

### **1.5.1. El diagrama de cromaticidad cie 1931**

- **El triángulo de colores**

Así los valores triestímulos  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , del sistema CIE 1931 que son específicos de un color permiten identificarlo con gran precisión; pero, lamentablemente, la correlación directa con la evaluación visual es muy difícil. Aunque el valor de ésta es bastante conforme a la observación de la claridad, para los valores  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , la aproximación a los criterios de tono y de saturación de la clasificación visual es muy diferente.

Una vez definido el observador patrón, la CIE recomendó un diagrama de cromaticidad para identificar los aspectos cromáticos con independencia de la claridad. Uno de los métodos para definir e identificar fácilmente un color en el diagrama CIE 1931, aparte de utilizar los valores triestímulos ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), consiste en definir la longitud de onda dominante y la pureza colorimétrica.

Este método ofrece una mejor correlación entre los valores numéricos de la colorimetría y la observación visual, porque permite identificar un color en términos de tono y de saturación como la clasificación visual. La longitud de onda dominante es la correspondiente a la mezcla aditiva del color investigado. De esa manera, se identifica el tono del punto del color puro. La pureza colorimétrica es el porcentaje de contribución del color puro en la mezcla. Una pureza de 1 corresponde al color puro (color de espectro) y una pureza de 0 corresponde al color del iluminante (luz blanca).

Es importante observar que la longitud de onda dominante no es una propiedad física sino que se obtiene mediante el cálculo de las coordenadas tricromáticas “x” e “y” a partir de la curva espectral del color que se mide. No tiene relación alguna con una modificación de la curva espectral, es una especificación psicofísica del color que permite una identificación sencilla del tono dominante.

- **Los espacios colorimétricos**

El conjunto de los colores constituye un espacio provisto de una estructura. Etimológicamente, un espacio es una extensión indefinida que contiene y rodea todos los objetos. Los espacios colorimétricos son el resultado de la extensión de la fuente de colorimetría del objeto, ilustrando la posibilidad de definir los colores por números, aportando de ese modo un criterio de clasificación objetivo. Permiten así mismo representar y determinar la diferencia entre los colores, aplicándose esta última propiedad a la definición de la aceptabilidad. Los numerosos atlas de selección de colores presentados bajo formas diversas son la demostración de una forma de espacio. La organización particular de cada uno de ellos, realizada generalmente según un concepto de creatividad, no es matemáticamente modelizable.

- **Historia evolución de 1905 a 1976**

En 1905 Munsell propuso una organización espacial de la clasificación de los colores basada en tres criterios independientes: la claridad, el tono y la saturación. Tras la edición de 1915 del atlas de Munsell, la realización física de este conjunto puso de manifiesto: una organización visualmente equilibrada (espacio uniforme), un método de identificación recíproca de los colores en el cual cada color sólo podía ocupar un único lugar.

Uno de los primeros estudios del espacio colorimétrico CIE 1931 trató de situar en dicho espacio, los umbrales diferenciales de cromaticidad de Wright a fin de cuantificar las diferencias en términos de coordenadas colorimétricas “x” e “y”.

Por la misma razón, las experiencias de MacAdam llevaron a elipses de perceptibilidad de tamaños diferentes según sus colores y sus posiciones. En ambos casos, se obtienen ejes y dimensiones que varían considerablemente de un punto a otro del diagrama de cromaticidad, demostrando así la no uniformidad del espacio CIE 1931.

La dificultad de interpretación de datos numéricos tan diferentes impulsó a los investigadores a desarrollar transformaciones matemáticas del espacio CIE 1931 destinadas con más o menos éxito a obtener un espacio uniforme en diferencias de colores.

Finalmente en 1976, la CIE recomendó dos nuevos sistemas CIELuv y CIELab, cuyos méritos respectivos fueron a menudo objeto de debate. Para distinguirlos de los demás sistemas y particularmente del sistema Hunter, todos sus parámetros llevan un asterisco (p.ej:  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ).

El sistema CIELuv es una transformación lineal y por consiguiente aplicable a las mezclas aditivas, por ejemplo, el estudio de las luces en televisión.

El sistema CIELab está reservado al estudio de los colores de superficie o de objeto.

- **El espacio colorimétrico CIELab definiciones y propiedades.**

El espacio CIE 1976, llamado el sistema CIELab, se basa en una transformación matemática del sistema CIE 1931. Mientras busca mediante esta transformación, obtener un espacio uniforme en diferencias de colores, uno de los otros objetivos ha sido el de desarrollar un sistema mucho más fácil de interpretar y al mismo tiempo, más fácil de referenciar. En el espacio CIELab, encontramos el método de identificación tridimensional, retomando la teoría de los tres pares antagonistas blanco-negro, rojo-verde, amarillo-azul de la visión de los colores.

Sus coordenadas rectangulares  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , donde cada uno representa:

- $L^*$  representan la claridad,
- $a^*$  representa el componente cromático rojo-verde
- $b^*$  representa el componente cromático amarillo-azul

Y en sus sus coordenadas polares  $L^*$ ,  $C^*$  y  $H^*$  donde cada uno representa:

- $L^*$  sigue representando la claridad,
- $C^*$  representa el croma o la saturación,
- $H^*$  representa de tono o la tonalidad cromática

Como consecuencia de su transformación, el espacio CIELab no tiene cromaticidad.

Los componentes  $(a^*, b^*)$  o  $(C^*, H)$  definen el plano de cromaticidad en que las propiedades de aditividad de los colores ya no se respetan.

A pesar de ser más uniforme que el espacio inicial de 1931, el espacio CIE Lab no es rigurosamente uniforme en la apreciación psicosensores de los colores, pero es sobre todo mucho más sencillo a la hora de interpretar un punto de color y las diferencias colorimétricas.

- **Diferencias y aceptabilidad del color**

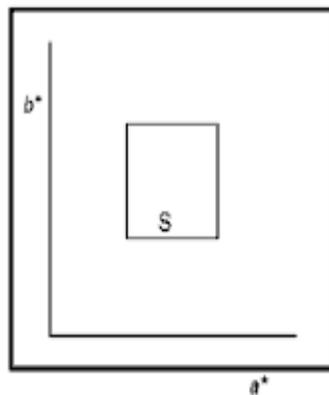
Numerosas industrias que utilizan procedimientos de coloración tienen que elaborar productos de color uniforme, de calidad y aspecto conformes a las expectativas y exigencias de sus clientes o usuarios. En todos los casos, los productos deben fabricarse respetando el color deseado, dentro del límite de las variaciones admisibles de ese color y de acuerdo con las especificaciones técnicas. La medición del color y la evaluación de las diferencias de color son determinantes para ayudar a los industriales, productores de color y por el cumplimiento de los requisitos y condiciones establecidas entre el cliente y el proveedor.

La búsqueda de un espacio de color uniforme también tiene por objeto permitir la evaluación de diferencias de color a través de la medición de la distancia geométrica que separa los puntos de color de este espacio. Así, la distancia geométrica entre dos puntos será calculada por una relación que hace intervenir su proyección especial sobre cada uno de las tres principales variables del sistema colorimétrico.

- **Tolerancias usadas para aprobar o rechazar en CIELab  $DL^*$ ,  $Da^*$  y  $Db^*$**

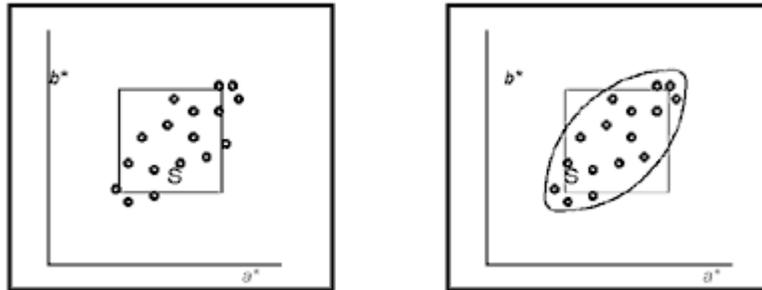
Como una técnica común usada para aprobar o rechazar, se debe establecer límites para los valores de  $DL^*$ ,  $Da^*$ , y  $Db^*$  dentro de un estándar y un lote, si éste cae dentro los límites de aceptabilidad será aprobado, mientras si cae fuera, será rechazado, la figura 1 ilustra un típico  $Da^*/Db^*$  en bloque de tolerancia en a/b del espacio de color dentro del cual es aceptable un lote.

