



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

**DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PARA CONTROL DE PROCESO Y
AJUSTE DE HIPERPLANOS COLORIMÉTRICOS DE NATURALEZA DETERMINÍSTICA, EN
LA TINTURA DE TEJIDOS A BASE DE POLIÉSTER, CON TRICROMÍA DE COLORANTES
DISPERSOS EN TONOS GRISES**

Guido Renato Gini Cabrera

Asesorado por el Ing. Víctor Hugo Ramírez Hunter

Guatemala, mayo de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PARA CONTROL DE PROCESO Y
AJUSTE DE HIPERPLANOS COLORIMÉTRICOS DE NATURALEZA DETERMINÍSTICA, EN
LA TINTURA DE TEJIDOS A BASE DE POLIÉSTER, CON TRICROMÍA DE COLORANTES
DISPERSOS EN TONOS GRISES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

GUIDO RENATO GINI CABRERA

ASESORADO POR EL ING. VÍCTOR HUGO RAMÍREZ HUNTER

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MAYO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

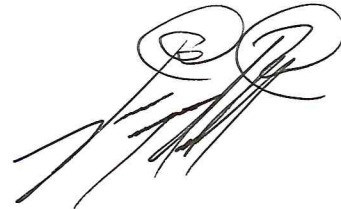
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. José Manuel Tay Oroxom
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortíz Castillo
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PARA CONTROL DE PROCESO Y AJUSTE DE HIPERPLANOS COLORIMÉTRICOS DE NATURALEZA DETERMINÍSTICA, EN LA TINTURA DE TEJIDOS A BASE DE POLIÉSTER, CON TRICROMÍA DE COLORANTES DISPERSOS EN TONOS GRISES

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 4 de noviembre de 2015.

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, overlapping loops and lines, positioned above the printed name.

Guido Renato Gini Cabrera



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 25 de agosto de 2016

Ingeniero

Carlos Salvador Wong Davi

Director Escuela de Ingeniería Química

Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos de Guatemala

Presente

Ingeniero Wong:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y dado mi aprobación del informe final titulado "DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILISTICO PARA CONTROL DE PROCESO, Y AJUSTE DE HIPERPLANOS COLORIMÉTRICOS DE NATURALEZA DETERMINISTICA, EN LA TINTURA DE TEJIDOS A BASE DE POLIESTER, CON TRICROMIA DE COLORANTES DISPERSOS EN TONOS GRISES", del estudiante de Ingeniería Química Guido Renato Gini Cabrera quien se identifica con el carné número 2007-14440.

Sin otro particular, me suscribo a usted.

Atentamente,

Ing. Qco. Víctor Hugo Ramírez Hunter

Asesor

VICTOR HUGO RAMIREZ HUNTER
INGENIERO QUIMICO
COLEGIADO No. 1578



Guatemala, 24 de octubre de 2016.
Ref. EIQ.TG-IF.064.2016.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **072-2015** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Guido Renato Gini Cabrera**.
Identificado con número de carné: **2007-14440**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILISTICO PARA CONTROL DE PROCESO, Y AJUSTE DE HIPERPLANOS COLORIMÉTRICOS DE NATURALEZA DETERMINÍSTICA, EN LA TINTURA DE TEJIDOS A BASE DE POLIESTER, CON TRICROMIA DE COLORANTES DISPERSOS EN TONOS GRISES

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Víctor Hugo Ramírez Hunter**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Licda. Ingrid Lorena Benítez Pacheco
COORDINADORA DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.023.2017

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **GUIDO RENATO GINI CABRERA** titulado: **“DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PARA CONTROL DE PROCESO Y AJUSTE DE HIPERPLANOS COLORIMÉTRICOS DE NATURALEZA DETERMINÍSTICA, EN LA TINTURA DE TEJIDOS A BASE DE POLIÉSTER, CON TRICROMÍA DE COLORANTES DISPERSOS EN TONOS GRISES”**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

“Id y Enseñad a Todos”

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, mayo 2017

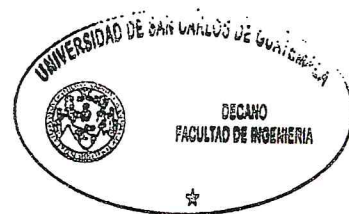
Cc: Archivo
CSWD/ale



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PARA CONTROL DEL PROCESO Y AJUSTE DE HIPERPLANOS COLORIMÉTRICOS DE NATURALEZA DETERMINÍSTICA, EN LA TINTURA DE TEJIDOS A BASE DE POLIÉSTER, CON TRICROMÍA DE COLORANTES DISPERSOS EN TONOS GRISES**, presentado por el estudiante universitario: **Guido Renato Gini Cabrera**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, mayo de 2017

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Creador y conservador de todo y todos.
Jesús	Fiel acompañante en cada etapa de mi vida.
Virgen María	Buena madre y recurso ordinario de todo marista.
Mis padres	Aldo Gini y Lucrecia Cabrera, por su amor, consejo y apoyo incondicional, piezas fundamentales del logro concretado.
Mi abuela	Martha Morataya, por su cariño y atenciones en todo momento.
Mi hermano	Marco Robles, por su apoyo incondicional y sabios consejos.
Toda mi familia	Por la confianza y el apoyo que me han otorgado a lo largo de toda mi formación académica, desde pequeño.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala *Alma Mater Studiorum*, academia por excelencia.

Facultad de Ingeniería Por ser la fuente de conocimiento técnico y científico que me nutrió y marco el rumbo de mi vida académica, laboral e investigativa.

Colegas Por la amistad y apoyo mutuo compartido a lo largo de estos años en la carrera.

Amigos Por su amistad, lealtad y confianza en todo momento.

Ing. Víctor Ramírez Por su amistad y asesoramiento en este trabajo de graduación.

Ing. Renato Lira Por la confianza y apoyo recibido para la elaboración de este trabajo de graduación.

República de Guatemala Patria que me vio nacer, a la cual serviré siempre incondicionalmente.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Industria textil	5
2.1.1. Definición	5
2.1.2. Fibras de origen natural	6
2.1.2.1. Fibras de origen animal	7
2.1.2.1.1. Lana.....	7
2.1.2.1.2. Lana de alpaca	7
2.1.2.1.3. Lana de angora	8
2.1.2.1.4. Seda	9
2.1.2.2. Fibras de origen vegetal	9
2.1.2.2.1. Algodón	10
2.1.2.2.2. Lino.....	10
2.1.2.2.3. Cáñamo.....	11
2.1.3. Fibras sintéticas	12
2.1.3.1. Fibra de poliamida	12
2.1.3.2. Fibra de poliéster	13

	2.1.3.3.	Fibra acrílica.....	14
	2.1.3.4.	Fibra de elastano	14
2.2.		Química de la fibra de poliéster	15
	2.2.1.	Ésteres.....	15
	2.2.2.	Obtención de poliéster	16
	2.2.2.1.	Reacción de polimerización	16
	2.2.2.2.	Cristalización.....	18
	2.2.2.3.	Propiedades y características	18
		2.2.2.3.1. Propiedades físicas.....	19
		2.2.2.3.2. Propiedades químicas.....	20
2.3.		Influencia del pH en los procesos húmedos textiles	21
	2.3.1.	Conceptos básicos.....	21
	2.3.2.	Preparación húmeda.....	25
	2.3.3.	Aspectos iniciales sobre la tintura de las fibras textiles.....	29
	2.3.3.1.	Requisitos para el teñido.....	29
	2.3.3.2.	Cinética de la tintura.....	30
	2.3.3.3.	Unión química	31
	2.3.3.4.	Colorantes directos	32
	2.3.3.5.	Colorantes ácidos	33
	2.3.3.6.	Colorantes dispersos.....	34
	2.3.3.7.	Colorantes reactivos.....	34
	2.3.3.8.	Colorantes catiónicos.....	36
	2.3.3.9.	Acabado	37
2.4.		Tintura de fibras de poliéster	38
	2.4.1.	Generalidades.....	38
	2.4.2.	Características de los colorantes dispersos.....	39
	2.4.3.	Efectos negativos durante la tintura.....	41
	2.4.4.	La fibra de poliéster texturizada	42

2.4.5.	El efecto de barrado	43
2.4.6.	Lavado del material	45
2.4.7.	Proceso de tintura general a alta temperatura	45
2.4.8.	Colorante para tintura de poliéster	47
2.4.9.	Lavado de tinturas.....	48
2.4.10.	Consideraciones sobre las solideces de los colorantes.....	49
2.5.	Teoría del color	51
2.5.1.	Color.....	51
2.5.2.	Colorimetría.....	51
2.5.2.1.	Sensación visual del color	53
2.5.2.1.1.	Tonalidad cromática	53
2.5.2.1.2.	Saturación o pureza	53
2.5.2.1.3.	Claridad	54
2.5.2.2.	Metamerismo.....	54
2.5.2.3.	Espacio colorimétrico CIELAB.....	54
2.5.2.3.1.	Tolerancia.....	56
2.5.2.3.2.	Modo L* a* b*	57
2.5.2.3.3.	Modo L* C* h*.....	59
2.5.2.3.4.	Sistema CMC	61
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	63
3.1.	Definición de las variables en el proceso de tintura	63
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	64
3.2.1.	Tratamiento de materia prima	65
3.2.2.	Procedimiento experimental	65
3.2.3.	Preparación del baño de tintura	65
3.2.4.	Proceso de tinción.....	66
3.2.5.	Lavado de muestras.....	66

3.2.6.	Secado de muestras	67
3.2.7.	Lectura de muestras	67
3.2.8.	Operaciones unitarias en el proceso.....	67
3.2.9.	Manejo de productos y residuos	68
3.3.	Recursos humanos disponibles	68
3.4.	Recursos físicos y materiales disponibles	69
3.4.1.	Recursos físicos disponibles.....	69
3.4.2.	Recursos materiales disponibles	69
3.4.2.1.	Materia prima	69
3.4.2.2.	Reactivos	70
3.4.2.3.	Cristalería.....	70
3.4.2.4.	Equipo.....	70
3.4.2.5.	Otros materiales.....	71
3.5.	Técnica cuantitativa y cualitativa	71
3.5.1.	Diseño experimental general	72
3.5.2.	Análisis del diseño experimental.....	73
3.5.3.	Métodos y modelos de los datos según tipo de variables.....	73
3.5.3.1.	Peso de la muestra	73
3.5.3.2.	Concentración de ácido	74
3.5.3.3.	Acidez	74
3.5.3.4.	Temperatura	75
3.5.3.5.	Duración.....	75
3.5.3.6.	Gradiente	75
3.5.3.7.	Tiempo de secado	76
3.5.3.8.	Variables CIELAB	76
3.5.3.9.	Aceptabilidad	77
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	77
3.7.	Tabulación y procesamiento de la información	80

3.7.1.	Microsoft Office Excel 2013.....	80
3.7.2.	Micro Software QMS Eviews 9.....	80
3.7.3.	StataCorp Stata 12.....	81
3.8.	Análisis estadístico.....	81
3.8.1.	Análisis de autocorrelación	82
3.8.2.	Distribución de los datos	83
3.8.3.	Refutación de un proceso martingala.....	84
3.8.4.	Estimación por mínimos cuadrados (MCO).....	84
3.8.5.	Análisis de heterocedasticidad en los residuos.....	85
3.8.6.	Análisis de normalidad en los residuos	86
3.8.7.	Modelo probit de respuesta cualitativa binaria	87
3.8.8.	Estimación por máxima verosimilitud	89
3.8.9.	Efectos parciales y criterios de aceptabilidad.....	90
4.	RESULTADOS	91
4.1.	Preparación de las muestras de tintura.....	91
4.2.	Determinación de los parámetros CIELAB.....	96
4.3.	Hiperplanos colorimétricos determinísticos	101
4.4.	Modelo probabilístico probit	105
4.5.	Efectos parciales, óptimos y sensibilidad de las variables	112
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	115
	CONCLUSIONES	123
	RECOMENDACIONES.....	125
	BIBLIOGRAFÍA.....	127
	APÉNDICES	133

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Alfombra de lana	7
2.	Lana de alpaca.....	8
3.	Lana de angora	8
4.	Fibra de seda	9
5.	Fibra de algodón	10
6.	Fibra de lino	11
7.	Fibra de cáñamo	12
8.	Molécula de un éster	16
9.	Reacción por esterificación de Fisher	16
10.	Esferulita polimérica cristalina	19
11.	Escala de pH.....	21
12.	Efecto del pH en fibras textiles.....	25
13.	Sistema CIELAB en coordenadas cartesianas.....	55
14.	Sistema CIELAB en coordenadas polares	56
15.	Diferencias en modo $L^* a^* b^*$	57
16.	Tolerancias en modo $L^* a^* b^*$	57
17.	Modo $L^* C^* h^*$ en coordenadas polares	60
18.	Otra representación del modo $L^* C^* h^*$	60
19.	Aceptabilidad CMC.....	62
20.	Colorantes dispersos en solución concentrada.....	66
21.	Diagrama de flujo del experimento.....	72
22.	Correlograma	83
23.	Diagrama de dispersión	85

24.	Hiperplano del componente rojo-verde (ΔA)	101
25.	Hiperplano del componente amarillo-azul (ΔB)	102
26.	Hiperplano del componente cromasaturación (ΔC)	103
27.	Hiperplano del componente de claridad (ΔL)	104
28.	Probabilidad de aceptación variando pH y temperatura	106
29.	Probabilidad de aceptación variando pH y tiempo	107
30.	Probabilidad de aceptación variando pH y gradiente	108
31.	Probabilidad de aceptación variando temperatura y tiempo	109
32.	Probabilidad de aceptación variando temperatura y gradiente	110
33.	Probabilidad de aceptación variando tiempo y gradiente.....	111

TABLAS

I.	Variables para el desarrollo del modelo	63
II.	Variables manipuladas.....	64
III.	Variables de las propiedades y características	64
IV.	Variables de las propiedades y características cuantitativas	71
V.	Concentración de colorantes en el baño de tintura.....	78
VI.	Ácido acético glacial para ajuste de pH en el baño de tintura.....	78
VII.	Duración del proceso	78
VIII.	Temperatura en estado estable	79
IX.	Gradiente de temperatura	79
X.	Formato para la recolección de la información CIELAB	79
XI.	Presentación de los parámetros CIELAB.....	80
XII.	Concentración de colorantes en el baño.....	91
XIII.	Grupo No.1 Variación de pH.....	92
XIV.	Grupo No.2 Variación de temperatura	93
XV.	Grupo No.3 Variación de la duración	94
XVI.	Grupo No.4 Variación del gradiente.....	95