Figura 1. **CIE  $L^*a^*b^*$  Tolerancias**



En la figura 2, una serie de lotes han sido graficados y son considerados aceptables agrupados respecto al estándar. Si un círculo o una elipse es dibujada alrededor de los lotes se considera aceptado como en la figura 3, esto puede ser visto indicando que algunos de los lotes caen dentro de la elipse, pero fuera del cuadro. Estos lotes serán visualmente aceptados, pero podrían fallar por el sistema CIELab.

Figure 2. **Lote aceptable**    Figure 3. **Elipse aceptable**

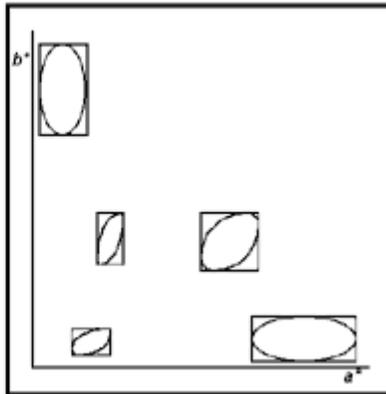


De igual manera los lotes que caen dentro del cuadro pero fuera de la elipse serán pasados por el programa, aún cuando ellos son inaceptables visualmente. Si se examinan los estándares localizados en el cuadrante  $a^*/b^*$ , se encuentra que el tamaño de la elipse representa aceptable variación de tono (figura 4), indicando que más observadores son más sensitivos a las variaciones en algunos colores que en otros. Si CIELab tolerancias son usadas por los estándares representados por las elipses, una diferencia de las tolerancias serán requeridas por cada estándar como puede ser visto en la figura 5. Por esta razón, CIELab  $DL^*$ ,  $Da^*$ , y  $Db^*$  tolerancias no reúnen los requerimientos para una decisión de aceptación o rechazo.

Figura 4. **Elipses de aceptabilidad**



Figura 5. **CIELab talla de tolerancias aceptables**

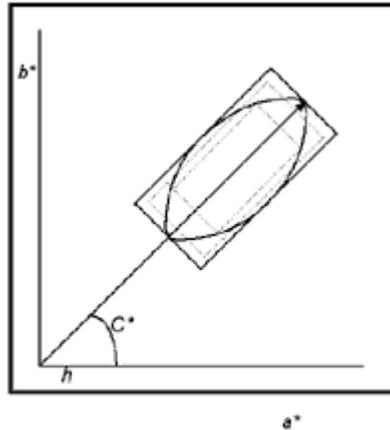


- Tolerancias CIELab  $DL^*$ ,  $DC^*$ ,  $Dh^*$

Examinando la figura 6 en la cual la elipse representa visualmente un lote aceptable, alineados con el centro de  $a^*/b^*$  del espacio de color, usando los conceptos de chroma ( $C^*$ ) y Hue ( $h$ ) se puede interpretar de la siguiente manera.

El chroma ( $C^*$ ) es la distancia de una muestra del centro del espacio de color hasta llegar al punto de ubicación del color estándar, asumamos que es una línea recta y Hue ( $H$ ), es el ángulo formado por el eje positivo  $a^*$  y esta línea conectando la muestra con el centro del espacio de color.

Figura 6. CIELab parámetros de tolerancias



Lotes que concidan dentro de esta elipse tanto abriendo o cerrando más el ángulo pueden tomarse como aceptables matemáticamente, pero será necesario realizar una inspección visual para determinar la correcta elipse de evaluación antes de definirla, una vez definida se tomará como aceptable lo que en ella coincida.

- Tolerancias usadas en CIELab  $DE^*$

$DE^*$ , es un valor que describe el total de la diferencia de color entre un estándar y un lote, una aprobación o rechazo del sistema basado sobre un simple valor de la unión de las tres dimensiones o valores de  $L$ ,  $a$ ,  $b$ , podrían hacer más difícil entender un factor importante de los requerimientos, para una aceptable decisión de aprobación o rechazo del color.

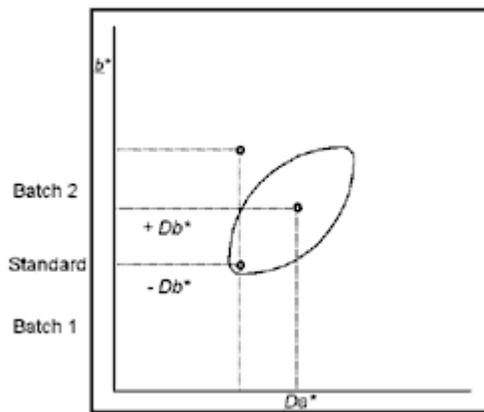
Dos muestras han sido ploteadas en la figura 7. Se asume que los valores de  $DL^*$  y  $Da^*$  son ambos 0.00 y sólo la diferencia es el signo de  $Db^*$ . Resolviendo la fórmula de  $DE^*$  con estos valores de  $DL^*$ ,  $DE^*$  dan los siguientes resultados:

$$DE^*(\text{Lote 1}) = DL^* + Da^*_ - + (-Db^*) = Db^*$$

$$DE^*(\text{Lote 2}) = DL^* + Da^* + (+Db^*) = Db^*$$

Los valores de  $DE^*$ , de los dos lotes serán iguales aunque tendrán una significativa diferencia en el color de los lotes cuando se compare visualmente entre ellos. Si una tolerancia de aprobado o rechazado, fue establecida basada sobre el lote 1, lote 2, podría también pasar porque tuvo iguales valores en  $DE^*$ . La elipse en la figura 7 indica que el lote 2 es visualmente inaceptable debido a la larga variación de Hue guiando para la conclusión que una aprobación o rechazo del color basado solamente sobre CIELab  $DE^*$  algunas veces producirá resultados inaceptables.

Figura 7. **CIELab  $DE^*$  Tolerancia**



- Tolerancias usadas en la fórmula CMC

El Color Measurement Committee de Gran Bretaña produjo una nueva fórmula que modifica la ecuación del sistema CIELab denominado  $DE(CMC)$  este valor calcula el volumen total de la región de cambios del espacio de color de cada elipse y la iguala a 1.

Este tamaño de elipse correlaciona con la percepción visual, pero el DE (CMC) permanece en 1. Es por consiguiente posible para el uso de un valor simple de DE(CMC) aprobar o rechazar tonalidades.

DE (CMC) es típicamente escrito como CMC (2:1), donde (2:1) son valores usados en la fórmula CMC correspondiendo a las variables (l:c) con estos valores de (l:c), la proporción de *lightness*, *chroma* y de *hue*, son fijados en el CMC ecuación también que ellos correlacionan de forma visual. Estos valores deberán ser retenidos constante a (2:1). Debido a que la CMC fórmula permite el uso de una tolerancias individuales para todos los tonos, un aprobado o rechazado del programa basado sobre CMC no será difícil para implementar o entender el CMC tolerancias también correlacionará con acuerdos visuales sin hacer caso del comienzo del color evaluado, haciendo CMC una decisión ideal para una evaluación matemática del color.

- **Implementando CMC pasa/falla**

El primer paso para una exitosa implementación de un programa en CMC pasa o falla, está desarrollado en base a una técnica repetitiva de medición. Si la muestra medida no es repetible, la diferencia de color no será de confianza y los resultados de pasa/falla calculados variaran significativamente.

Propiamente la técnica de medición incluirá determinando al apropiado acondicionamiento, grosor de la muestra, colocación de la muestra en el espectrofotómetro y el número de mediciones; una vez establecida la técnica correcta, todos los estándares y lotes deberán ser medidos de igual manera.

El espectrofotómetro deberá tener mantenimiento y calibración de acuerdo a las especificaciones del fabricante para asegurar la exactitud de las mediciones de las muestras. Después de establecida la correcta técnica de medición, una apropiada DE(CMC) tolerancia deberá ser seleccionada. Un valor de 1. es un excelente punto de partida para DE(CMC), pero esto podría variar dependiendo del uso final del material. La mejor técnica para determinar un apropiado DE(CMC), o factor comercial, es evaluar la información histórica.