XVII.	Lectura del espectrofotómetro para la muestra estandarizada	96
XVIII.	Parámetros CIELAB de la muestra estandarizada	96
XIX.	Parámetros CIELAB Grupo No. 1	97
XX.	Parámetros CIELAB Grupo No. 2	98
XXI.	Parámetros CIELAB Grupo No. 3	99
XXII.	Parámetros CIELAB Grupo No. 4	100
XXIII.	Ajuste para el componente rojo-verde (ΔA).....	101
XXIV.	Ajuste para el componente amarillo-azul (ΔB)	102
XXV.	Ajuste para el componente croma-saturación (ΔC).....	103
XXVI.	Ajuste para el componente de claridad (ΔL).....	104
XXVII.	Estimación de los regresores	105
XXVIII.	Resultado del modelo	105
XXIX.	Modelo variando pH y temperatura	106
XXX.	Modelo probabilístico variando pH y tiempo.....	107
XXXI.	Modelo probabilístico variando pH y gradiente	108
XXXII.	Modelo probabilístico variando temperatura y tiempo.....	109
XXXIII.	Modelo probabilístico variando temperatura y gradiente.....	110
XXXIV.	Modelo probabilístico variando tiempo y gradiente	111
XXXV.	Efectos parciales marginales	112
XXXVI.	Valores teóricos óptimos	112
XXXVII.	Sensibilidad de las variables exógenas	113

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
R	Coeficiente de correlación
R²	Coeficiente de determinación
ΔA	Componente cromático rojo-verde
ΔB	Componente cromático amarillo-azul
C	Concentración
K_a	Constante de disociación ácida
Cov	Covarianza
σ	Desviación estándar
Δ	Diferencia
ΔL	Diferencia en la claridad
ΔC	Diferencia en la croma
ΔE	Diferencia total de color
~	Distribuye
E	Esperanza
°C	Grado celsius

∇T	Gradiente de temperatura
g	Gramo
\int	Integral
L	Litro
λ	Longitud de onda
mL	Mililitro
MCO	Mínimos cuadrados ordinarios
min	Minuto
nm	Nanómetro
N	Normal
u_i	Perturbaciones
%	Porcentaje
pH	Potencial de hidrógeno
P_{accept}	Probabilidad de aceptación
Mp	Proceso de martingala
s	Segundos
T	Temperatura
t	Tiempo

GLOSARIO

Auxiliar de tintura	Productos químicos que ayudan a la migración y fijación del colorante en la fibra; en este caso ácido acético, avolan ® y ablev®.
Colorante disperso	Colorante no polar e insoluble en agua utilizado para la tinción de fibra de poliéster.
Coralene	Variedad de colorantes dispersos de alta energía.
Duración	Tiempo en el cual se lleva a cabo el proceso de tintura a una temperatura determinada.
Espectrofotómetro	Instrumento utilizado para la determinación cuantitativa de parámetros como intensidad, componente rojo, amarillo y azul en fibras teñidas.
Fibra textil	Filamentos que se hilan o trenzan y se entretajan para formar paños o telas.
Interlock	Tejido de punto a base de poliéster bastante armado ideal para prendas de vestir.
Poliéster	Material termoplástico obtenido de la polimerización del estireno muy resistente a la humedad, agentes químicos y esfuerzo mecánico.

Probit	En estadística, un modelo probit es un tipo de regresión en cual, la variable dependiente puede tomar valores entre cero y uno exclusivamente; su propósito general es estimar las probabilidades de que una observación entre o no en una categoría con características específicas.
Tintura	Proceso mediante el cual se agrega color a fibras textiles.
Tricromía	Mezcla de tres colorantes en distintas proporciones para el proceso de tintura.

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se llevó a cabo el desarrollo de un modelo probabilístico para control de proceso y ajuste de hiperplanos colorimétricos, en la tintura de tejidos a base de fibra de poliéster. Al no contar con un colorante disperso de fábrica en este tono se utilizó una tricromía coralene a base de rojo, amarillo y azul en proporciones previamente establecidas y estandarizadas para dar como resultado el tono gris (*grey flannel*) junto a los respectivos auxiliares de tintura.

Se realizaron 100 corridas a nivel laboratorio simulando enteramente el proceso de tinción en planta. Cada muestra estuvo conformada por un pequeño trozo de tela y el baño de tinción respectivo. En dichas corridas se varió el pH de la mezcla y las condiciones de proceso tales como duración, temperatura y gradiente de calor; cuatro parámetros a analizar en total. La manipulación del nivel de acidez se logró variando la cantidad de ácido acético para cada muestra mientras que para las tres condiciones fue necesario reprogramar la máquina teñidora según cada caso.

Al finalizar todas las tinturas, cada muestra de tela seca terminada fue objeto de estudio a través del espectrofotómetro analizando variables como el componente rojo-verde, componente amarillo-azul, croma saturación y claridad; todas estas comparadas con los datos de una muestra estandarizada. Los datos obtenidos se utilizaron para modelar la tricromía de colorantes en la fibra bajo las distintas condiciones sometidas a través de hiperplanos colorimétricos y, finalmente, desarrollando un modelo probit para la obtención de valores probabilísticos de aceptación, efectos parciales y valores óptimos.

OBJETIVOS

General

Desarrollar un modelo probabilístico para control de proceso y ajustar hiperplanos colorimétricos en la tintura de tejidos a base de poliéster con tricromía de colorantes dispersos en tonos grises.

Específicos

1. Preparar 100 muestras de tintura a nivel laboratorio divididas en 4 grupos de 25 cada uno utilizando la metodología descrita en el marco teórico, modificando los parámetros de estabilización de los colorantes dispersos.
2. Determinar los parámetros CIELAB de una muestra estandarizada y de cada una de las muestras terminadas por medio del espectrofotómetro.
3. Ajustar los hiperplanos colorimétricos de la tricromía de colorantes dispersos.
4. Desarrollar un modelo probabilístico probit de respuesta cualitativa utilizando la información experimental de las condiciones de proceso.
5. Determinar los efectos parciales, valores óptimos teóricos y sensibilidad de las variables exógenas.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación, trata de desarrollar un modelo probabilístico para control de proceso y ajustar hiperplanos colorimétricos en la tintura de tejidos a base de poliéster con colorantes dispersos.

Los procesos tintoreros industriales son, en su mayoría empíricos, es decir, un maestro tintorero manipula las variables principales dependiendo de las necesidades del color que requiera y el equipo que tenga a su disposición. Existen muy pocas fuentes bibliográficas netamente teóricas sobre el tema que den una guía clara sobre un procedimiento estándar por seguir, ya que es una operación industrial en donde participan muchas variables y puede variar considerablemente de empresa a empresa.

Debido a esta causa, durante los últimos años se han llevado numerosos estudios de repetitividad y reproducibilidad en los procesos tintóreos con resultados bastante positivos. Ahora bien, no se han desarrollado investigaciones que contemplen el efecto de los colorantes “tintes” en diferentes condiciones ya que normalmente las empresas prefieren cambiar de marca comercial para obtener los resultados esperados que invertir en investigación en un tipo de tinte específico.

Los colorantes en estado sólido poseen ciertas propiedades fisicoquímicas que los hacen vulnerables a las condiciones de almacenamiento; por ejemplo, en condiciones de mucha humedad pueden estropearse fácilmente al ser estos higroscópicos.

La presente investigación pretende fortalecer nacionalmente este campo de estudio, debido a la problemática que afronta esta industria que muchas veces representa desperdicios y contaminación excesiva por medio de los efluentes. Por otra parte, el estudio trata de profundizar la indagación desde la perspectiva del ámbito tecnológico, con la idea de no “estancarse” en lo aprendido, sino experimentar y desarrollar nuevos métodos en los cuales se aproveche al máximo los recursos y al mismo tiempo evitando los impactos negativos descritos arriba.

Con el fin de lograr el objetivo general, se realizarán pruebas de tinción a nivel laboratorio siguiendo la misma línea del proceso a nivel planta, posteriormente, analizar por medio de un espectrofotómetro textil si el color obtenido en la tela llena todos los requisitos de calidad cromática; es decir, si el color se asemeja a un estándar.

1. ANTECEDENTES

Desde la antigüedad, las civilizaciones han utilizado prendas de vestir por la necesidad de protegerse; estas vestiduras inicialmente consistieron en pieles, cueros, hojas o pasturas, envueltas o atadas alrededor del cuerpo como protección de los elementos de la naturaleza. Poseían los colores y la textura del animal del cual provenían. Paulatinamente, con el paso del tiempo estas han sufrido numerosas transformaciones que en la mayoría de los casos han sido debidas al descubrimiento de nuevos tejidos y materiales. El campo de las fibras textiles ha sido ampliamente estudiado por lo cual no forma parte medular en la presente investigación.

En mayo de 2005 se presentó la tesis de grado en ingeniera química de la Universidad de San Carlos de Guatemala titulada *Determinación de tricromías para teñir poliéster basándose en las curvas de agotamiento de colorantes dispersos*; autora: Gabriela Arriaga. En este informe se expone el comportamiento de una tricromía de colorantes dispersos basándose en el agotamiento y los niveles de energía de cada uno a la hora de teñir las fibras, encontrando puntos críticos, tanto de temperatura como de tiempo en los cuales se da la migración del colorante en solución hacia el tejido.

Por muchos años, mundialmente, se ha estado investigando la optimización de los procesos tintóreos de fibras textiles, ya que se ha encontrado una considerable toxicidad en sus desechos; por lo que se ha tratado de disminuir el impacto ambiental al reducir el desperdicio de materias primas y también reducir el tiempo de proceso.

Colombia, octubre de 2004, en la Universidad de EAFIT se presentó una tesis titulada *Estudio de disminución de tiempos de procesamiento en la tintura de algodón con colorantes reactivos en tonos oscuros*; autora: Juliana Hincapié Uribe. En esta investigación se destaca la importancia de ciertas variables en los procesos tintóreos como lo es el pH, la temperatura y los tiempos de teñido. Se llega a la conclusión que el pH óptimo para teñir algodón debe ser forzosamente alcalino; que la temperatura no debe superar jamás los 90° y que el tiempo debe estar entre 35 a 45 minutos máximo. También expone resultados sobre el efecto de la dureza y el nivel de electrolitos en la etapa mecánica del proceso ya que suelen ser cruciales para la buena migración y, por ende, una buena uniformidad en el color final de la tela.

España, mayo de 1985, la escuela de ingenieros industriales de Tarrasa presentó una investigación titulada *Estudio de la migración de los colorantes dispersos desde la fibra de poliéster hacia la fibra de lana en diferentes condiciones tintóreas*, realizado por el Dr. Ing. José Cegarra, Dr. en Ciencias Químicas Publio Puente y Dr. Ing. José Carbonel. Esta investigación tuvo como resultados principales el comportamiento del colorante disperso en la superficie de la fibra natural; en este caso el algodón, está sujeto de manera mecánica únicamente y su remoción se logra fácilmente con acetona u otro solvente orgánico de características similares. Por otro lado, también se concluyó que la migración del colorante disperso desde el poliéster hacia la lana es importante cuando el primero fue teñido a una temperatura de no más de 100°C. Una última conclusión también sugiere que la relación de baño concentración inicial tiene muy poca importancia a la hora de la migración del colorante disperso.

Ecuador, agosto de 2001, en la Universidad Tecnológica Equinoccial se publicó la tesis: *Estampación con colorantes reactivos y dispersos sobre tejido de poliéster y algodón*, autora: Verónica Carillo Moya, director: Ing. Raúl Galeano.

Los resultados de esta investigación concluyen en condiciones fisicoquímicas óptimas de estampado, en específico, niveles de pH que oscilan entre 2 y 9 cuando se realiza con colorantes dispersos. También enfatiza en la dificultad del proceso para lograr una solidez aceptable y que ahora únicamente se emplea para prendas muy finas y delicadas. Finalmente, concluye que el método más ampliamente utilizado en la actualidad para realizar un estampado en la industria textil es la aplicación de pigmentos en lugar de colorantes dispersos.

Carolina del Norte Estados Unidos, octubre de 2009, el Instituto de tecnología textil publicó el estudio con nombre *Efectos de la concentración de colorante y proporciones de colorantes en combinación sobre el agotamiento de colorantes dispersos*, autor: Samuel Graham. Este estudio explica como la concentración y la cantidad de cada colorante en una tricromía pueden afectar considerablemente el agotamiento sobre fibras de poliéster. Su principal conclusión es que a medida que la concentración aumenta, el agotamiento disminuye. También se concluye que la técnica de transmisión a la solución es más efectiva que los métodos convencionales de tinción.

Actualmente, en Guatemala se encuentran en planificación varios proyectos sobre el estudio de las curvas de proceso y agotamiento en la tintura de fibras de poliéster con la finalidad de minimizar el impacto ambiental por desechos y, además, para aumentar la productividad y calidad de sus productos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Industria textil

2.1.1. Definición

Es el conjunto de actividades económicas relacionadas con la producción de fibras, hilos, telas y vestidos. La industria textilera es el más típico exponente de una producción ligera y maniobrera orientada al consumo; dos ramas la constituyen: la de fibra natural, de origen animal o vegetal y la química que comprende toda la gama de fibras sintéticas.

La producción textil es pionera de la revolución industrial, desarrollándose las fibras artificiales al finalizar el siglo XIX, creciendo muy rápidamente a partir de entonces y planteando una fuerte competencia con las fibras tradicionales. Esta evolución ha convertido al sector en algo muy complejo técnica y económicamente, conviviendo situaciones de crisis y expansión.

Así pues, la industria textil tiene un peso muy importante en la economía mundial, pues los vestidos son bienes de primera necesidad y de consumo masivo como el alimento, pero también pueden ser bienes de lujo de alto valor agregado.

Finalmente, la producción textil moderna requiere de alta inversión en maquinaria y automatización, personal calificado e información sobre mercados y modas, para mejorar su rendimiento, calidad y expansión.

2.1.2. Fibras de origen natural

Las fibras naturales son sustancias muy alargadas producidas por plantas y animales, que se pueden hilar para obtener hebras, hilos o cordelería. En tejidos, en géneros de punto, en esteras o unidas, forman telas esenciales para la sociedad.

Como la agricultura, los textiles han sido parte fundamental de la vida humana desde los albores de la civilización. En México y en Pakistán se han encontrado vestigios de artículos de algodón de 5 000 a C. Según la tradición china, la historia de la seda se inicia en el siglo XVII a C. El tejido de lana más antiguo, descubierto en Dinamarca, data de 1 500 a C, y el tapete de lana más antiguo, de Siberia, es del año 500 a C. Fibras como el yute y el bonote se cultiva desde la antigüedad.

Si bien desde entonces han evolucionado mucho los métodos para fabricar textiles, sus funciones han cambiado muy poco: hoy, casi todas las fibras naturales se usan para la fabricación de vestido y contenedores, así como para aislar, suavizar y decorar los ambientes donde vivimos. Sin embargo, los textiles tradicionales se usan también cada vez más con propósitos industriales: como elementos de materiales compuestos, en implantes médicos y en geo textiles y agro textiles.

Entre las fibras naturales, el algodón predomina en la producción mundial, hasta otras, algunas especiales como la cachemira que si bien se produce en cantidades mucho más pequeñas y únicamente en algunos países, tiene propiedades específicas que la sitúan en el mercado de los textiles de lujo.