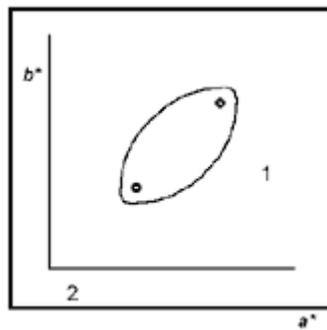
El factor comercial que es seleccionado deberá ser un valor que generará un lote inaceptable. Otra vez, estos valores podrían no ser 1.8 dependiendo sobre cuan crítico es el color por el comienzo del producto teñido.

Los materiales que tienen menos brillantes podrían tener éxito evaluado, usando un factor comercial de 1.25 ó 1.5. Lo contrario sería en que algunos productos podrían requerir un DE de menos que 1.0. Después de establecido el punto de partida de el DE(CMC) factor comercial, este valor deberá ser confirmado a través de pruebas usando una clasificación de colores en la producción . Si la tolerancia seleccionada no provee un pasa/falla dato que correlacione con el acuerdo visual de la mayoría de observadores, el valor deberá ser modificado. Una vez el correcto valor es establecido, todo observador deberá estar de acuerdo con los resultados aceptables del programa pasa/falla.

Aunque un pasa/falla el programa basado sobre DE(CMC) proveerá datos sobre la aceptabilidad de un lote comparado a los estándares, no proveerá datos indicando como un lote comparado para lotes previos.

En la figura 8, los dos colores presentados son toda la aceptabilidad de la elipse, indicando que ambos pasan cuando son comparados al estándar, pero hay una diferencia significativa entre los dos lotes cuando son comparados, para cada otro. Aunque ambos lotes pasen, el cliente debería objetar que de lote a lote existe una variación, si estos lotes son entregados juntos o consecutivos.

Figura 8. **Variación del lote**



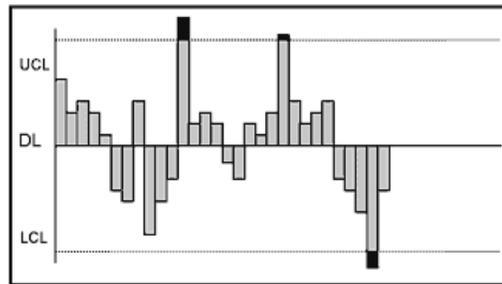
Para asegurar que el cliente reciba lotes con limitada variabilidad, es necesario establecer límites de control de acuerdo a la figura 9. Una gráfica indicará el desarrollo de algunos previos lotes en consideración para valores de DL, DC y DH son calculados con aceptabilidad de un nuevo lote relativo a previos lotes. Las gráficas de corridas son también una ayuda para determinar si el proceso está fuera de control.

Un particular color es teñido sobre una base regular, esto podría ser obvio que los lotes aprobados son todos, localizado en una área específica de espacio de color relativo al estándar, el lote podría ser sesgado al lado rojo o al lado brillante similar a los lotes representados en la figura 10. Como un lote nuevo teñido, podría encontrarse dentro de esta área localizada.

Para asegurar que sólo algunos lotes en esta nueva región, son juzgados como aprobados es necesario modificar CMC elipse de aceptabilidad para incluirlos en esta región.

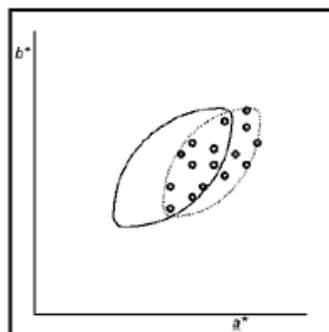
La raya de la elipse indica una transformación del CMC fórmula usando un *software* especial.

Figura 9. **DL gráfica de producción**



Un número significativo de aceptabilidad visual de lotes. Cuando esta modificación es utilizada, sólo los lotes que caen en los nuevos límites serán pasados. Los lotes que caen fuera del área, aunque ellos podrían estar dentro del original CMC tolerancia, serán rechazados. Esta modificación será aplicable para especificar estándares en el cálculo, y tendrán que ser repetidos para otros estándares.

Figura 10. **Sesgado de la distribución de lotes**



## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Recursos

#### 2.1.1 Humanos

- Asesor del trabajo de graduación.
- Estudiante realizador del trabajo de graduación.
- Personal de laboratorio textil.
- Personal de lavandería industrial.

#### 2.1.2 Físicos

- Máquinas TUPESA para lavado industrial.
- Computadora PENTIUM III.
- Impresora Canon BJC-2000.
- Tela 100 por ciento cotton teñida en índigo puro.
- Químicos y enzimas celulosas para el proceso de lavado.

## **2.2 Equipo**

- Espectrofotómetro GRETAG MCBETH CE 2180. Es un espectrofotómetro con un consumo de energía de 30 watts con requerimientos eléctricos de 120 vac+/-10por ciento o 230 vac+/-10por ciento 50-60 HZ. Los requerimientos del medio ambiente deben ser controlados a una temperatura de operación de 59 a 90 F ( 15 a 32°C). Humedad relativa de operación 0 por ciento a 80 por ciento. (No condensado).
- Programa *ProPalette Textiles Silver*, by *GretagMacbeth, LLC*. Versión 1.0.

## **2.3 Procedimiento experimental**

### **2.3.1 Corte de Muestras**

- Se cortó una muestra de tela Demin 100 por ciento algodón teñido con índigo puro, 50 mts de largo desde el inicio del mismo.
- Se cortó de esta tela 130 tubos de 0.25m x 0.38m los cuales se deberán identificar con el número de rollo con marcador indeleble para tela con un punto de finura máximo de 1.5mm.

### **2.3.2 Elaboracion de tubos**

- Se confeccionaron los tubos dejando en uno de los orillos del mismo un ruedo de 0.01 m para simular el ruedo de un pantalón.

- Se confeccionaron estos tubos con hilo naranja *orange* para simular la confección de prendas

### **2.3.3 Calibración del espectrofotómetro *GRETAG MACBETH 2180UV***

- Al ingresar al programa del espectrofotómetro, ingresar al sistema de control de calidad.
- Se escoge la ventana de *Functions, Quality Control* del menú principal, en el ícono de *Quality Control* se marca con el puntero de la computadora y se da un click izquierdo. El cuadro de *Quality Control* aparece.
- En el cuadro de *Quality Control*, presionar con el puntero el ícono de medición de calibración. Y aparece el ícono de medición.
- Calibrar el equipo antes de realizar las mediciones correspondientes tanto en blanco como en negro.

### **2.3.4 Medición de muestras por medio del espectrofotómetro**

- Al ingresar al programa del espectrofotómetro, ingresar al sistema de control de calidad.
- Se escoge la ventana de *Functions, Quality Control* del menú principal, en el ícono de *Quality Control* se marca con el puntero de la computadora y se da un click izquierdo. El cuadro de *Quality Control* aparece.

- Ingresar el estándar de color que fue obtenido según el lavado industrial estándar.
- Se midió cada una de las muestras con el instrumento, por lo menos 6 veces sin rotar ni mover la muestras del primer punto tomado.
- Se midieron las muestras tomadas a cada 5 minutos con lavado enzimático de cada una de las 10 corridas realizadas en la lavandería y se exportan los datos a una hoja de *excel* y se obtiene el promedio de las mismas para tener la confianza de la repetitividad de las lecturas.
- Las lecturas realizadas en el punto 6.3.5.5 se deben realizar mediante los métodos de CIELAB y CMC.

### **2.3.5 Proceso de lavado industrial**

- Lavar las mantas según la fórmula No.1, variando el tiempo de abrasión de 0, 5, 10,15,20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 y 55 minutos. En la fórmula de lavado se denota la variable X, de tiempo en el proceso de abrasión.
- Planchar las muestras para eliminar las arrugas que puedan ocasionar una variación en el momento de la lectura en el espectrofotómetro.
- Al momento de recibir las mantas después de planchado, se deben ambientar 4 horas como mínimo a temperatura de 70 °F y 65 por ciento de humedad relativa antes de medir en el espectrofotómetro.