2.1.2.1. Fibras de origen animal

Las fibras de origen animal son de lana, pelo y secreciones, como la seda.

2.1.2.1.1. Lana

La lana tiene un ondulado natural y patrones de escala que la hacen fácil de hilar. Las telas hechas de lana tienen mayor grosor que otros textiles, proveen mejor aislamiento y son resistentes, elásticas y durables. El diámetro de la fibra está entre las 16 micras en la lana superfina del merino (similar a la cachemira) a más de 40 micras en lanas de pelos bastos.

Figura 1. **Alfombra de lana**



Fuente: www.naturalfibres2009.org. Consulta: 6 de febrero de 2013.

2.1.2.1.2. Lana de alpaca

La fibra de alpaca es parcialmente hueca, de 20 a 70 micras en diámetro y viene en 22 colores naturales. Es ligera, más fuerte que la lana de oveja y provee excelente aislamiento. Las alpacas Huacayo producen fibras suaves, densas y cortas, mientras que el vellón de la raza suri es brillante, sedoso y liso. La alpaca se mezcla bien con la lana, el mohair y la seda.

Figura 2. **Lana de alpaca**



Fuente: www.naturalfibres2009.org. Consulta: 6 de febrero de 2013.

2.1.2.1.3. Lana de angora

El sedoso pelo blanco del angora es una fibra hueca clasificada como lana. Con un diámetro de 14 a 16 micras, es una de las fibras animales más sedosas. La lana de angora es muy suave al tacto, gracias al bajo relieve de su escala de cutícula. Los pelos son ligeros, absorben bien el agua y secan fácilmente. La lana Premium es tomada de la espalda y de los lados superiores del conejo.

Figura 3. **Lana de angora**



Fuente: www.naturalfibres2009.org. Consulta: 6 de febrero de 2013.

2.1.2.1.4. Seda

La seda es producida por el gusano de seda, *Bombyx mori*. Este gusano come hojas de morera, produce seda líquida que se endurece en filamentos para formar su capullo. Los filamentos sencillos se entrelazan en uno solo. Un filamento de seda es un hilo continuo de gran fuerza tensora que mide entre 500 y 1 500 metros de longitud, con un diámetro de 10 a 13 micras. En la seda tejida, la estructura triangular de la fibra actúa como un prisma que refracta la luz, dando al paño de seda su altamente estimado "brillo natural". Tiene buena absorción, baja conductividad y tiñe fácilmente.

Figura 4. **Fibra de seda**



Fuente: www.naturalfibres2009.org. Consulta: 6 de febrero de 2013.

2.1.2.2. Fibras de origen vegetal

Entre las fibras de origen vegetal están las que se extraen de la vellosoidad de algunas semillas, como el algodón; de los tallos (o líber), como el lino y el cáñamo; fibras de follajes, como el sisal; y fibras de cáscaras, como las de coco.

2.1.2.2.1. Algodón

La fibra de algodón crece de la semilla de una variedad de plantas del género *Gossypium*. De las cuatro especies de algodón cultivadas para fibra, la más importante es la *G. hirsutum*, que es originaria de México y produce el 90 % del algodón mundial. El algodón es casi celulosa pura, con suavidad y permeabilidad al aire que lo han hecho la fibra natural más popular del mundo. El largo de la fibra varía de 10 a 65 milímetros y el diámetro de 1 a 22 micras.

Figura 5. **Fibra de algodón**



Fuente: www.naturalfibres2009.org. Consulta: febrero de 2013.

2.1.2.2.2. Lino

Las fibras de lino obtenidas de los vástagos de la planta *Linum usitatissimum* son usadas principalmente para hacer tela de lino. La planta ha sido usada para la producción de fibra desde épocas prehistóricas. Crece mejor en las latitudes templadas del norte, en donde los veranos húmedos moderados producen lino fino y fuerte pero sedoso. Como el algodón, la fibra de lino es un polímero de celulosa, pero su estructura es más cristalina haciéndola más fuerte, rizada y rígida para manejar, y más fácilmente arrugable. El rango de las fibras

de lino en longitud es de hasta 90 cm y de un promedio de 12 a 16 micras de diámetro.

Figura 6. **Fibra de lino**



Fuente: www.naturalfibres2009.org. Consulta: 6 de febrero de 2013.

2.1.2.2.3. Cáñamo

La fibra de cáñamo se obtiene del líber de la planta *Cannabis sativa L.* Esta crece fácilmente - hasta una altura de 4 metros - sin agroquímicos y captura grandes cantidades de carbón. La producción de cáñamo está restringida en algunos países, en donde la planta se confunde con la marihuana. Largas, fuertes y durables, las fibras de cáñamo son cerca del 70 % de celulosa y contienen bajos niveles de lignina (alrededor de 8 a 10 %). El diámetro de la fibra está entre 16 y 50 micras. La fibra de cáñamo conduce el calor, tiñe bien, resiste el moho, bloquea la luz ultravioleta y tiene propiedades naturales antibacterianas.

Figura 7. **Fibra de cáñamo**



Fuente: www.naturalfibres2009.org. Consulta: 6 de febrero de 2013.

2.1.3. Fibras sintéticas

Las fibras sintéticas son filamentos continuos de polímeros termoplásticos de alto peso molecular obtenidos por procesos de síntesis química a partir de productos producidos en la industria petroquímica. A diferencia de las regeneradas, estas fibras no se recuperan de un producto original, sino que se las fabrican de uno nuevo. Ambas constituyen el grupo de las fibras artificiales.

Dependiendo de la naturaleza química del monómero, o producto inicial, se obtiene una diversidad de polímeros útiles para uso textil, que se pueden clasificar en dos grupos principales: polímeros por poli-condensación y polímeros por poli-adición. El primer grupo lo constituyen las fibras de poliéster y poliamida mientras que el segundo, las fibras acrílicas y de elastano.

2.1.3.1. Fibra de poliamida

La investigación y desarrollo sobre la obtención de una fibra de poliamida, se remonta a las primeras décadas de 1900. El descubridor de la primera de ellas fue Wallace Hume Carothers en 1935, patentado en 1938 bajo el nombre

comercial Nylon (DuPont). Se obtuvo por el método de condensación del ácido hexanodioico con hexametilendiamina.

La cantidad de átomos de carbono en las cadenas de la amina y del ácido se indican detrás de las iniciales de poliamida, en este caso es PA 6.6. Una excepción a los polímeros de poli condensación que conforman este grupo, la constituye otra poliamida: PA 6, que es obtenida por poli adición, a partir de caprolactama, descubierta por Paul Schlack in 1938, comercializada recién en 1952, con la marca registrada Perlon (Bayer).

Estas fibras son muy resistentes y elásticas; no son atacadas por insectos o putrefacción. Tienen el inconveniente de deformarse con el calor. A veces producen alergias a pieles sensibles. Se usan para equipos deportivos y trajes de baño, mezclada con elastanos.

2.1.3.2. Fibra de poliéster

Desde la primera década del siglo XX, comenzaron las investigaciones para la obtención de una fibra sintética de poliéster, pero recién en 1945 se patenta una fibra sintética de poli (etilentereftalato) (PET) y comienza diez años más tarde la producción industrial a partir de etilén glicol y dimetil tereftalato por transesterificación, bajo el nombre comercial de Terylene (ICI). Años después se comercializa la segunda fibra comercial bajo el nombre de Dacron (DuPont).

La evolución hacia otros polímeros poliestéricos ha sido lenta y con resultados acotados. Así surgió la poli (1,4-cicloexadimetilentereftalato) (Eastman, 1958) y más recientemente poli (butilentereftalato) (PBT, 1974). Las fibras de poliéster se utilizan en forma de filamento continuo o cortadas. Debido a las excelentes propiedades de la fibra poliéster, se emplean también mezcladas

con fibras naturales (algodón, lana, lino), artificiales (rayón viscosa, acetato y triacetato) y otras fibras sintéticas (acrílicas).

2.1.3.3. Fibra acrílica

Las fibras de poli acrílicas o fibras acrílicas (como se las conoce habitualmente) son fibras sintéticas obtenidas por polimerización de adición del monómero acrilonitrilo. Este fue descubierto en 1893 en Alemania. Los trabajos de desarrollo más importantes fueron llevados a cabo por W. H. Carothers y su equipo en la compañía DuPont. Recién en 1929 se patentó este polímero y no fue hasta 1944 que DuPont anuncia el desarrollo de la fibra acrílica. Seis años más tarde inicia la producción comercial con el nombre de Orlon. Al principio, las fibras elaboradas con 100 % de acrilonitrilo, presentaban una estructura interna compacta, con una alta orientación estérica, que hacía imposible teñirla. El problema fue resuelto por la incorporación de hasta un 15 % de otros monómeros, para conformar copolímeros que producen una estructura más abierta, lo cual permite la tintura en forma exitosa.

Las propiedades fisicoquímicas de las fibras acrílicas, permiten obtener productos textiles con buena resiliencia, retención de pliegues, recuperación de arrugas, fácil cuidado y propiedades *wash and wear*. Estas propiedades solo son superadas por las fibras de poliéster. Son muy resistentes a la acción de la intemperie y de la luz. Generalmente, se utilizan en géneros de punto o en hilos para tejer manualmente (mezclas con lana).

2.1.3.4. Fibra de elastano

Las fibras de elastano o fibras de poliuretano, son fibras sintéticas de un polímero termoplástico basado en la reacción de un diisocianato con un alcohol

alifático. Los trabajos de investigación comenzaron en Alemania a mediados del siglo XIX, pero recién un siglo más tarde Otto Bayer (IG Farben, 1937) logra la primera síntesis de laboratorio de un poliuretano, que es patentado ese mismo año. Tres años más tarde se comienza con la comercialización de la fibra con los nombres de Igamid y Perlon. Casi 20 años después la firma DuPont lanza al mercado fibras de poliuretano denominadas genéricamente como spandex o fibras de elastano.

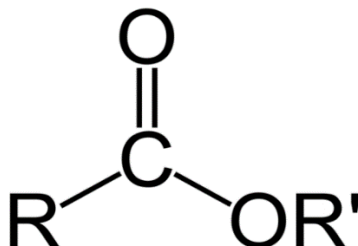
Los poliuretanos también pueden generar polímeros rígidos (espumas, plásticos) que no tienen aplicación como fibras textiles. En cambio los poliuretanos flexibles, se clasifican como elastómeros, que son aquellos polímeros que desarrollan un comportamiento elástico. Pueden ser tanto termoplásticos como termoestables, ya que la elasticidad depende de los enlaces covalentes del polímero (resiliencia) y la capacidad de las largas cadenas moleculares, de acomodarse por sí mismas, bajo los efectos de una tensión externa (estiramiento). Las fibras de poliuretano flexible, pueden alargarse desde una décima parte de su longitud sin tensión hasta siete veces dicha longitud.

2.2. Química de la fibra de poliéster

2.2.1. Ésteres

En química, los ésteres son compuestos orgánicos en los cuales un grupo funcional (otra cadena carbonada o grupo funcional) reemplaza a un átomo de hidrógeno (o más de uno) en un ácido carboxílico. Un ácido carboxílico es aquel cuyas moléculas poseen un grupo OH⁻ desde el cual el hidrógeno (H) puede disociarse como un ion protón (H⁺).

Figura 8. **Molécula de un éster**



Fuente: www.wikipedia.org/wiki/Archivo:Ester.png Consulta: 9 de abril de 2013.

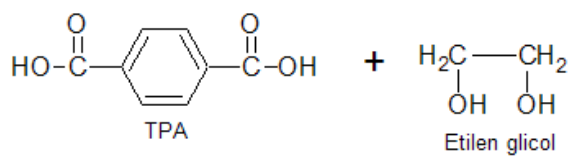
2.2.2. **Obtención de poliéster**

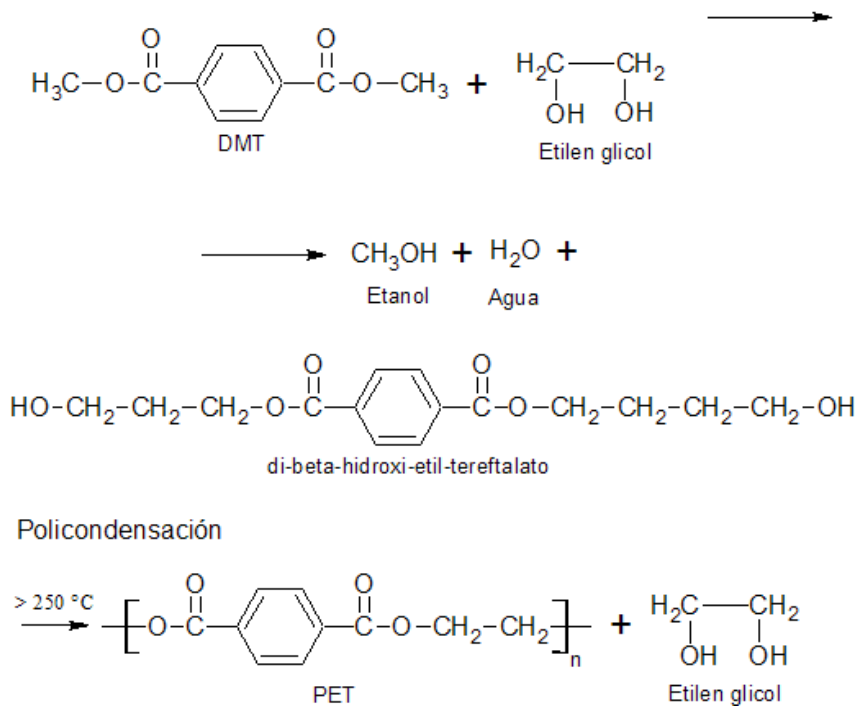
2.2.2.1. **Reacción de polimerización**

El terftalato de polietileno (PET) es el polímero del poliéster y se sintetiza por medio una reacción directa de un ácido dicarboxílico con un diol (alcoholes que tienen dos grupos hidroxilos). Esta reacción es una reacción típica de esterificación Fisher en la cual un ácido reacciona con un alcohol siguiendo el mecanismo usual de la reacción. El hecho de que cada molécula sea difuncional produce un polímero por la reacción.

Figura 9. **Reacción por esterificación de Fisher**

Esterificación





Fuente: www.textoscientificos.com/polimeros/pet Consulta: 9 de abril de 2013.

En la reacción de esterificación, se elimina agua en el proceso del TPA y metanol en el proceso del DMT. La reacción de poli condensación se facilita mediante catalizadores y elevadas temperaturas (arriba de 270°C). La eliminación del glicol etilénico es favorecida por el vacío que se aplica en la autoclave; el glicol recuperado se destila y vuelve al proceso de fabricación. Cuando la masa del polímero ha alcanzado la viscosidad deseada, registrada en un reómetro adecuado, se romperá el vacío, introduciendo nitrógeno en la autoclave. En este punto se detiene la reacción y la presencia del nitrógeno evita fenómenos de oxidación. La masa fundida, por efecto de una suave presión ejercida por el nitrógeno, es obligada a pasar a través de una matriz, en forma de fideo que, cayendo en una batea con agua se enfría y consolida. Los hilos que pasan por una cortadora, se reducen a gránulos, los cuales, tamizados y desempolvados se envían al almacenamiento y fabricación.

El gránulo así obtenido es brillante y transparente porque es amorfo, tiene baja viscosidad, o sea un bajo peso molecular, I.V. = 0.55 a 0.65.

2.2.2.2. Cristalización

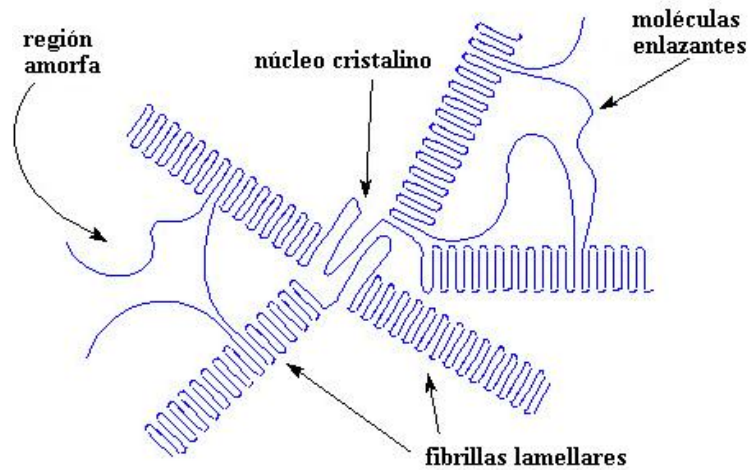
La cristalización es un fenómeno físico con el cual las macromoléculas pasan de una estructura en la cual su disposición espacial es desordenada (estructura amorfa, transparente a la luz) a una estructura uniforme y desordenada (estructura cristalina, opaca a la luz) que le confiere a la resina una coloración blanca lechosa. El proceso industrial consiste en un tratamiento térmico a 130- 160 °C, durante un tiempo que puede variar de 10 minutos a una hora, mientras el gránulo, para evitar su bloqueo, es mantenido en agitación por efecto de un lecho fluido o de un movimiento mecánico. Con la cristalización, la densidad del PET pasa de 1.33 g/cm³ del amorfo a 1.4 del cristalino. Para fines de fibra, no es necesario un nivel riguroso de cristalización.

2.2.2.3. Propiedades y características

La proporción de región cristalina y amorfa en su estructura varía ligeramente dependiendo de las condiciones de proceso en las cuales se obtuvo; esta define sus características y sus futuras propiedades a la hora de llevar a cabo el proceso de tintura.

En la siguiente imagen se puede apreciar la esfirulita polimérica cristalina del poliéster y sus principales partes que son: la región amorfa, el núcleo cristalino, las moléculas enlazantes y las fibras lamellares.

Figura 10. **Esferulita polimérica cristalina**



Fuente: ASADA, T. *Química de la fibra*. p. 25.

2.2.2.3.1. **Propiedades físicas**

Entre las principales propiedades físicas del poliéster se encuentran las siguientes:

- Punto de fusión de 250°C.
- Carácter oleofilo.
- Es una de las fibras sintéticas más resistentes en la actualidad.
- Carácter termoplástico, por lo cual el material se endurece al enfriarse y se ablanda al calentarse.
- Muy brillante.
- Fácil de arrugarse y plegarse durante el proceso de tintura.

- Inarrugabilidad (se arruga considerablemente menos que el algodón en prendas terminadas).
- Tintura con colorante disperso por medio de una difusión por temperatura alta.
- Seca fácilmente.
- Resiliencia en húmedo (prendas de fácil cuidado, telas para el hogar, pueden empacarse sin problema).
- Estabilidad dimensional (los artículos confeccionados pueden lavarse sin problemas en máquinas de lavar).
- Resistencia a la degradación solar (de uso adecuado en cortinas, lonas y otros artículos que deben soportar estas condiciones).
- Resistente a la abrasión (de aplicación en usos industriales, hilos de coser, ropa de trabajo entre otros).
- Aspecto estético superior al nailon (se mezcla bien con otras fibras, lana, viscosa, algodón, además se pueden obtener filamentos de muy bajo *denier* semejante a la seda).

2.2.2.3.2. Propiedades químicas

La principal propiedad química que caracteriza a este tipo de fibra es el hecho de ser hidrofóbica, es decir, no tiene afinidad con el agua; por lo cual esta no se absorbe debido que no hay grupos reactivos afines a una solución alcohólica; en cambio tiene afinidad con las materias aceitosas. Entre otras propiedades están:

- No tiene ninguna carga eléctrica ya sea aniónica o catiónica.
- Es inerte al ataque de agentes químicos; es decir, no posee centros reactivos dentro de su estructura molecular.
- Muy resistente a pH ácidos (por debajo de 7).

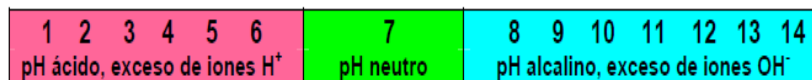
- Poca resistencia a pH alcalinos (superior a 7).
- Bajo nivel de impurezas.
- Blanqueamiento únicamente con clorito de sodio.

2.3. Influencia del pH en los procesos húmedos textiles

2.3.1. Conceptos básicos

Para poder contar con un constante alto nivel de calidad en la producción textil es necesario implantar un control permanente de ciertos parámetros que regulan los diferentes procesos húmedos (entre otros). Particularmente es importante tomar como tema base el pH, valor imprescindible en la mayoría de los procesos especialmente cuando se quiere obtener una elevada tasa de exactitud y reproducibilidad como se verá a lo largo de esta exposición. Muchas reacciones químicas ocurren en soluciones acuosas incluyendo aquellas que ocurren en sistemas vivos. Todas ellas dependen de la concentración del ion $[H_3O^+]$ presente en la solución. En 1909 Soren Sorensen (bioquímico danés, 1868-1939) propuso una escala para medir la concentración de los iones $[H_3O^+]$ (ion hidronio) también llamada escala de pH.

Figura 11. Escala de pH



Fuente: HERNÁNDEZ, A. *Influencia del pH en los procesos húmedos textiles*. p.2.

En el agua pura y a una temperatura de 25°C, se puede suponer que el producto iónico es igual a 1×10^{-14} , por lo tanto, en una disolución neutra las concentraciones de los iones hidrógeno e hidroxilo corresponden a un valor de $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{tot}} = [\text{OH}^-]_{\text{tot}} = 10^{-7}$ iones por gramo/litro. Esto está indicando que si en el agua se disuelve un ácido o una base se formarán iones $[\text{H}_3\text{O}^+]$ o iones $[\text{OH}^-]$ los cuales darán carácter ácido o básico (alcalino) a dicha disolución. Por lo tanto, toda solución acuosa contiene ambos iones hidronio e hidroxilo. Cuanto mayor sea la concentración de iones hidronio, menor será la concentración de los iones hidroxilo y viceversa.

Frecuentemente la medición del pH de una solución se hace por medio de un instrumento de medición llamado potenciómetro, con él se puede obtener rápidamente el valor de pH. Estos instrumentos se basan en una célula electroquímica donde uno de sus electrodos puede medir la concentración del ion hidronio en solución, si bien es importante tomar en cuenta que los conocimientos actuales indican que no existe una relación simple entre la concentración de los iones hidrógeno, su actividad y el pH. A continuación se amplían algunos términos de importancia.

La acidez actual es la cantidad de iones hidrógeno activos, es decir, aquellos realmente ionizados contenidos en la solución (ion hidronio). Por su parte, la acidez potencial es la cantidad de iones hidrógeno no ionizados, pero que pueden ser ionizables contenidos a manera de reserva en las soluciones. Estos iones se ionizarán a medida que desaparezcan los iones hidrógenos ionizados por efecto de alguna reacción. La acidez total es la suma de la acidez actual y la potencial, es decir, es la cantidad de iones de hidrógeno ionizables más la cantidad de iones de hidrógeno no ionizados contenidos en el ácido.

A continuación se analizan algunas propiedades de las fibras textiles especialmente en cuanto a los efectos que la acidez o alcalinidad del medio tiene sobre ellas.

- Fibra de poliamida

La reactividad química de las poliamidas es escasa, esto es natural si se tiene en cuenta que la cadena polimérica está formada por residuos hidrocarbonados exceptuando los grupos terminales tipo amida que sí son susceptibles a un ataque químico. Temperaturas en medio acuoso que pasen de los 150°C bajo presión, pueden provocar la hidrólisis total de la fibra. Los álcalis cáusticos y a elevadas temperaturas pueden producir efectos importantes sobre las poliamidas, si bien en realidad estas fibras son más sensibles a los ácidos minerales y a los ácidos orgánicos fuertes concentrados como el ácido fórmico, láctico y oxálico.

- Fibras de poliéster

Las propiedades químicas del tereftalato de polietileno están determinadas especialmente por su estructura. El núcleo aromático y los dos grupos metilénicos de la unidad estructural son segmentos relativamente inertes, en los eslabones estéricos es donde están los puntos sensibles al ataque químico. La resistencia a los ácidos que presentan las fibras de poliéster se manifiesta cuando su tenacidad no disminuye cuando la misma es sumergida en una dilución de ácido sulfúrico al 70 % a 40°C y durante 72 horas. Sin embargo, no soporta la acción prolongada de los ácidos sulfúrico o nítrico concentrados, ni siquiera a temperatura ambiente. Podría parecer normal que los eslabones éster se hidrolizaran fácilmente por la acción de los álcalis, pero en la forma cristalina orientada no sucede así. Las fibras de poliéster reaccionan con los álcalis a altas

temperaturas provocando la hidrólisis en la superficie, la velocidad de esta hidrólisis depende de la concentración del álcali y la temperatura. Las fibras de poliéster se comportan de manera diferente respecto de las soluciones de amoníaco en cuyo caso se produce una amidación que provoca la escisión de los eslabones éster con la consiguiente pérdida de tenacidad. Tratamientos prolongados en estas condiciones destruyen totalmente la fibra.

- Fibras de poliacrilonitrilo

Se ha observado que una solución de hidróxido de sodio al 1 % provoca la degradación de la tenacidad de las fibras acrílicas en general con una mayor rapidez que el ácido sulfúrico al 40 % y a 50°C. Las soluciones de amoníaco al 5 y 10 % dañan menos a estas fibras que el hidróxido de sodio.

En términos generales, el efecto de la acidez o basicidad de una solución a la hora de teñir es uno de los factores más importantes por tomar en cuenta ya que ligeras variaciones pueden generar grandes cambios en el producto final, generalmente por cambios en la tonalidad o, en el peor de los casos, por deterioro parcial o total de las fibras.

Usualmente, se mantiene un rango óptimo de pH dependiendo del tipo de tela que se trabaje, generalmente obtenido empíricamente. A continuación se presenta una tabla en la cual se resumen los efectos de pH, tanto ácidos como básicos.

Figura 12. Efecto del pH en fibras textiles

Fibra	Efecto de los Ácidos	Efecto de los Álcalis
Algodón	dañada por ácidos minerales	resistente
Lino	dañada por ácidos minerales	resistente
Rayón	dañada	resistente a débil
Lana	resistente	dañada
Seda	dañada por ácidos minerales, resistente a los ácidos orgánicos	dañada
Acetato	debilitada	poco efecto
Acrílicas	resistente	resistente a los álcalis débiles
Poliamidas	dañada	resistente
Poliéster	resistente	resistente

Fuente: HERNÁNDEZ, A. *Influencia del pH en los procesos húmedos textiles*. p.2.

2.3.2. Preparación húmeda

En la mayoría de los trabajos de planta se toman en consideración fórmulas ya establecidas para el lavado y descruce de las diferentes fibras textiles y casi

en ningún caso el pH del medio como un factor importante dando por descontado que con el agregado de los productos necesarios se está cumpliendo con los requisitos mínimos del proceso en particular. En realidad las cantidades de estos productos (químicos y auxiliares) llevan otras importantes misiones además de ajustar las condiciones de pH adecuadas entre ellas las de extraer, neutralizar, disolver, saponificar, dispersar o emulsionar los contaminantes indeseables o aquellos que ya cumplieron con su cometido (encolantes, por ejemplo). Por otro lado, se debe tomar en cuenta que así como cantidades por debajo de lo necesario pueden no eliminar los contaminantes en una forma adecuada, las cantidades excesivas de estos productos químicos y un pH inadecuado pueden atacar la fibra en particular, más si se toma en cuenta las altas temperaturas de trabajo normalmente utilizadas en estos procedimientos.

En total y en el caso de las fibras sintéticas en general, es normal encontrar cantidades de extraíbles (en solventes y en agua) que oscilan entre un 12 % y un 18 %. En lo que se refiere a las fibras naturales los porcentajes varían en una mayor proporción según la procedencia de las mismas, por ejemplo, en el caso del algodón se debe tomar como porcentaje total de impurezas entre un 18 % y un 27 % (donde propios de la fibra corresponden a un 10 % -15 %, más aquellos agregados en diferentes procesos como el encolado, encerado, etc., los cuales oscilan entre un 8 % a un 12 %). La lana presenta como impurezas propias de la fibra entre un 14 % a un 27 % correspondientes a suciedad, tierra y de un 11 % a un 16 % adicional de grasas de bajo punto de fusión.

En el caso particular de la lana y de la seda no se deben extraer todas esas impurezas especialmente las grasas de bajo punto de fusión ya que actúan como preservantes y lubricantes de las propias fibras durante los diferentes procesos textiles. Como ya se comentó en los procesos húmedos previos, normalmente no se mide el pH del baño, en realidad se agregan álcalis o ácidos (caso del

desmineralizado del algodón) con la única finalidad de eliminar los contaminantes y ello solamente se hace posible con las cantidades necesarias y suficientes de los productos químicos involucrados. Particularmente, los descruces del algodón, ramio y lino son ejecutados en condiciones de alta alcalinidad utilizando hidróxido de sodio como componente alcalino y en cantidades importantes.

Otro proceso altamente alcalino es el mercerizado y el caustificado de la fibra de algodón, este último de común aplicación en el tejido de punto. En el blanqueo de las fibras celulósicas con peróxido de hidrógeno pasa algo similar, ya que se encuentra un medio fuertemente alcalino. Sin embargo, en este caso el pH del medio sí es importante y, por lo tanto, debe ser regulado para que el peróxido de hidrógeno actúe en la forma prevista, es decir, que proporcione el máximo grado de blanco con la mínima cantidad del agente oxidante posible y sin ataques a la fibra celulósica. En este caso, con la regulación de las cantidades de los componentes químicos del baño de blanqueo y especialmente del pH adecuado se tendrá el control del proceso bajo control.