### 2.3.6 Proceso de lavado por utilizar para el lavado industrial

Figura 11. Proceso de lavado estandar con variación de tiempo de abrasión y adición de coadyuvantes requeridos

OPERACIÓN	ACONDICIONAMIENTO			CANTIDAD DE QUÍMICOS			PH	RELACIÓN DE BAÑO
	Volumen (ml de agua)	Temperatura ( C )	Tiempo (min)	QUÍMICOS	Volumen (ml)	Peso (g)		
DESEMGOE	90	70	5	LUB-ID NBA VGS	200 150 10		6.5	W/L 1:10
RINSE	100	30	1	AGUA	100		7	W/L 1:10
ABRASIÓN	40	60	X*	STG(ENZIMA) GRANSERSE		80 150	6.5	W/L 1:06
RINSE	100	30	1	AGUA	100		7	W/L 1:10
DESACTIVACIÓN	60	70	12	ACU		150	5	W/L 1:05
RINSE	100	30	1	AGUA	100		7	W/L 1:10
SUAVIZADO	90	65	12	SUAVIZANTE CATIONICO/ ANTIOZONO	150		8	W/L 1:10
CENTRIFUGADO			2					
SECADO		65	40					

\* X Representa los tiempos de abrasión a los cuales se desarrolló los diferentes procesos de lavado, los cuales son: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 y 55 minutos.

## 2.4 Análisis estadístico de datos

- Para las lecturas espectrofotométricas (DE, DH, DL), se obtendrá el promedio aritmético de las lecturas, para obtener el resultado medio de la distribución de las mediciones repetidas para una misma muestra, para obtener la lectura representativa, la fórmula a utilizar es la siguiente:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

- Para el desarrollo de las lecturas espectrofotométricas (DE, DH y DL) respecto al estándar de lavado, se realizará un estudio de regresión, ajustándose las curvas a modelos exponenciales y polinomiales, debido a que, parte del análisis, es necesario describir matemáticamente el comportamiento de acuerdo con las variables de tiempo en el proceso de abrasión.
- Se realizaron gráficas de control con el objetivo de definir si el centro o promedio de las mediciones se han desplazado hacia arriba o hacia abajo respecto de las lecturas de DE, DH y DL de las muestras contra el estándar de lavado, utilizando el siguiente modelo.

$$UCL = \mu + 3\sigma/\sqrt{n}$$

$$LCL = \mu - 3\sigma/\sqrt{n}$$

- Se establecieron límites de tolerancia de las mediciones espectrofotométricas (DE, DH y DL) de las mediciones de después de lavado para determinar los límites permisibles de variación de acuerdo al tiempo de abrasión. El modelo a utilizar es el siguiente:

$$LI = (\mu - Ks)$$

$$LS = (\mu + Ks)$$

- Se graficaron las variables espectrofotométricas después de lavado vs, el tiempo de abrasión.
- Se desarrollaron gráficas de fórmulas correlacionadas de dos variables y se determinó los valores de correlación para cada una de estas expresiones matemáticas.



### 3. RESULTADOS

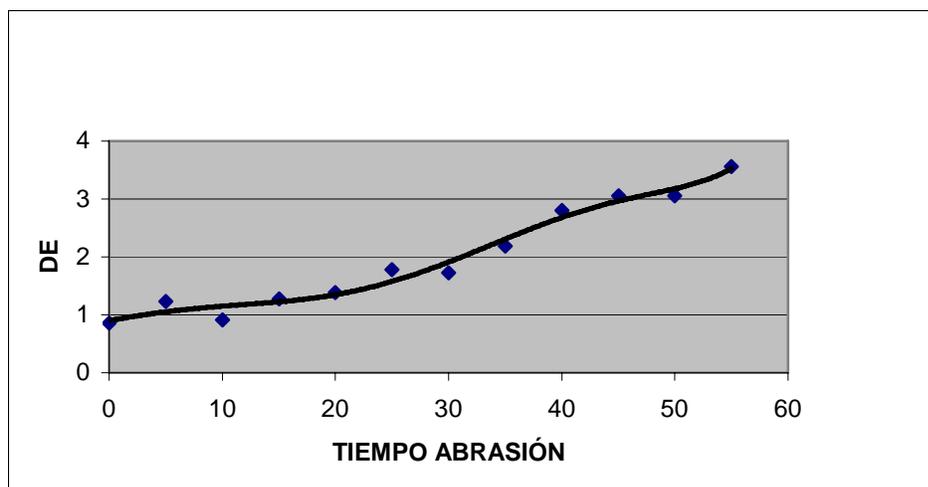
Los resultados obtenidos en el estudio espectrofotométrico de la degradación del colorante índigo en *denim* 100 por ciento algodón se presentan a continuación:

- a) La tendencia matemática de la degradación del colorante índigo en tela 100 por ciento algodón al ser sometida a un lavado enzimático tomando en consideración la variable DE CMC a través del tiempo es:

$$\text{DE CMC} = 2\text{E-}09\text{T}^6 - 3\text{E-}07\text{T}^5 + 1\text{E-}05\text{T}^4 - 0.0002\text{T}^3 - 0.0003\text{T}^2 + 0.0351\text{T} + 0.9007$$

La cual corresponde una ecuación polinomial con un coeficiente de correlación de 0.9771.

Figura 12. **Curva de degradación del colorante índigo a través de la variable DECMC en el tiempo.**

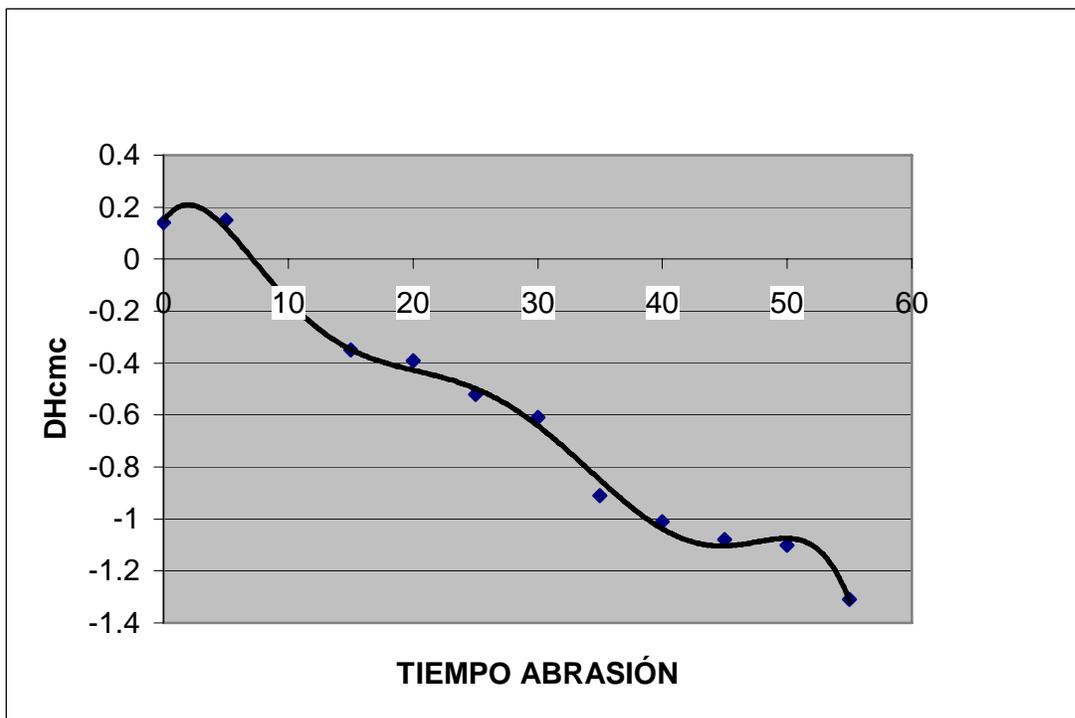


b) La tendencia matemática de la degradación del colorante índigo en tela 100 por ciento algodón al ser sometida a un lavado enzimático tomando en consideración la variable DHCMC a través del tiempo es:

$$\text{DHCMC} = -6\text{E-}09\text{T}^6 + 1\text{E-}06\text{T}^5 - 6\text{E-}05\text{T}^4 + 0.0018\text{T}^3 - 0.0222\text{T}^2 + 0.0686\text{T} + 0.1473$$

La cual corresponde una ecuación polinomial con un coeficiente de correlación de 0.9958.