También en el blanqueo de las fibras celulósicas con cloro debe regularse adecuadamente el pH del medio a valores que no sobrepasen el pH 10,5, si es que se quiere obtener los mejores resultados y al mismo tiempo minimizar la presencia de ciertos compuestos orgánicos del cloro que son contaminantes. Este ha sido el principal motivo por lo cual este tipo de proceso ha sido prácticamente dejado de lado por considerarlo altamente contaminante debido a la presencia de compuestos fenólicos clorados (AOX) en los baños de blanqueo residuales.

El blanqueo oxidante de la lana con peróxido de hidrógeno se realiza en medio alcalino y el rango de pH adecuado debe estar entre 8.0 - 9.0. Cuando se utiliza el hidrosulfito de sodio en el blanqueo reductivo de la lana en medio

alcalino el rango adecuado está entre pH 8.0 - 9.0. Otro agente oxidante de aplicación como agente químico de blanqueo para las diferentes fibras textiles es el clorito de sodio y en el caso particular de las fibras sintéticas debe ser utilizado en medio ácido y en el rango de pH entre 2.5 - 3.0, considerado como óptimo si se quiere tener los mejores efectos con este producto. Cuando se trata de las fibras celulósicas (algodón, lino), el rango de pH debe estar entre 3.5 y 4.0 (en general con ácido acético). A continuación se listan las condiciones generales de alguno de los procesos como a la importancia del pH en los mismos.

En lo que se refiere al mercerizado y caustificado del algodón no es necesario el control estricto del pH ya que los parámetros que regulan estos procesos son:

- Concentración del hidróxido de sodio
- Temperatura del baño
- Tiempo de inmersión/retención en estas condiciones
- Tensión aplicada

Algo similar ocurre con el descruce del algodón ya que los parámetros que regulan su eficiencia son:

- Concentración del álcali y auxiliares agregados
- Temperatura
- Tiempo en esas condiciones

Con la finalidad de obtener una fibra absorbente y con un grado de blancura óptimo es interesante observar los gráficos siguientes donde se han volcado parámetros importantes que regulan el descruce y blanqueo de la fibra de algodón, más si pensamos que luego este material será teñido o estampado. El

pH del baño de blanqueo con peróxido de hidrógeno debiera rondar un valor de 10.5, si bien en muchos casos pudiera llegar hasta un pH máximo de 11.0 considerado como óptimo. Con ello se garantiza un excelente medio para un máximo rendimiento del peróxido, además de un mínimo ataque por parte del producto oxidante a la celulosa (posibilidad de formación de oxixelulosa por el ataque del oxígeno nascente producto de la descomposición del peróxido de hidrógeno), un pH por encima de los recomendados pueden producir reacciones que disminuyen la acción de blanqueo.

2.3.3. Aspectos iniciales sobre la tintura de las fibras textiles

Para que una tintura se lleve a cabo con éxito, es necesario tomar en cuenta cada una de las condiciones iniciales y, además, entender cómo será la cinética de la tintura en función de las propiedades químicas intrínsecas de cada tipo de tela y colorante.

2.3.3.1. Requisitos para el teñido

Para que una fibra tenga propiedades tintóreas debe responder a muchos criterios como la inexistencia de repulsión eléctrica entre la superficie de la fibra y las moléculas del colorante; adicional a esto, el espacio entre las moléculas de la fibra debe ser lo suficientemente amplio para permitir la difusión y penetración del colorante. La fijación se debe producir a nivel interno, para impedir la pérdida del colorante durante los posteriores tratamientos húmedos. La fijación presenta diferentes medios para la captación del colorante, entre ellos: por absorción u adsorción del colorante, insolubilización del mismo en medio acuoso o por unión química entre los grupos reactivos de las fibras y de los colorantes.

2.3.3.2. Cinética de la tintura

La difusión de los colorantes en las fibras representa por lo común el factor determinante de la velocidad de teñido, si bien este fenómeno no se rige por las leyes normales que explican la difusión en medios líquidos o en polímeros amorfos. Aparentemente la razón para que ello ocurra de otra manera es que existe una fracción de la fibra que tiene una suficiente movilidad molecular que depende de la temperatura del medio. Existe difusión mientras la fibra presente un gradiente energético es decir diferencias locales en el potencial electroquímico de un tipo de partícula. En el caso de las poliamidas, por ejemplo, los equilibrios de disociación de los grupos extremos de la fibra (NH_3^+ , COO^-) tienen que ver con la relación que existe entre la absorción del colorante y el pH del medio. De igual forma puede explicarse el teñido de las fibras acrílicas con los colorantes catiónicos y la lana con los colorantes ácidos.

El caso de las fibras celulósicas con los colorantes directos es un ejemplo de grupos de fibras y colorantes con cargas eléctricas iguales (del mismo signo). Supuestamente en una fibra homogénea (con diferencias despreciables) se encuentra un coeficiente de difusión creciente con la concentración del colorante. Investigaciones realizadas sobre las fibras de poliamida, acrílicas y celulósicas confirman esta aseveración.

Los cambios de orientación y cristalinidad de las fibras en un tejido que se producen durante un tratamiento (variación en la tensión de los hilos durante el tisaje, las tensiones durante el teñido o ciertos tratamientos térmicos previos) pueden presentar problemas muy serios, sobre todo, porque tales cambios pueden aparecer en una forma irregular a través del tejido, lo cual se traduce generalmente en un aspecto poco homogéneo del material luego del teñido, además de la aparición de franjas de hilos de color más claro.

2.3.3.3. Unión química

La atracción entre un colorante y la fibra está basada en una unión química de fuerzas polares y no polares, ejemplo de este fenómeno se tiene en el caso de la tintura de las fibras celulósicas con los colorantes reactivos. También un ejemplo de este tipo de unión es la absorción de un colorante ácido por una fibra proteínica. En la lana, por ejemplo, se puede imaginar la formación de un puente salino entre un grupo sulfónico del colorante y un grupo amino cargado de la fibra (unión iónica).

Las fuerzas polares se forman por inducción de un par de dipolos, las fibras dipolares como la lana y la celulosa pueden ejercer una atracción sobre ciertos colorantes llegando al extremo de la atracción entre una fibra y un colorante con la formación de un enlace hidrógeno de carácter esencialmente electrostático. Tal es el caso de la unión de las fibras que contienen estos grupos dipolares que en principio pueden formar puentes de hidrógeno con los grupos reactivos de los colorantes, ejemplo de ello se tiene en la reacción entre los grupos hidroxilo de la celulosa y los grupos hidroxilos u aminos de los colorantes.

A continuación se puede observar algunas guías de aplicación general para el teñido por agotamiento de los materiales textiles, en las mismas se hace especial mención a los parámetros importantes de tales procesos. Como toda guía no anula las recomendaciones dadas por los fabricantes de colorantes en particular las cuales debieran ser utilizadas en primer lugar o comparadas con las contenidas en este trabajo con la única finalidad de ampliar los conocimientos que son necesarios poseer en este campo. Tampoco se debe olvidar la importancia de la concentración de los colorantes en un mismo baño de tintura, en la mayoría de los casos el componente de menor concentración sube o agota sobre la fibra en primer lugar.

2.3.3.4. Colorantes directos

Con estos colorantes los parámetros que prácticamente regulan su comportamiento son:

- La temperatura
- La duración del proceso
- La adición de sal
- El pH del medio

Siempre tomando en cuenta que la relación de baño se mantendría estable en todos los procesos. Si bien la temperatura de mayor agotamiento varía de un colorante a otro se puede decir en general que el máximo agotamiento se obtiene entre los 80° y los 85°C, la máxima igualación a temperaturas cercanas a los 100°C (también el menor agotamiento). La adición de sal se hace imprescindible en todos los casos, así como los tiempos necesarios de teñido a la temperatura óptima los cuales no debieran ser inferiores a los 45 - 60 minutos para obtener el máximo rendimiento.

El pH del medio en estos casos, no regula el comportamiento de estos colorantes pero sí su solubilidad, es por ello conveniente que el mismo sea de alrededor de 7,5 – 8,0 en la mayoría de los casos. Si por alguna circunstancia se diera el caso de trabajar con fibras celulósicas que contienen oxixelulosa en su composición es conveniente que la tintura se realice a pH ácido (el medio ácido disminuye la carga negativa de la oxixelulosa) lográndose tinturas mejor igualadas.

2.3.3.5. Colorantes ácidos

Las fibras proteínicas (lana, seda) así como las poliamidas son preferentemente teñidas con algunos de los colorantes llamados genéricamente colorantes ácidos. Bajo esta denominación se incluyen los colorantes de baño neutro, de baño ácido con sus subgrupos para el teñido de la lana y los premetalizados o complejos metálicos del grupo 1:1 y del grupo 1:2. En todos los casos se debe tomar muy en cuenta los siguientes parámetros que, además, son los que rigen los procesos de teñido con estos colorantes:

- Fibra
- pH del baño
- Relación de baño
- Electrolitos
- Colorantes, su concentración y compatibilidad
- Temperatura
- Tiempos a esas temperaturas
- Auxiliares de igualación

En lo concerniente a las fibras poliamídicas, además de tomar en cuenta las diferencias en cuanto a la cantidad de grupos terminales que presentan comparativamente las poliamidas tipos 6,0 y 6,6, es importante considerar las condiciones de estirado y termo fijado de la fibra en particular, ya que los colorantes ácidos se comportarán durante el proceso de tintura en base a estos parámetros en forma adicional a los ya nombrados como generales para este grupo de colorantes.

2.3.3.6. Colorantes dispersos

Si bien la tintura de las fibras sintéticas en general y, en particular las derivadas del tereftalato de polietileno, con los colorantes dispersos, no guardan una gran dependencia respecto del pH del medio, es importante recordar que un pH óptimo en cada caso permitirá que esas tonalidades puedan ser repetidas sin cambios en la tonalidad e intensidad de las mismas. El pH del baño puede influir negativamente sobre estos colorantes sea por hidrólisis ácida o alcalina, en particular en el caso de los colorantes dispersos normales, los cuales no muestran una buena estabilidad a la reducción a pH alcalinos, esto se puede apreciar en el caso de las tonalidades pastel. Por otro lado, la eficacia de la estabilización de las dispersiones de estos colorantes en los baños de tintura depende de:

- La concentración del colorante
- Relación de baño y agentes auxiliares
- Temperatura del baño
- pH
- Tiempos de tintura

2.3.3.7. Colorantes reactivos

Evidentemente se trata de una de las familias de colorantes que más ha evolucionado en el tiempo, sea por la profusión de fabricantes de los mismos o por los diferentes procesos que pueden utilizarse para su aplicación. En particular, como ya se comentó al principio cuando se hace referencia a los procesos por agotamiento dentro de los cuales se puede distinguir cuatro categorías listadas a continuación:

- Proceso tradicional o convencional: en este proceso la temperatura es elevada hasta la fijación del colorante momento en el cual se agrega el electrolito para promover el agotamiento del mismo, se trabaja cierto tiempo en estas condiciones y recién entonces se agrega el álcali adecuado para que el colorante se fije a la fibra.
- Proceso de un solo paso: desde el principio se agregan todos los componentes al baño de tintura (colorante, sal, álcali) y se trabaja con ellos durante un cierto tiempo a temperatura ambiente, luego se comienza a elevar la temperatura hasta llegar a la adecuada para el colorante en particular y se procede a su tintura.
- Proceso a temperatura constante: en este proceso se dejan de lado los posibles problemas que surgen del mal manejo de los controles de la temperatura (rango y tiempos de subida de la misma). La sal puede ser agregada desde el principio (en porciones) para promover un buen agotamiento del colorante y luego se agrega el álcali para fijarlo adecuadamente.
- Proceso a alta temperatura: en general se pretende mejorar las condiciones de migración e igualación de los colorantes. Con este proceso se puede teñir (incluyendo la sal) a altas temperaturas, bajándose luego a las temperaturas de fijación de esos colorantes, momento en el cual se agrega el álcali necesario y se continúa luego con la tintura en forma normal.

Sea cual fuere el proceso de tintura que se elija, los parámetros que regulan la tintura de las fibras celulósicas con los colorantes reactivos son:

- Preparación previa del material
- Relación de baño
- El pH del medio
- Temperatura del baño de teñido

- Tiempo a la temperatura de fijación
- Agregado de electrolitos

2.3.3.8. Colorantes catiónicos

La tintura de las fibras acrílicas (aquellas que contienen al menos un 85 % de poliacrilonitrilo) con los colorantes catiónicos presenta una serie de dificultades cuando se le compara con la tintura de las otras fibras textiles. Quizás la principal dificultad se produce cuando se obtienen desigualdades en la tintura, en general, muy difíciles de corregir debido a que estos colorantes casi no migran a las temperaturas normales de teñido. Esto obliga de alguna manera a ajustar los parámetros que regulan el proceso de teñido desde el principio. Aquí más que con cualquier otro tipo de colorantes y fibras se hace importante observar las recomendaciones que ofrecen las casas proveedoras de los colorantes en particular.

Como parámetros importantes en la absorción de los colorantes catiónicos se debe considerar:

- pH
- Electrolitos
- Temperatura
- Tiempo de teñido
- Relación de baño

2.3.3.9. Acabado

Evidentemente el pH es importante en todos los procesos donde se involucra a las fibras textiles, sea por motivos de preservación de las mismas o para promover una reacción. El acabado en particular se refiere al acabado químico con resinas, las cuales son utilizadas con el principal motivo de mejorar las propiedades físicas y químicas del material textil. Especialmente cuando se trata de las fibras naturales (celulósicas en particular como el algodón, viscosa o rayón) es normal que se recurra a la aplicación de acabados basados en resinas (se denominan así porque durante el curado forman estructuras tridimensionales entrecruzadas) con la finalidad de mejorar ciertas propiedades deficientes como son la recuperación al arrugado y el alto encogimiento entre otras. Todas las telas tejidas tienden a encoger, este proceso ya comienza durante el engomado de la urdimbre y continúa en los sucesivos procesos húmedos cuando la tela ya está formada.

Las fibras termoplásticas, por otro lado, se estabilizan con calor a temperaturas que están dentro del rango de su temperatura de transición vítrea ($^{\circ}\text{Tg}$). En el caso del algodón y del rayón las telas presentan un acortamiento elástico indeseable y un encogimiento progresivo. Diferentes materiales reactivos (resinas en general) pueden ser utilizados para lograr las propiedades estéticas y funcionales que deben tener ciertas telas (camisería, ropa de vestir en general, sábanas. etc.), así como también diferentes procesos de aplicación de los mismos.

Los diferentes métodos de estampación tampoco escapan a la necesidad del control del pH, si se habla de los colorantes se debe considerar los mismos cuidados que para la tinturas con ellos, es decir, se debe ajustar el pH al rango adecuado (ácido o alcalino) para cada tipo de colorante.