Figura 13. **Curva de degradación del colorante índigo a través de la variable DHCMC en el tiempo.**

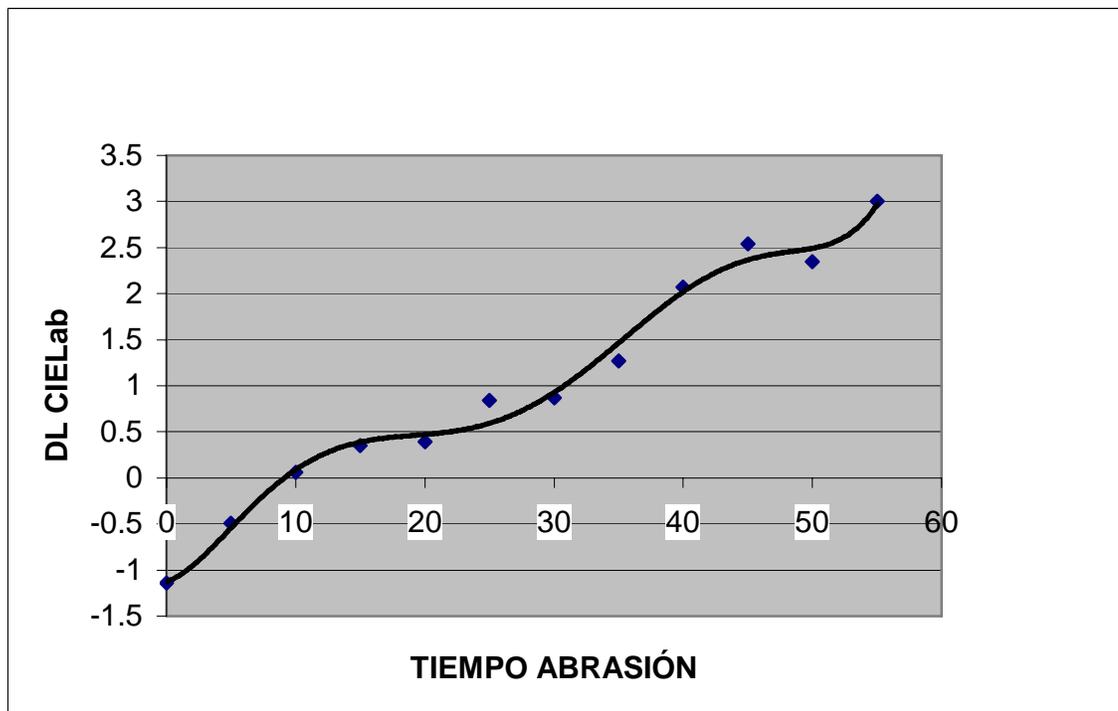


c) La tendencia matemática de la degradación del colorante índigo en tela 100 por ciento algodón al ser sometida a un lavado enzimático tomando en consideración la variable DL CIELab a través del tiempo es:

$$DL\ CIELab = 1E-08T^6 - 2E-06T^5 + 0.0001T^4 - 0.0026T^3 + 0.025T^2 + 0.0442T - 1.1242$$

La cual corresponde una ecuación polinomial con un coeficiente de correlación de 0.9906.

Figura 14. **La curva de degradación del colorante índigo a través de la variable DL CIELab en el tiempo.**

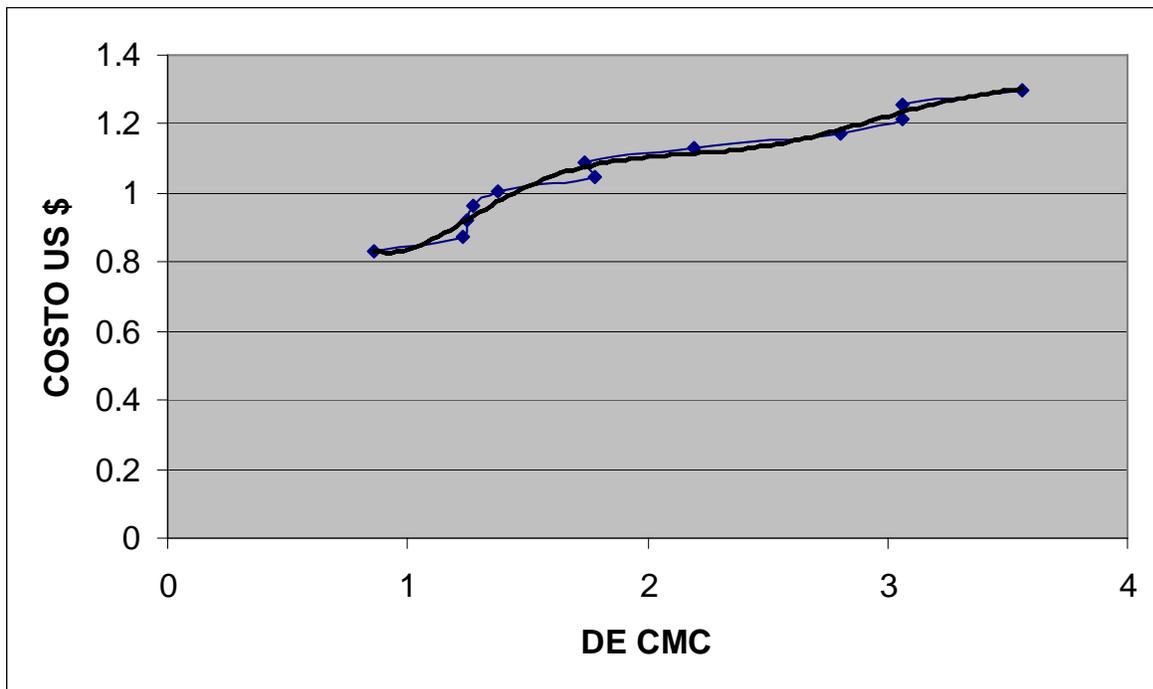


d) La tendencia matemática de la evaluación de costo de lavado Industrial a través de la variable colorimetría DE CMC contra el tiempo de abrasión es:

$$\text{Costo US \$} = 0.0434DE^6 - 0.6466DE^5 + 3.8452DE^4 - 11.592DE^3 + 18.467DE^2 - 14.36DE + 5.0790$$

La cual corresponde una ecuación polinomial con un coeficiente de correlación de 0.9868.

Figura 15. **Curva de evaluación de costo a través de la variable DE CMC respecto al tiempo de abrasión.**



### 3.1 Discusión de resultados

En el lavado industrial, el proceso más determinante es la abrasión, el cual se realizó con una enzima celulosa para determinar el comportamiento matemático de la degradación del colorante natural índigo en una construcción de tela 100 por ciento algodón, respecto al tiempo en donde se ven afectadas las variables de concentración de la enzima y la degradación del colorante.

Al analizar las gráficas correlacionadas de las variables colorimétricas DE CMC, DL CIELab y DH CMC contra el tiempo de abrasión, se determinó que el comportamiento de estas tres variables colorimétricas en el proceso de abrasión enzimático corresponden a una ecuación polinomial de sexto grado con coeficientes de correlación del 0.9771, para la variable colorimetría DE CMC, de 0.9906 para la variable colorimétrica DL CIELab y para DH CMC un coeficiente de correlación de 0.9958, las tres variables colorimétricas presentan una correlación aceptable. Siendo la de mayor correlación la variable DH CMC para la evaluación cuantitativa, pero para la evaluación de proceso de lavado industrial es mejor utilizar DE CMC y DL CIELab.

Al evaluar el comportamiento matemático y la curva de DE CMC se determina que la tendencia aumenta en el tiempo, indicando que el colorante sufre una degradación del color muy fuerte en un tiempo muy corto, el parámetro máximo de aceptación para evaluar una variación de color de un estándar contra una muestra en esta variable colorimétrica es de 1.8 DE, el cual llega casi a su límite a los 30 minutos de abrasión, arriba de este tiempo de abrasión se observa una degradación del colorante fuera de límites de aceptación, siendo el DE a este tiempo de 1.74 a los 35 minutos de abrasión el DE es de 2.09. lo que convierte al proceso de abrasión enzimático muy crítico a los 30 minutos.

El proceso de abrasión debe estar estrictamente controlado en este punto crítico y las condiciones de operación (concentración de enzima y temperatura) para no producir degradaciones del colorante fuera de límites de aceptación, el cual convierte a las prendas, en prendas de segunda por encontrarse fuera de los límites de tonalidad creando pérdidas enteras de lotes de producción si tener opción a ser recuperadas.