2.4. Tintura de fibras de poliéster

Las fibras sintéticas en sus límites más amplios dependen de tres ciencias, la química orgánica, la ciencia de los polímeros y la textil. Desde el punto de vista textil es lógico el interés en aquellos polímeros hilables que presenten posibilidades de formar fibras.

2.4.1. Generalidades

Las propiedades físicas y químicas de una fibra dependen no solo de la estructura química de la molécula sino también de la textura (forma física) sobre la cual está elaborada la fibra. Para que un polímero se pueda aprovechar en la formación de fibras es necesario orientar las macromoléculas en la dirección del eje de la fibra, operación que se realiza durante la hilatura. Las propiedades de las fibras en estos casos dependen del grado de orientación y también de las proporciones relativas en tamaño, forma y distribución de las zonas amorfas y cristalinas.

Las fibras sintéticas se elaboran en general por la aplicación de tres procedimientos diferentes: hilatura por fusión, hilatura en húmedo y en seco. La elección del proceso depende, en primer lugar, de las características del polímero, de su punto de fusión, su estabilidad en ese punto así como de la solubilidad o coagulación que de él se pueda hacer mediante el uso de disolventes orgánicos adecuados. La fibra de poliéster conocida y utilizada es derivada de poliésteres orgánicos, siendo hilada por fusión, porque su solubilidad en ciertos disolventes orgánicos es limitada y porque el grado de su estabilidad térmica permite elaborarla a partir del polímero fundido sin que se produzcan cambios en su composición.

Las fibras de poliéster derivadas del tereftalato de polietileno pueden ser teñidas en principio únicamente por los colorantes dispersos, si bien además debieran incluirse algunos colorantes a la tina (no en su forma reducida) y ciertos colorantes azoicos (para ciertos tonos oscuros). Como estas fibras poseen una estructura molecular muy cerrada en general los colorantes dispersos presentan rangos de agotamiento muy lentos, esto ha motivado el uso de ciertos acelerantes (*carriers*), así como altas temperaturas (125°-130°C) en los procesos de tintura actuales con la finalidad de acelerar su agotamiento.

2.4.2. Características de los colorantes dispersos

Si bien la definición propuesta es que los colorantes dispersos son insolubles en agua, realmente poseen una baja solubilidad en ella. Las partículas del colorante se disuelven en su forma mono-molecular estando muy influida esta solubilidad por las condiciones del medio así como por otros factores propios, entre los cuales se puede nombrar, el agua, pH del medio, relación de baño, dispersantes, carriers, igualizantes, electrolitos entre otros, además de las altas temperaturas de trabajo. La teoría del mecanismo de tintura se basa en principio en que los colorantes pueden penetrar dentro de la fibra de poliéster cuando se encuentran en su forma mono-molecular dispersa, en otras palabras el colorante debe disolverse primero en el baño de tintura para luego ser adsorbido en la superficie de la fibra y en una etapa posterior difundirse dentro de la misma. Teóricamente el proceso de tintura de la fibra de poliéster consiste en tres procesos parciales:

- Difusión de la solución o dispersión del colorante hacia la superficie de la fibra.
- Adsorción del colorante por la superficie de la fibra.
- Difusión del colorante desde la superficie hacia el interior de la fibra.

Normalmente los colorantes dispersos durante su síntesis se presentan en forma de cristales toscos de diferentes dimensiones, por ello importante tomar en consideración los procedimientos de acabado utilizados por los fabricantes para que se estandaricen en una forma utilizable, sea en forma de polvos, líquidos, gránulos entre otros. En la actualidad, los fabricantes han puesto un mayor énfasis en la calidad del acabado de estos colorantes ya que es uno de los factores más importantes para la elección de una línea que vaya a ser utilizada en los diferentes procesos de tintura.

El tamaño de un colorante disperso ya acabado en una forma adecuada se encuentra dentro del rango de 0.1 - 1 mili micrón. El comportamiento de los colorantes dispersos en mezclas es importante de ser tomado en cuenta, ya que en general se ha demostrado que estos colorantes pueden ser considerados en forma independiente en cuanto a sus velocidades de agotamiento, esto significa que debido a que cada colorante agota más lentamente a concentraciones más altas en una combinación de colorantes similares, aquel que se encuentre a mayor concentración será el que agote con mayor lentitud. En consecuencia, la verdadera compatibilidad entre los colorantes no depende solamente del tipo de colorantes sino también de la concentración comparativa de los mismos. El pH del medio debe rondar el medio ácido en el caso de los procesos de teñido normales o el medio alcalino como ocurre con ciertas gamas de colorantes de aplicación actual utilizados en la tintura de la mezcla de poliéster/celulosa con colorantes reactivos en un solo baño. También el agua debiera ser analizada ya que muchos colorantes dispersos y ciertos auxiliares pueden ser sensibles a la dureza de la misma, necesitándose en muchos casos el agregado de agentes secuestrantes para corregir tal problema.

2.4.3. Efectos negativos durante la tintura

Uno de los problemas que se pueden presentar durante la tintura con los colorantes dispersos, especialmente cuando se trata del teñido de hilados o de poliéster texturizado, es la aparición de manchas de colorante a través de todo el material así como la tendencia al manchado por transferencia del tono obtenido, esto se hace más evidente cuanto más oscuro es el tono. Este problema tiene como su mayor contribuyente al acabado (*spin finish*) que presenta la fibra y particularmente en los aceites y lubricantes que son aplicados en los diferentes procesos previos a la tintura (hilandería y tejeduría).

Estos pueden producir no solamente manchas sino además transferencia de los colorantes luego de la tintura, manchando las fibras acompañantes, los orillos entre otros. Como la importancia de este manchado depende de la cantidad de acabado que lleve la fibra es necesario realizar un test previo de extraíbles del material por ser teñido para adecuar el baño de lavado (si fuera necesario) a los porcentajes de estos extraíbles que realmente traen esas fibras, minimizando, de alguna manera, parte de estos inconvenientes.

Es necesario comentar además que estos problemas se agravan aún más cuando se trabaja con fibras de poliéster con alto contenido de oligómeros (trímeros cíclicos de bajo peso molecular) ya que estos migran hacia la superficie de la fibra durante los diferentes procesos de tintura y más cuando se involucran temperaturas superiores a los 160° - 170°C durante el secado o termofijado previos. También se debe tomar en consideración que los oligómeros tienden a migrar más hacia el baño de tintura cuando las temperaturas de teñido son superiores a los 120°C.

Estos oligómeros se encuentran en cantidades de aproximadamente 1.5 – 3 % y son muy poco solubles en el agua por lo cual pueden quedar luego en el baño de tintura como un aceite insoluble posible de depositarse tanto en la maquinaria como en el mismo material. Esto puede ocurrir cuando se disminuyen las temperaturas de teñido en la finalización de los procesos, de aquí que en muchos de los casos se recomienda botar el baño de tintura a la mayor temperatura posible tomando los 95°C como la temperatura mínima para esta finalidad.

2.4.4. La fibra de poliéster texturizada

Los textiles hechos con poliéster texturizado presentan muchas ventajas pero también muchas dificultades en su teñido. La texturización modifica profundamente la naturaleza física de la fibra en especial en lo que al grado de cristalinidad de la fibra se refiere. Es, por lo tanto, fácil conseguir que ligeras irregularidades producidas durante el proceso de texturización se traduzcan en marcadas diferencias de afinidad por los colorantes durante la tintura. Como ya se comentó en la introducción, se ha comprobado que la uniformidad de la absorción de los colorantes dispersos en la fibra de poliéster está ligada directamente a la variación de la relación zonas cristalinas/amorfas. La fibra de poliéster texturizada inicialmente lisa es procesada por diferentes sistemas especialmente desarrollados para la obtención de un hilado blando, suave, agradable al tacto, esponjoso y voluminoso, convirtiéndose de esta manera en un artículo apto para ser utilizado con prendas de vestir, artículos de punto, tejidos varios entre otros. Mediante un tratamiento térmico y mecánico estos hilados pueden llegar a tener nuevas propiedades específicas que se logran fijar y que luego son conservadas una vez vueltas a enfriar. La fijación de la torsión del filamento de poliéster se realiza a temperaturas entre los 190°- 220°C, durante 0,75 a 0,15 segundos respectivamente.

Luego el hilado ya texturizado es enrollado en rollos blandos y fijados por vapor a temperaturas de 125° - 130°C, durante 10 a 30 minutos. Algunos factores que deben tomarse en cuenta durante el proceso de texturización son los siguientes:

- Diferencias en las temperaturas de texturización.
- Diferencias en la tensión durante el texturizado.
- Irregularidades durante el vaporizado.
- Diferencias de presión o temperatura.
- Fijación de productos grasos.
- Aplastamiento del hilado en el curso de la operación.
- Utilización de aceites, lubricantes, antiestáticos no recomendados o irregularmente distribuidos.
- Irregularidades adicionales de la tensión que se producen durante el tejido.

2.4.5. El efecto de barrado

El efecto de barrado puede ser producido por desigualdades durante la producción del hilado, de la tela de punto o del material tejido (diferencias de volumen o brillo) o por diferencias en la absorción de los colorantes debido a distintas estructuras de los filamentos. Las variantes en la estructura del filamento son producidas generalmente por diferencias en la temperatura o tensión que se producen durante los tratamientos a los que se someten los filamentos luego del proceso de hilado. Estas diferencias influyen sobre la cristalinidad y la estructura de las regiones amorfas de la fibra y por lo tanto afectan tanto el equilibrio del teñido como la velocidad del mismo.

De acuerdo con sus causas y a sus efectos se pueden llegar a producir varios tipos de "barrado". Al barrado normal se puede definirlo como una

diferencia relativa en la absorción del colorante por parte del material menos denso y del más denso. Invariablemente disminuye durante el curso del teñido, encontrándose un máximo de diferencia en su inicio e igualando luego a medida que se aumenta el tiempo de teñido. La velocidad de igualación está relacionada con la capacidad de migración de los colorantes. Además, una temperatura alta de tintura no influye sobre el efecto inicial pero acelera siempre el efecto de igualación posterior.

Un tratamiento previo del material a temperaturas de 120°-130°C durante 30 minutos sin los colorantes-auxiliares y enfriando luego a temperaturas de aproximadamente 70° - 90°C, generalmente disminuye el barrado del teñido subsiguiente. No siempre los agentes auxiliares acelerantes (*carriers*) mejoran las condiciones de igualación en el material barrado, si bien en muchos casos pueden resultar de gran ayuda si son aplicados adecuadamente. Muchos autores han sugerido un método de control óptimo de la temperatura en los teñidos con los colorantes dispersos sobre la fibra de poliéster.

El método a nivel del laboratorio se basa en una evaluación de las curvas de absorción [cantidad (%) de colorante absorbido sobre peso de la fibra] a través del tiempo de teñido, siguiéndose con los mismos parámetros de control que se haría en la planta según las necesidades prácticas del caso (con los colorantes en uso y la fórmula aplicada). Con ello se estaría anticipando los posibles problemas que se puedan presentar. Con estas curvas es posible verificar la temperatura para una determinada velocidad de absorción (que como ya se menciono depende en una gran medida de la concentración del colorante) y debe ser tomada como una guía, considerando que la velocidad de teñido encontrada es válida para esa fibra de poliéster en particular. En la mayoría de los casos es posible comenzar la tintura a temperaturas cercanas a los 90°C. Cuando se tiñen materiales con alta tendencia al barrado los requisitos de los colorantes en cuanto

a la solidez a la sublimación no debieran ser demasiado altos. Por otro lado, si no se obtienen tonos uniformes después de 1 hora a 130°C se debería agregar un agente de transporte o carrier, con lo cual es posible mejorar la uniformidad de la tintura.

2.4.6. Lavado del material

En general el lavado previo del material debiera ser un paso normal dentro de los procesos de teñido porque muchos de los problemas que se presentan luego durante la tintura tienen su origen en el no lavado del material o en su lavado deficiente. Contaminantes que trae el material desde su hilatura, texturizado, bobinado, tejido, etc., deben ser eliminados porque se pueden presentar de manera no uniforme en la fibra.

2.4.7. Proceso de tintura general a alta temperatura

Existe una gran variedad de procedimientos para la tintura de las fibras de poliéster en general y en sus diversas presentaciones físicas (hilados, telas entre otros), sin embargo, las siguientes sugerencias pudieran cumplir con la mayoría de las exigencias para el procesamiento de este material cuando se utilizan los colorantes dispersos de aplicación normal:

- Comenzar la tintura con agua a 50°C (para el material en forma de tela es conveniente el agregado en este momento de un agente lubricante-antiquiebre como puede ser el topelube UFN, 1 - 3 g/l).
- Agregar luego 1 – 3 % s.p.m. de un agente igualizante con propiedades dispersantes y migrantes (Topgal HT igualizante-dispersante-migrante, aniónico, de baja espuma).

- Si se pensara en utilizar un *carrier* en bajas concentraciones como un agente mejorador de la migración, este sería el momento para su agregado (puede ser 1g/l de un producto acelerante no contaminante).
- Se regula entonces el pH del baño a valores cercanos entre 4,5 – 5,0. Es importante en estos casos tomar en consideración el pH del agua utilizada, para entonces primero neutralizar su alcalinidad (esto es normal en la mayoría de las aguas tratadas) y luego agregar la cantidad de ácido acético para ajustar el pH a los valores recomendados (esto en el caso de las tinturas bajo condiciones normales en medio ácido).
- Se comienza a elevar la temperatura del baño en unos 2°C/min hasta llegar a una temperatura de 80°C.
- Se estabiliza la temperatura en ese valor y se agregan los colorantes dispersos previamente dispersados con agua caliente.
- Se cierra la máquina, se comienza a elevar la temperatura en 1°C/min, hasta llegar a temperaturas de 130°C – 135°C (caso del poliéster texturizado es conveniente no pasar de los 130°C).
- Se trabaja bajo estas condiciones durante 1 hora para el caso de colorantes normales.
- Si la tintura se encuentra dentro de los parámetros de tonalidad se enfria hasta los 90°C y se comienza a enjuagar por rebose hasta llegar a los 65°-70°C.
- Cuando el agua comienza a salir clara y las tonalidades se encuentran en el rango de medios oscuros es conveniente realizar un baño de limpieza reductor agregando al baño: 1 - 2 g/l del topsol LTT y 2 - 4 g/l de soda caustica al 50 %. Se calienta hasta llegar a los 70° - 80°C y se agrega entonces: 2 - 4 g/l de hidrosulfito de sodio. Finalmente, se trabaja por espacio de 30 minutos (esto es para el caso del lavado reductivo normal, se sabe que existen auxiliares que eliminan este lavado e inclusive los

procesos de teñido alcalinos de la fibra de poliéster y ciertos colorantes dispersos tampoco lo necesitan).

- Se enjuaga luego con agua caliente a unos 50°C y se finaliza la tintura. Si fuera necesario con el agregado de un suavizante, antiestático entre otros. Es posible hacerlo durante este enjuague con un tratamiento con los productos adecuados por espacio de 20 minutos o más.

Hasta aquí se han bosquejado algunas recomendaciones generales para la tintura del poliéster, sin embargo, existen algunos puntos importantes dentro de los procesos de tintura que deben ser adicionalmente comentados. Por ejemplo, con referencia a los colorantes dispersos es interesante observar que los valores de difusión de los diferentes colorantes dependen en una gran medida de la temperatura de teñido, de la resistencia mecánica propia de la fibra, de la composición química y tamaño de las partículas del colorante en particular, además de estos valores, también las condiciones pueden verse influidas por los siguientes puntos:

- Cambios en la fibra misma y en consecuencia en su superficie (texturizado).
- Incrementos de la temperatura (termofijación).
- Uso de colorantes con valores de difusión diferentes.
- Uso de colorantes con dispersiones muy finas o directamente teñir con soluciones reales de los colorantes.
- Incrementando los espacios intermicelares de la fibra.

2.4.8. Colorante para tintura de poliéster

Se estima que un 80 % de los colorantes dispersos para la tintura del poliéster son utilizados en condiciones de alta temperatura en procesos por agotamiento, el resto es utilizado en procesos continuos (termosolado,

vaporizado) y en la estampación. Los colorantes dispersos son colorantes no-iónicos que pueden ser aplicados por agotamiento formando finas dispersiones estabilizadas por el agregado de ciertos tenso activos con propiedades dispersantes.

Como ya se mencionó, estos colorantes se caracterizan por ser muy poco solubles en agua, siendo esencial que en la primera etapa del proceso de tintura puedan disolverse en ese medio para que luego se transfieran a la superficie de la fibra y sean adsorbidos por la misma (fase de adsorción), dando comienzo luego la etapa de difusión del colorante hacia el interior de la fibra (fase de difusión). Los colorantes dispersos se agrupan, en general, por sus valores de difusión, encontrándose con colorantes de baja energía, media energía y de alta energía. Tomando en cuenta estos valores se puede predecir que cuando se necesitan altos valores de igualación-migración se debería elegir aquellos colorantes de baja y media energía, ya que los mismos poseen valores de difusión muy altos (especialmente los de baja energía), si bien por otro lado cuando se necesitan altas solidez a los tratamientos térmicos (sublimación, por ejemplo) debieran elegirse los colorantes de alta energía.

2.4.9. Lavado de tinturas

La necesidad de un lavado final de las tinturas generalmente está relacionada con la tendencia que puedan tener esos colorantes dispersos a agregarse y a depositarse sobre la superficie de la fibra especialmente cuando son aplicados a altas concentraciones. Si estos depósitos no fueran removidos de la superficie de la fibra es posible que puedan opacar el brillo normal de la tonalidad final, además pueden disminuir las solidez al lavado, sublimación y al frote propias de ese colorante.

El tratamiento usual se realiza con soda cáustica e hidrosulfito de sodio (lavado reductivo), con lo cual se puede destruir inmediatamente a los azo colorantes presentes (por la rotura de la unión azo). Sin embargo, colorantes dispersos derivados de la antraquinona no son totalmente destruidos por este tratamiento, si bien se solubilizan temporalmente en la forma leuco-alcalina. Los siguientes parámetros influyen de una manera importante el lavado reductivo final.

- Grado de agotamiento: debiera ser de un 100 % para reducir la necesidad de un lavado reductor final.
- Estabilidad de la dispersión de los colorantes: una excelente y fina dispersión de los colorantes disminuiría las posibilidades de agregación de los mismos durante la crítica fase de tintura a altas temperaturas.
- Buenas propiedades de difusión: en un colorante disperso minimizan la necesidad de un lavado reductivo final, esto se hace importante en el caso de los procesos de tintura rápida.
- Clase química de los colorantes: en particular hace que muchos de ellos puedan ser destruidos por un simple lavado alcalino final sin la necesidad del agregado de un agente reductor.

2.4.10. Consideraciones sobre las solideces de los colorantes

En cuanto a las solideces al lavado, los resultados se ven seriamente influidos por dos aspectos, en principio por el sistema de limpieza utilizado durante o después de la tintura y en segundo lugar por las propiedades térmicas de los colorantes. Termomigración es un término utilizado para describir la difusión de los colorantes dispersos hacia la superficie de la fibra luego de los diferentes tratamientos con calor que pudiera haber soportado el material teñido. El fenómeno de la termomigración permite que la solidez final de las telas teñidas

pueda volver a tener sus solidez al lavado originales con un lavado posterior. En cambio, la solidez a la sublimación está relacionada con el colorante en particular y es una característica propia del mismo, si bien en la práctica estos valores muestran una pequeña relación entre ellos.

La termomigración se encuentra determinada por un número de factores que incluyen la concentración del colorante, temperatura y duración del tratamiento térmico, concentración y tipo de agentes de acabado y, por supuesto, la naturaleza misma del colorante. El camino más práctico para medir las propiedades de termomigración de un colorante es cotejando su solidez al lavado, después de termofijar el material a las condiciones normales aplicadas internamente en estos casos.

Es importante llamar la atención sobre las solidez de los colorantes de alta energía, tradicionalmente con un comportamiento adecuado según los test de lavado, pero sujetos hoy día a las tendencias de la moda donde se realizan efectos cruzados y de contrastes de colores para ropa deportiva o ropa informal y adicionalmente, al lavado con el uso de detergentes que contienen perboratos. Todo esto obliga a realizar revisiones prácticas de los colorantes especialmente en cuanto a la solidez a la termomigración de los mismos. Condiciones extremas como temperaturas de fijación cercanas a los 200°C (o algo más), pueden, de alguna manera, ayudar a seleccionar aquellos colorantes de alta energía con propiedades superiores.

En la tintura de la fibra de poliéster existen oportunidades para aumentar la productividad por encima de los procedimientos tradicionales a través de la optimización de las condiciones de tintura y, especialmente, por la observación de los parámetros que regulan el proceso de tintura de la fibra, ya sea desde nivel laboratorio o bien nivel planta de proceso.

2.5. Teoría del color

El color es una percepción visual que se genera en el cerebro de los humanos y otros animales al interpretar las señales nerviosas que le envían los foto receptores en la retina del ojo que, a su vez, interpretan y distinguen las distintas longitudes de onda que captan de la parte visible del espectro electromagnético (la luz). Todo cuerpo iluminado absorbe una parte de las ondas electromagnéticas y refleja las restantes. Las ondas reflejadas son captadas por el ojo e interpretadas en el cerebro como distintos colores según las longitudes de ondas correspondientes.

2.5.1. Color

El ojo humano solo percibe las longitudes de onda cuando la iluminación es abundante. Con poca luz se ve en blanco y negro. En la denominada síntesis aditiva (comúnmente llamada "superposición de colores luz") el color blanco resulta de la superposición de todos los colores, mientras que el negro es la ausencia de color. En la síntesis sustractiva (mezcla de pinturas, tintes, tintas y colorantes naturales para crear colores) el blanco solo se da bajo la ausencia de pigmentos y utilizando un soporte de ese color mientras que el negro es resultado de la superposición de los colores cian, magenta y amarillo. La luz blanca puede ser descompuesta en todos los colores (espectro) por medio de un prisma.

2.5.2. Colorimetría

La colorimetría es la técnica de medición del color y esta estará en función de la fuente luminosa, de la característica de la materia del objeto y de las respuestas tricromaticas del observador. Estos datos, extremadamente precisos

y cuantificables, caracterizan perfectamente el color y pueden aparecer inútilmente precisos porque la experiencia demuestra que tres únicos valores numéricos bastan para identificar el aspecto coloreado de la superficie de un objeto o de una fuente de luz. Esta extraordinaria simplificación constituye el hecho fundamental de la visión tricromática, es decir, su trivarianza.

La mayoría de los profesionales de los oficios del color han entendido ahora el interés de la medición “objetiva” del color. Los debates conflictivos sobre el color pertenecen cada vez más al pasado ya que, gracias a la instrumentación colorimétrica moderna, los análisis y observación convergen y los debates se aplacan. Los tres principales componentes del color son:

- Luz
- Materia
- Observador

En efecto, los valores numéricos, y los métodos precisos permiten, sin ambigüedad un análisis exacto que hace posible la reproductividad y la comunicación del color.

Desde hace varios diseños, se sabe expresar un color por sus valores colorimétricos que traducen la claridad, el tono y la saturación. El color medido constituye un elemento concreto estable y manipulable cuyos componentes pueden comunicarse más fácilmente. Por ser el uso de la medición del color, la evaluación de las diferencias del color determinante en el control de calidad de los productos, se hizo necesario definir sistemas de cuantificación de las diferencias colorimétrica, conducentes a la aceptabilidad de los productos.

2.5.2.1. Sensación visual del color

Existen numerosos métodos de descripción de un color pero todos presentan la característica común de la utilización de tres datos para definir un espacio de representación específica de tres dimensiones. En la visión de los colores, la sensación visual interpreta la visión coloreada según:

- Su tono o tonalidad cromática (Hue)
- Su saturación o pureza (Croma)
- Su claridad (*Lightness*)

2.5.2.1.1. 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 psicosensores que corresponde aproximadamente a la longitud de onda dominante. La representación gráfica de las variaciones de tono puede esquematizarse mediante un círculo, llamado el círculo cromático.

2.5.2.1.2. 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. Su variación es lineal entre el punto neutro y el color puro, es independiente del tono y puede representarse por el radio del círculo cromático.

2.5.2.1.3. Claridad

Es el atributo de la sensación visual, según el cual un cuerpo puede transmitir o reflejar una fracción más o menos grande de la luz. A nivel psicosensoorial, la claridad define subjetivamente el carácter más o menos claro de la superficie de un objeto. Su variación lineal es independiente del tono y la saturación.

2.5.2.2. Metamerismo

La base científica de la medición del color se basa en la existencia de tres distintos grupos de señales procedentes del ojo de un observador humano. A fin de poder identificar la respuesta de los estímulos de color mediante valores numéricos, los valores de las fuerzas colorimétricas del ojo han sido normalizados e incorporados a la definición del “observador patrón” de la CIE.

El metamerismo está presente cuando dos objetos de curva espectral diferente presentan apariencias coloreadas idénticas en una condición definida de iluminación y de observación, y apariencias diferentes cuando cambian las condiciones de iluminación.

2.5.2.3. Espacio colorimétrico CIELAB

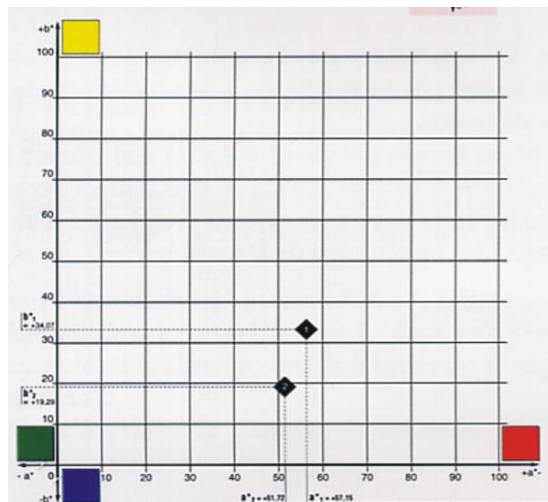
El espacio CIE 1976, llamado el sistema CIELAB, se basa en una transformación matemática del sistema CIE 1931. Mientras busca, mediante esta transformación, obtener un espacio uniforme en diferencias de colores, uno de los otros objetivos ha sido el de desarrollar un sistema mucho más fácil de interpretar y, al mismo tiempo, más fácil de referenciar. En el espacio CIELAB, se encuentra 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.

El sistema CIELAB también tiene las propiedades de un espacio euclidiano, cada uno de sus puntos puede referenciarse por sus coordenadas rectangulares L^* , a^* , b^* donde:

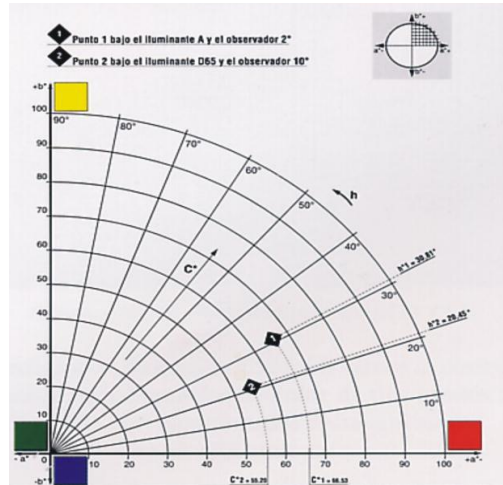
- L^* representa la claridad
- a^* representa el componente cromático rojo verde
- b^* representa el componente cromático amarillo- azul

Figura 13. **Sistema CIELAB en coordenadas cartesianas**



Fuente: LIRA, Renato. *Teoría del color*. p. 9.

Figura 14. Sistema CIELAB en coordenadas polares



Fuente: LIRA, Renato. *Teoría del color*. p. 9.

2.5.2.3.1. Tolerancia

En el sistema CIELAB, la diferencia total de color (ΔE^*) integra la diferencia de las tres variables independientes, en coordenadas rectangulares:

- Diferencia de claridad sobre el eje L^* expresada por ΔL^*
- Diferencia cromática rojo – verde sobre el eje a^* expresada por Δa^*
- Diferencia cromática amarillo – azul sobre el eje b^* expresada por Δb^*

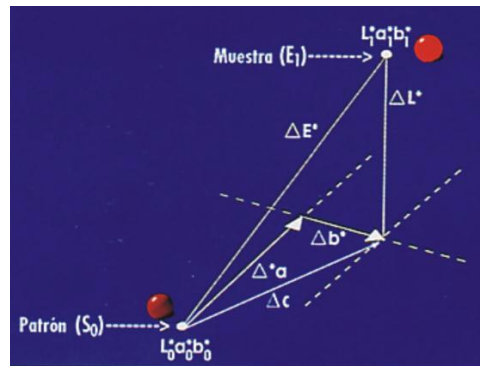
En coordenadas polares L^* , C^* , h :

- Diferencia de claridad sobre el eje L^* expresada por ΔL^* .
- Diferencia de croma – saturación sobre el radio C^* expresada por ΔC^* .
- Diferencia de ángulo de tono sobre h expresada por Δh y en grado de ángulo.

2.5.2.3.2. Modo $L^* a^* b^*$

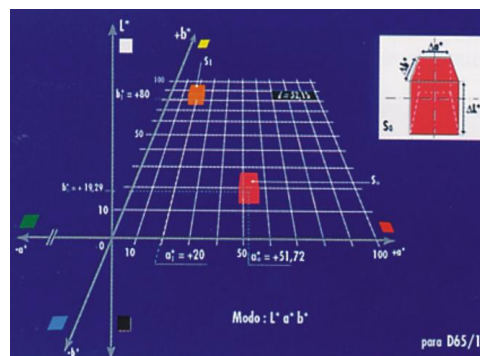
El modo de expresión en coordenadas rectangulares L^* , a^* , b^* de la diferencia de color retoma el concepto de los colores antagonistas de la visión; variación rojo-verde con proyección de la diferencia sobre el eje coordenado a^* y la variación amarillo-azul, con proyección de la diferencia sobre el eje b^* .