La variable DL presenta una curva de degradación del colorante índigo que indica que este sufre una variación en la intensidad, es decir, que la abrasión enzimática da un efecto de color claro. Se puede demostrar que el colorante índigo es fuertemente oscuro ya que da un valor de intensidad negativo lo que indica que es oscuro ya que sin abrasión se tiene un valor de DL de  $-1.14$ . La variación de intensidad de un estándar contra una muestra dada se da en rangos de DL que van desde  $-1$  a  $+1$ , determinando que a los 30 minutos de abrasión DL es de  $0.87$  y a los 35 minutos de abrasión es de  $1.27$  DL, muy cercano al minuto 30 de abrasión el proceso se vuelve crítico, y debe en este caso ser muy controlado. La curva matemática que define en comportamiento de esta variable respecto al tiempo de abrasión posee un coeficiente de correlación de  $0.9908$  lo cual es aceptable y demuestra que esta puede ser usada para evaluar los procesos de producción y determinar el tiempo óptimo de abrasión del colorante índigo puro en tela 100 por ciento algodón.

La variable colorimetría DH CMC presenta un comportamiento polinomial de sexto grado con un coeficiente de correlación de  $0.9958$  el cual es aceptable, siendo esta la variable que mejor correlaciona en el estudio, Esta variable colorimetría demuestra que en el proceso de abrasión enzimática no se está cambiando de croma en el proceso ya que los valores de DH hasta los 50 minutos de abrasión se encuentran entre parámetros aceptables.

La evaluación del costo de lavado de acuerdo a la variable colorimétrica DE CMC, presenta una curva polinomial con un coeficiente de correlación de 0.9868, indicando que esta evaluación de costo es confiable, respecto a las otras variable colorimétricas. De acuerdo a los requerimientos de nuestros clientes, de rapidez de respuesta en el costeo de nuevos programas de lavado industrial se puede utilizar este método para evaluar los costos de lavados obteniendo solamente los valores de DE CMC del estándar contra la muestra de tela deseada, evitándose así, la pérdida de tiempo al correr pruebas de desarrollo para determinar los costos de lavado.

Al analizar los datos obtenidos de DE CMC y DL CIELab a un tiempo de proceso de abrasión de 30 minutos de acuerdo a los rangos obtenidos por medio de los parámetros UCL (límite de control superior) y LCL (límite de inferior de control) se observó que las variables colorimétricas ya descritas presentaron datos fuera de rango a partir del 55 por ciento lo cual indica que no se pueden establecer rangos de control en las curvas colorimétricas, debido a que tienden a la linealidad y esto hace que se obtengan datos fuera de los límites de control superior e inferior. Al analizar los mismos resultados espectrofotométricos obtenidos con un análisis estadístico de LS (límite superior) y LI (límite inferior), en cada una de las variables colorimétricas de estudio se determinó que un 93 por ciento de los datos se encuentran dentro de estos rangos, presentando una mejor dispersión de datos en el comportamiento del proceso, pudiendo utilizarse éstos como rangos de control.

## CONCLUSIONES

1. El tiempo de abrasión enzimático, crítico para la degradación del colorante índigo es de 30 minutos ya que después de este tiempo de abrasión las variables DE CMC y DL CIELab sobrepasan los límites de aceptación.
2. La variable colorimetría DH CMC no es una variable crítica del proceso de abrasión enzimático por lo que se debe descartar para efectos de control de procesos cuando la tela es teñida con índigo puro.
3. El proceso de lavado enzimático como se puede apreciar en las curvas de DH CMC y DL CIELab, no varía en croma, es decir, en el color propiamente, sino sólo en intensidad, tomando como variable colorimetría de control de procesos de abrasión enzimático en telas denim 100 por ciento teñidos con índigo puro las variables DL CIELab y DE CMC.
4. La variable que representa la correlación más exacta para la evaluación de costos es DE CMC obteniendo la ecuación:  $\text{costo US \$} = 0.0434DE^6 - 0.6466DE^5 + 3.8452DE^4 - 11.592DE^3 + 18.467DE^2 - 14.36DE + 5.0790$ , obtenida del gráfico costos vs. DE CMC, con un coeficiente de correlación de 0.9858 la cual da a conocer si el costo lo puede afrontar un cliente de acuerdo a la variación de color que se presente en la muestra dada.

5. Para definir los parámetros de control de un lavado con abrasión enzimático en una lavandería industrial profesional, se deben establecer límites superior e inferior de proceso pero no se pueden definir límites de control, ya que los valores espectrofotométricos reflejan un comportamiento polinomial de sexto grado.

## RECOMENDACIONES

1. Es conveniente ampliar el estudio para otros tipos de lavados con piedra, perlita y clorados.
2. Se debe ampliar el estudio para denim teñidos con colorantes que sean mezclas de índigo con sulfuros.
3. Profundizar el estudio con telas que sean mezcla de algodón con otro tipo de fibra.
4. El control estadístico se debe establecer primariamente, de acuerdo con las medidas de tendencia central, y principalmente estableciendo los límites superior e inferior de las variables espectrofotométricas críticas de los diferentes procesos de lavado.
5. Incrementar el estudio de costeo de fórmula para diferentes lavados, variando también tipo de químicos en del lavado industrial.

## BIBLIOGRAFIA

Erhardt y otros. *Tecnología textil básica*, México: editorial Trillas, 1980, 180 pp.

Garcia Nieto Rogelio, “**Fibrologia**”. México: Editorial ESIT, 1985, 957 pp.

Kuehni, Rolf G. **Cielab color difference, and lightness, hue and chroma componentes for objective color control**. Estados Unidos de Norteamérica:s.e.,s.a.

Martinez de las Marias. “**Química y física de las fibras textiles**”, España: Editorial Alambra, 1976, 203 pp.

**Propalette textiles silver**. Estados Unidos de Norteamérica:s.e,s.a.

Scheaffer, Richard L, James T. McClave. **Probabilidad y estadística para ingenieros**. Estados Unidos Norteamérica: Editorial Grupo editorial Iberoamericana, 1993, 685 pp.

Swift Cooperation, “**Denim College**” Estados Unidos de Norteamérica:s.e,s.a.

Tew, Jerry G. “The magazine of the textile dyeing, printing, and finishing industry”. *Revista AATCC Review* (Estados Unidos de Norteamérica) (1):37.2001.

Valiente Barderas, Antonio. *Diccionario de ingeniería química*. México: Editorial Longman de México editores, S.A. de C.V., 1990, 237 pp.

## APENDICE

### Apéndice 1

**Tablas de datos espectrofotométricos por corrida con datos estadísticos calculados**

Tabla I. **Resultados y datos estadísticos de 0 a 10 minutos de abrasión**

CORRIDA #	DESENGOME			ABRASION A 5 MIN.			ABRASIÓN A 10 MIN.		
	DE CMC	DH CMC	DL	DE CMC	DH	DL	DE	DH	DL
1	0.84	0.16	-1.1	1.2	0.18	-0.48	0.9	-0.18	-0.04
2	0.87	0.12	-1.14	1.18	0.17	-0.49	0.9	-0.21	-0.03
3	0.86	0.18	-1.15	1.29	0.15	-0.48	0.9	-0.23	0.09
4	0.89	0.13	-1.11	1.18	0.14	-0.46	0.93	-0.17	0.1
5	0.81	0.15	-1.1	1.32	0.18	-0.49	0.88	-0.19	0.1
6	0.86	0.11	-1.14	1.28	0.12	-0.48	0.9	-0.21	0.1
7	0.89	0.12	-1.14	1.23	0.13	-0.49	0.9	-0.21	0.09
8	0.89	0.14	-1.28	1.26	0.15	-0.51	0.93	-0.23	-0.04
9	0.86	0.11	-1.1	1.22	0.17	-0.49	0.91	-0.19	0.1
10	0.86	0.14	-1.1	1.18	0.14	-0.49	0.92	-0.19	0.09
<b>PROMEDIO</b>	<b>0.86</b>	<b>0.14</b>	<b>-1.14</b>	<b>1.23</b>	<b>0.15</b>	<b>-0.49</b>	<b>0.91</b>	<b>-0.20</b>	<b>0.06</b>
<b>Desviación STD</b>	<b>0.02</b>	<b>0.02</b>	<b>0.05</b>	<b>0.05</b>	<b>0.02</b>	<b>0.01</b>	<b>0.02</b>	<b>0.02</b>	<b>0.06</b>
<b>COEFICIENTE VARIACIÓN</b>	<b>2.893</b>	<b>16.695</b>	<b>-4.807</b>	<b>4.072</b>	<b>14.286</b>	<b>-2.743</b>	<b>1.728</b>	<b>-10.074</b>	<b>114.558</b>
<b>PUNTO MAX</b>	<b>0.890</b>	<b>0.180</b>	<b>-1.100</b>	<b>1.320</b>	<b>0.180</b>	<b>-0.460</b>	<b>0.930</b>	<b>-0.170</b>	<b>0.100</b>
<b>PUNTO MIN</b>	<b>0.810</b>	<b>0.110</b>	<b>-1.280</b>	<b>1.180</b>	<b>0.120</b>	<b>-0.510</b>	<b>0.880</b>	<b>-0.230</b>	<b>-0.040</b>
<b>LS</b>	<b>0.879</b>	<b>0.151</b>	<b>-1.100</b>	<b>1.265</b>	<b>0.167</b>	<b>-0.478</b>	<b>0.917</b>	<b>-0.188</b>	<b>0.096</b>
<b>LI</b>	<b>0.847</b>	<b>0.121</b>	<b>-1.172</b>	<b>1.203</b>	<b>0.139</b>	<b>-0.494</b>	<b>0.897</b>	<b>-0.214</b>	<b>0.016</b>

Tabla II. Resultados y datos estadísticos de 15 a 25 minutos de abrasión

CORRIDA #	ABRASIÓN A 15 MIN.			ABRASIÓN A 20 MIN.			ABRASIÓN A 25 MIN.		
	DE CMC	DH CMC	DL	DE CMC	DH	DL	DE	DH	DL
1	1.24	-0.35	0.35	1.41	-0.39	0.41	1.77	-0.53	0.82
2	1.29	-0.38	0.38	1.45	-0.41	0.38	1.78	-0.48	0.84
3	1.29	-0.37	0.32	1.37	-0.38	0.39	1.75	-0.52	0.85
4	1.28	-0.37	0.32	1.35	-0.42	0.41	1.8	-0.53	0.88
5	1.27	-0.32	0.37	1.37	-0.41	0.42	1.75	-0.53	0.82
6	1.26	-0.33	0.37	1.38	-0.38	0.38	1.76	-0.48	0.82
7	1.28	-0.32	0.33	1.41	-0.37	0.37	1.76	-0.52	0.85
8	1.24	-0.37	0.36	1.37	-0.42	0.42	1.84	-0.53	0.83
9	1.26	-0.36	0.32	1.35	-0.38	0.37	1.82	-0.51	0.84
10	1.25	-0.32	0.34	1.35	-0.37	0.38	1.77	-0.52	0.85
<b>PROMEDIO</b>	<b>1.27</b>	<b>-0.35</b>	<b>0.35</b>	<b>1.38</b>	<b>-0.39</b>	<b>0.39</b>	<b>1.78</b>	<b>-0.52</b>	<b>0.84</b>
Desviación STD	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02
<b>COEFICIENTE VARIACIÓN</b>	<b>1.499</b>	<b>-6.947</b>	<b>6.702</b>	<b>2.377</b>	<b>-4.946</b>	<b>5.263</b>	<b>1.808</b>	<b>-4.016</b>	<b>2.339</b>
<b>PUNTO MAX</b>	<b>1.290</b>	<b>-0.320</b>	<b>0.380</b>	<b>1.450</b>	<b>-0.370</b>	<b>0.420</b>	<b>1.840</b>	<b>-0.480</b>	<b>0.880</b>
<b>PUNTO MIN</b>	<b>1.240</b>	<b>-0.380</b>	<b>0.320</b>	<b>1.350</b>	<b>-0.420</b>	<b>0.370</b>	<b>1.750</b>	<b>-0.530</b>	<b>0.820</b>
<b>LS</b>	<b>1.278</b>	<b>-0.333</b>	<b>0.361</b>	<b>1.401</b>	<b>-0.381</b>	<b>0.406</b>	<b>1.800</b>	<b>-0.502</b>	<b>0.852</b>
<b>LI</b>	<b>1.254</b>	<b>-0.365</b>	<b>0.331</b>	<b>1.361</b>	<b>-0.405</b>	<b>0.380</b>	<b>1.760</b>	<b>-0.528</b>	<b>0.828</b>

Tabla III. Resultados y datos estadísticos de 30 a 40 minutos de abrasión

CORRIDA #	ABRASIÓN A 30 MIN.			ABRASIÓN A 35 MIN.			ABRASIÓN A 40 MIN.		
	DE CMC	DH CMC	DL	DE CMC	DH	DL	DE	DH	DL
1	1.82	-0.68	0.84	2.13	-0.95	1.3	2.85	-0.98	2.13
2	1.72	-0.65	0.91	2.25	-0.87	1.32	2.77	-1.03	2.04
3	1.69	-0.63	0.92	2.22	-0.98	1.25	2.78	-1.04	2.05
4	1.75	-0.58	0.84	2.15	-0.89	1.32	2.83	-0.96	2.04
5	1.8	-0.58	0.87	2.13	-0.87	1.3	2.84	-0.98	2.11
6	1.71	-0.59	0.88	2.2	-0.9	1.24	2.76	-1.05	2.06
7	1.7	-0.55	0.89	2.19	-0.92	1.24	2.78	-1.04	2.04
8	1.81	-0.65	0.84	2.25	-0.87	1.27	2.83	-0.98	2.02
9	1.75	-0.65	0.82	2.18	-0.95	1.24	2.83	-1.03	2.12
10	1.68	-0.58	0.86	2.22	-0.93	1.26	2.77	-0.99	2.13
<b>PROMEDIO</b>	<b>1.74</b>	<b>-0.61</b>	<b>0.87</b>	<b>2.19</b>	<b>-0.91</b>	<b>1.27</b>	<b>2.80</b>	<b>-1.01</b>	<b>2.07</b>
Desviación STD	0.05	0.04	0.03	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04
<b>COEFICIENTE VARIACIÓN</b>	<b>2.963</b>	<b>-7.003</b>	<b>3.808</b>	<b>2.108</b>	<b>-4.498</b>	<b>2.722</b>	<b>1.233</b>	<b>-3.401</b>	<b>1.970</b>
<b>PUNTO MAX</b>	<b>1.820</b>	<b>-0.550</b>	<b>0.920</b>	<b>2.250</b>	<b>-0.870</b>	<b>1.320</b>	<b>2.850</b>	<b>-0.960</b>	<b>2.130</b>
<b>PUNTO MIN</b>	<b>1.690</b>	<b>-0.680</b>	<b>0.820</b>	<b>2.130</b>	<b>-0.980</b>	<b>1.240</b>	<b>2.760</b>	<b>-1.050</b>	<b>2.020</b>
<b>LS</b>	<b>1.777</b>	<b>-0.586</b>	<b>0.889</b>	<b>2.221</b>	<b>-0.888</b>	<b>1.295</b>	<b>2.825</b>	<b>-0.987</b>	<b>2.099</b>
<b>LI</b>	<b>1.709</b>	<b>-0.642</b>	<b>0.845</b>	<b>2.163</b>	<b>-0.938</b>	<b>1.253</b>	<b>2.783</b>	<b>-1.029</b>	<b>2.049</b>

Tabla IV. Resultado y datos estadísticos de 45 a 55 minutos de abrasión

CORRIDA #	ABRASIÓN A 45 MIN.			ABRASIÓN A 50 MIN.			ABRASIÓN A 55 MIN.		
	DE CMC	DH CMC	DL	DE CMC	DH	DL	DE	DH	DL
1	3.05	-1.09	2.58	3.12	-1.1	2.3	3.57	-1.38	3.04
2	3.06	-1.07	2.51	3.05	-1.12	2.35	3.63	-1.26	3.03
3	3.12	-1.04	2.6	3.06	-1.13	2.4	3.56	-1.31	2.98
4	3.06	-1.08	2.52	3.14	-1.12	2.38	3.55	-1.26	2.92
5	2.97	-1.1	2.54	3.09	-1.08	2.34	3.57	-1.28	2.98
6	2.98	-1.08	2.53	3.01	-1.1	2.35	3.52	-1.33	2.99
7	3.05	-1.08	2.58	3.06	-1.1	2.3	3.56	-1.37	3.02
8	3.1	-1.07	2.51	3	-1.07	2.35	3.59	-1.29	3.05
9	3.1	-1.05	2.53	3.04	-1.08	2.35	3.53	-1.35	3.01
10	3.07	-1.1	2.52	3.05	-1.1	2.41	3.56	-1.31	3.02
<b>PROMEDIO</b>	<b>3.06</b>	<b>-1.08</b>	<b>2.54</b>	<b>3.06</b>	<b>-1.10</b>	<b>2.35</b>	<b>3.56</b>	<b>-1.31</b>	<b>3.00</b>
<b>Desviación STD</b>	<b>0.05</b>	<b>0.02</b>	<b>0.03</b>	<b>0.05</b>	<b>0.02</b>	<b>0.03</b>	<b>0.03</b>	<b>0.05</b>	<b>0.04</b>
<b>COEFICIENTE VARIACIÓN</b>	<b>1.597</b>	<b>-1.817</b>	<b>1.282</b>	<b>1.523</b>	<b>-1.874</b>	<b>1.377</b>	<b>0.910</b>	<b>-3.469</b>	<b>1.329</b>
<b>PUNTO MAX</b>	<b>3.120</b>	<b>-1.040</b>	<b>2.600</b>	<b>3.140</b>	<b>-1.070</b>	<b>2.400</b>	<b>3.630</b>	<b>-1.260</b>	<b>3.050</b>
<b>PUNTO MIN</b>	<b>2.970</b>	<b>-1.100</b>	<b>2.510</b>	<b>3.000</b>	<b>-1.130</b>	<b>2.300</b>	<b>3.520</b>	<b>-1.380</b>	<b>2.920</b>
<b>LS</b>	<b>3.088</b>	<b>-1.063</b>	<b>2.563</b>	<b>3.091</b>	<b>-1.087</b>	<b>2.373</b>	<b>3.584</b>	<b>-1.286</b>	<b>3.029</b>
<b>LI</b>	<b>3.024</b>	<b>-1.089</b>	<b>2.521</b>	<b>3.033</b>	<b>-1.113</b>	<b>2.333</b>	<b>3.544</b>	<b>-1.342</b>	<b>2.979</b>

Tabla V. Resultados de datos promedios por corrida con datos calculados de UCL/LCL y límites superior e inferior

TIEMPO (min)	VALORES PROMEDIO			PRECIO US\$
	DE CMC	DL	DH CMC	
0	0.86	-1.14	0.14	0.834
5	1.23	-0.49	0.15	0.876
10	0.91	0.06	-0.2	0.919
15	1.27	0.35	-0.35	0.961
20	1.38	0.39	-0.39	1.004
25	1.78	0.84	-0.52	1.046
30	1.74	0.87	-0.61	1.089
35	2.19	1.27	-0.91	1.131
40	2.8	2.07	-1.01	1.174
45	3.06	2.54	-1.08	1.216
50	3.06	2.35	-1.1	1.258
55	3.56	3	-1.31	1.301
<b>PROMEDIO</b>	<b>1.99</b>	<b>1.01</b>	<b>-0.60</b>	
<b>Desviación STD</b>	<b>0.93</b>	<b>1.28</b>	<b>0.49</b>	
<b>PUNTO MAX</b>	<b>3.560</b>	<b>3.000</b>	<b>0.150</b>	
<b>PUNTO MIN</b>	<b>0.860</b>	<b>-1.140</b>	<b>-1.310</b>	
<b>LS</b>	<b>2.593</b>	<b>1.843</b>	<b>-0.280</b>	
<b>LI</b>	<b>1.381</b>	<b>0.175</b>	<b>-0.919</b>	
<b>UCL</b>	<b>2.867</b>	<b>2.220</b>	<b>-0.135</b>	
<b>LCL</b>	<b>1.106</b>	<b>-0.202</b>	<b>-1.063</b>	

## Apéndice 2

### Sección De fórmulas correlacionadas

Tabla VI. **Variables espectrofotométricas y costo vs. tiempo**

Descripción	Fórmula	Coefficiente de correlación
DE CMC vs. tiempo	$DE\ CMC = 2E-09T^6 - 3E-07T^5 + 1E-05T^4 - 0.0002T^3 - 0.0003T^2 + 0.0351T + 0.9007$	0.9771
DH CMC vs. tiempo	$DH\ CMC = -6E-09T^6 + 1E-06T^5 - 6E-05T^4 + 0.0018T^3 - 0.0222T^2 + 0.0686T + 0.1473$	0.9958
DL vs. tiempo	$DL = 1E-08T^6 - 2E-06T^5 + 0.0001T^4 - 0.0026T^3 + 0.025T^2 + 0.0442x - 1.1242$	0.9906
costo US\$ vs. DE CMC	$Costo\ US\ \$ = 0.0434DE^6 - 0.6466DE^5 + 3.8452DE^4 - 11.592DE^3 + 18.467DE^2 - 14.36DE + 5.0790$	0.9868

### Apéndice 3

#### Seccion de variables espectrofotometricas evaluadas por UCL/LCL

Figura 16. Variable DE en método CMC

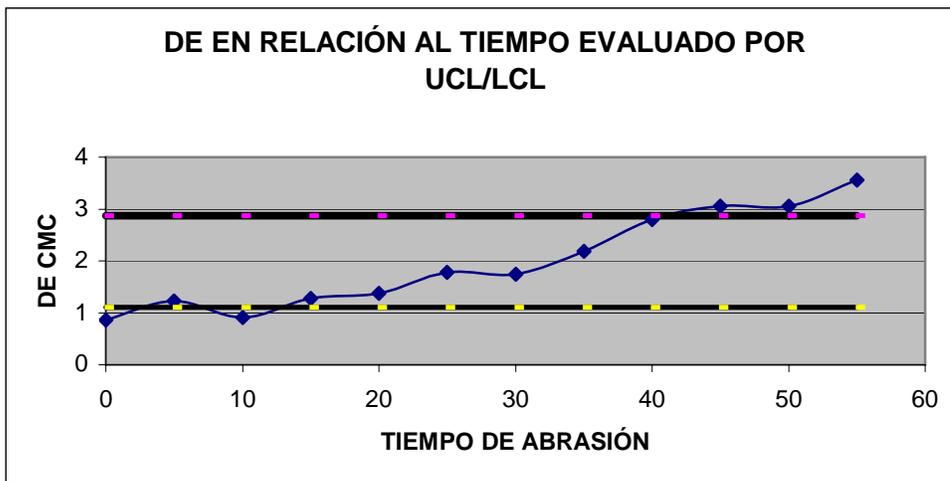


Figura 17. Variable DH en método CMC

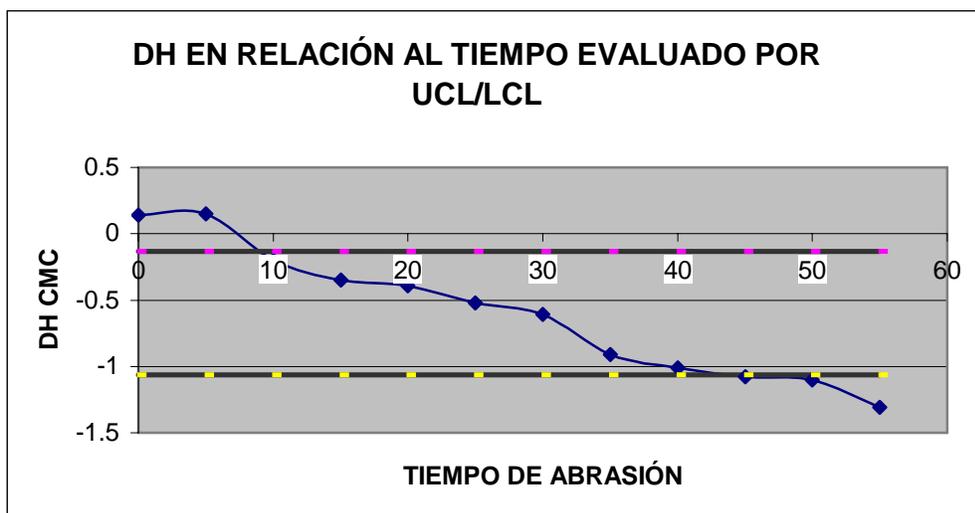


Figura 18. Variable DL en método CIELab