Figura 15. Diferencias en modo $L^* a^* b^*$



Fuente: LIRA, Renato. *Teoría del color*. p. 10.

Figura 16. Tolerancias en modo $L^* a^* b^*$



Fuente: LIRA, Renato. *Teoría del color*. p. 11.

Al expresar ΔL^* la diferencia de claridad, el signo de la diferencia muestra el sentido de la variación en relación a la percepción psicosensoresal; un valor negativo indicará una diferencia hacia lo oscuro, mientras que un valor positivo hacia lo claro.

Del mismo modo, las proyecciones sobre los otros dos componentes principales a^* y b^* que definen el plano cromático expresaran:

- Δa^* , la diferencia cromática rojo – verde
- Δb^* , la diferencia cromática amarillo – azul

El signo de la diferencia indica el sentido de la variación:

- Δa^* positivo, más rojo
- Δa^* negativo, más verde
- Δb^* positivo, más amarillo
- Δb^* negativo, más azul

Estos valores (Δa^* y Δb^*) pueden ser completados también por una información más global: la diferencia de cromacidad (Δc) resume sus respectivas contribuciones a la diferencia de variación cromática. La diferencia de cromaticidad (ΔC) representa, en la diferencia total de color (ΔE^*), la variación que no es debida a la claridad (ΔL^*). En la práctica, el modo de expresión de las diferencias de color $L^* a^* b^*$ es completado a menudo por los coloristas que asocian a las cuatro direcciones, rojo, verde, amarillo, azul.

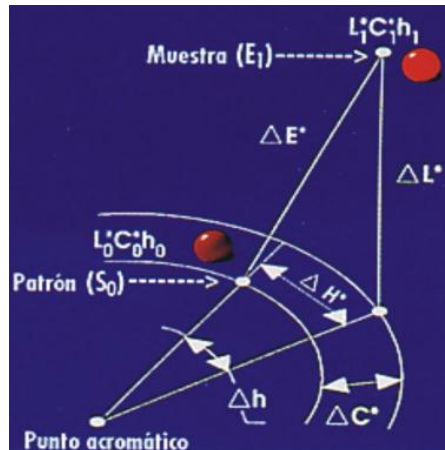
2.5.2.3.3. Modo L* C* h*

La utilización de coordenadas cilíndricas L* C* h en el espacio CIELAB, permite expresar el color y las diferencias de colores como se perciben visualmente y separar la diferencia de tono (ΔC^*); la diferencia de claridad (ΔL^*) y la de saturación (ΔC^*) en la total de color (ΔE^*). La diferencia total de color (ΔE^*) se descompone según sus componentes principales en:

- Diferencia de claridad: ΔL^* , de valor e interpretación idénticos a la expresión en L* a* b*.
- Diferencia de croma: ΔC^* , que representa la diferencia de las distancias desde cada punto de color hasta el eje de claridad.
- Diferencia de ángulo de tono: Δh , que representa la diferencia angular (en °) entre las direcciones de los vectores que designan los dos tonos por comparar. Este valor, transformado en diferencia de distancia para ser homogéneo respecto de los demás términos de la diferencia, se convierte en la diferencias de tono.

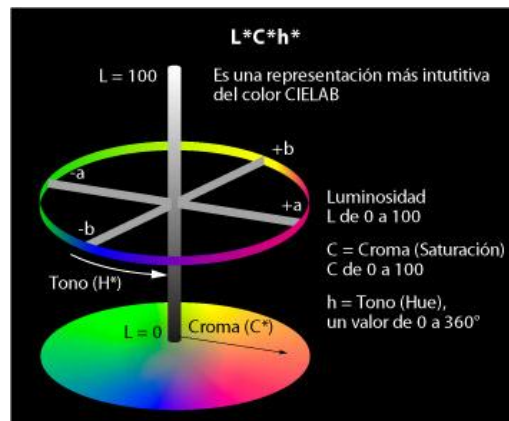
Esta descomposición de la diferencia total de color ΔE^* en ΔL^* , Δh^* , devuelve la expresión de las diferencias de color a la evaluación visual en la clasificación natural de los colores. De utilización sencilla y práctica, es el método más empleado.

Figura 17. **Modo $L^* C^* h^*$ en coordenadas polares**



Fuente: LIRA, Renato. *Teoría del color*. p. 12.

Figura 18. **Otra representación del modo $L^* C^* h^*$**



Fuente: Tomasino, C. "Chemistry & Technology of Fabric Preparation & Finishing". p. 23.

2.5.2.3.4. Sistema CMC

Las necesidades industriales en la búsqueda del control de calidad y la automatización de la aceptación de conformidad han conducido al aprovechamiento de los conocimientos más recientes de la neurofisiología de la visión.

Estudios sobre un número muy grande de estimaciones visuales han permitido entender y evaluar la sensibilidad de los criterios psicosensores de la visión de los colores. Estos estudios han dado lugar a la definición de los factores psicométricos (coeficientes de ponderación) de cada uno de los criterios de clasificación que serán integrados en el cálculo de la diferencia total de color (ΔE).

Las industrias en las que utilizan mucho las fórmulas de diferencias de colores, sea para evaluar las tolerancias o para automatizar la aceptación de conformidad (especialmente en la industria textil) y que emplean tradicionalmente el sistema CIELAB, llegaron a la conclusión de que las fórmulas de diferencias CIELAB generarán a veces errores.

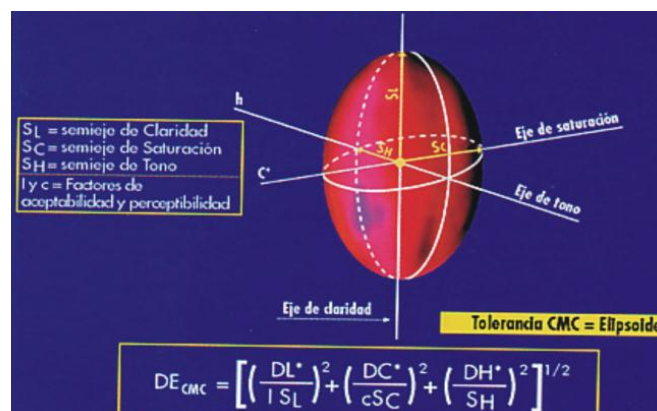
En el Reino Unido, donde investigaciones ininterrumpidas han sido realizadas desde 1970, una modificación de las fórmulas CIELAB ha sido elaborada progresivamente y después ensayada por decenas de miles de evaluaciones visuales, siendo por fin normalizada por la *British Standard Institution*. Este método, conocido primero bajo el nombre de JPC79, se denomina ahora CMC (*color measurement comité of the society of dyers and colourist*). En su principio el método implantado es sencillo. Se retoma la fórmula de base del cálculo de una diferencia total de color (ΔE) en el sistema CIELAB expresada en $L^* C^* H^*$, pero se ponderan las diferencias de claridad, croma y

tono mediante términos correctores, ligados ellos mismos a la claridad, el croma y el tono.

La diferencia de claridad (ΔL) solo es modificada por la claridad. Es menor para las claridades reducidas, siendo por el contrario – mayor para las claridades fuertes. Las diferencias de croma (ΔC) solo son modificadas por el croma, de forma muy generalizada, son menores en relación a CIELAB, salvo para los cromas que presentan un valor bastante reducido (inferior a 6). Se comprueba por último, que las diferencias de tono (ΔH^*) son modificadas por el ángulo de tono y por el croma. En particular, se observa que, para los anaranjados, las diferencias de tono son mayores con respecto a los tonos verdes.

Se puede concluir que el efecto de las diferencias de tono queda sensiblemente reducido en relación a CIELAB cuando los colores están bastante saturados.

Figura 19. **Aceptabilidad CMC**



Fuente: LIRA, Renato. *Teoría del color*. p. 13.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Definición de las variables en el proceso de tintura

Se determinaron las variables que se presentaron de manera directa e indirecta en el proceso de tintura, las variables que se modificaron y también las que se mantuvieron constantes y que conjuntamente influyeron en los resultados.

Tabla I. **Variables de para el desarrollo del modelo**

Variables	Indep.	Dep.	Ctes.	No ctes.	Resp.
Peso de la muestra			X		
Concentración de ácido	X			X	
pH		X		X	
Temperatura	X			X	
Duración	X			X	
Gradiente	X			X	
Tiempo de secado	X		X		
ΔA		X		X	X
ΔB		X		X	X
ΔC		X		X	X
ΔL		X		X	X
Aceptabilidad		X		X	X

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Variables manipuladas**

Variables	Dimensional	Rango de Variación
Concentración de ácido acético	g/L	0 – 1
Temperatura	°C	115 – 135
Duración	min	30 – 50
Gradiente	°C/min	1 – 3

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Variables de las propiedades y características**

Variables	Dimensional
pH	Adimensional
Tiempo de secado	min
Concentración de auxiliares	g/L
ΔA	Adimensional
ΔB	Adimensional
ΔC	Adimensional
ΔL	Adimensional

Fuente: elaboración propia.

3.2. **Delimitación del campo de estudio**

Consta del tratamiento de la materia prima utilizada y el procedimiento experimental que sufrió dicha materia prima para el desarrollo del modelo y el ajuste de los hiperplanos colorimétricos.

3.2.1. Tratamiento de materia prima

La materia prima como lo son el colorante en polvo, agentes auxiliares, ácido acético, agua destilada y la tela de poliéster serán proporcionados por la sección de laboratorio de color e investigación textil de la empresa.

El objetivo principal es el desarrollo de las curvas de colorimétricas y un modelo probabilístico. Para lograrlo se llevará a cabo el procedimiento a nivel laboratorio que se utiliza para manufacturar los tejidos a nivel planta procurando tener una reproducibilidad adecuada. Se variarán los cuatro parámetros principales del proceso (pH, temperatura, duración y gradiente); se prepararán separadamente las soluciones concentradas por medio de la mezcla de agua destilada y los colorantes en polvo. Posterior a esto se diluirá a la concentración indicada para luego preparar el baño de tinción mezclando los tres colorantes “tricromía” y sus respectivos agentes auxiliares dispersantes. Finalmente, se añade al baño la muestra de tela de poliéster para dar inicio al proceso de tintura.

3.2.2. Procedimiento experimental

Previo al proceso de tintura, se cortó las muestras de tela de poliéster tipo interlock virgen de peso estandarizado de 10 gramos.

3.2.3. Preparación del baño de tintura

Se prepararon las soluciones concentradas del grupo de colorantes de la tricromía por separado (rojo, amarillo y azul); luego se diluyó cada una al 1 % por medio de una pipeteadora electrónica. Posteriormente, se preparó el baño de tintura por medio de la adición de cada colorante en una proporción de 0,408 de rojo, 0,40 de azul y 0,332 de amarillo en solución diluida, más una porción de

ácido acético según la concentración deseada en cada corrida y 7,5ml de los agentes auxiliares dispersantes; 3,5 ml de avolan y 4,0ml de ablev. El baño de tintura se mezcló en un frasco de aluminio.

Figura 20. **Colorantes dispersos en solución concentrada**



Fuente: elaboración propia.

3.2.4. Proceso de tinción

Se añadieron las muestras de tela dentro de los frascos de aluminio y estos, a su vez, se ajustaron a la máquina teñidora en la cual se programó la temperatura, la duración y el gradiente. El proceso de tinción varió dependiendo de las corridas pero tardó un promedio de 40 minutos.

3.2.5. Lavado de muestras

Terminado el proceso de tinción, se extrajeron los frascos de aluminio y se dejaron sumergidos en agua fría durante 3 minutos. Luego se vaciaron los recipientes y se procedió a lavar las muestras con abundante agua por aproximadamente 30 segundos.

3.2.6. Secado de muestras

Se procedió a exprimir las muestras para la eliminación del excedente de agua; luego se introdujeron en un secador de bandejas por un tiempo de 45 minutos.

3.2.7. Lectura de muestras

Por medio del espectrofotómetro, se procedió a tomar la lectura de cada muestra de forma individualmente para obtener la información CIELAB tomando como punto de referencia un patrón previamente estandarizado del color en cuestión.

3.2.8. Operaciones unitarias en el proceso

El procedimiento que se llevó a cabo para determinar los hiperplanos colorimétricos y posteriormente el modelo probabilístico es el mismo que se utiliza a nivel planta para teñir normalmente, por lo cual las principales operaciones unitarias en el proceso son el mezclado, la tintura y el secado.

El equipo donde se llevó a cabo las operaciones unitarias del proceso es el siguiente:

- Un vaso de tinción de aluminio en el cual se preparó la muestra.
- Una máquina teñidora la cual simuló al reactor *batch* utilizado normalmente en la industria.
- Secador de bandejas en donde se simuló el proceso industrial de secado.

3.2.9. Manejo de productos y residuos

Las muestras de tela teñida se almacenarán para análisis, posteriormente se desecharán en la basura. Los residuos químicos de tintura se almacenarán en un recipiente para este fin, luego serán neutralizados y eliminados de una manera ecológicamente amigable.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador

Nombre:	Guido Renato Gini Cabrera
Correo electrónico:	grgini@gmail.com
Fecha de nacimiento:	4 de mayo de 1988
Nacionalidad:	guatemalteco
Profesión:	estudiante de Ingeniería Química Universidad de San Carlos de Guatemala

- Asesor

Nombre:	Víctor Hugo Ramírez Hunter
Correo electrónico:	victorr196@yahoo.com
Fecha de nacimiento:	13 de abril 1986
Nacionalidad:	guatemalteco
Profesión:	ingeniero químico colegiado no. 1578

3.4. Recursos físicos y materiales disponibles

A continuación se detallan específicamente los recursos disponibles para la investigación que se realizó en el laboratorio, describiendo las propiedades fisicoquímicas para cada reactivo.

3.4.1. Recursos físicos disponibles

La parte experimental de la investigación se llevó a cabo en el laboratorio químico de color la empresa TEJIDOS IMPERIAL, ubicada en la calzada Roosevelt 34-21 zona 11 de Guatemala, Guatemala. Este laboratorio contiene los instrumentos esenciales para llevar a cabo la las corridas de tintura, equipo que simula por completo las condiciones del proceso en planta así como un espectrofotómetro para análisis colorimétrico final.

3.4.2. Recursos materiales disponibles

A continuación se detallan los materiales utilizados para realizar las formulaciones de las tintas, tanto las sustancias como el equipo de laboratorio.

3.4.2.1. Materia prima

- Muestras de tejido a base de poliéster tipo interlock
- Colorantes dispersos tipo coralene en colores (rojo, azul y amarillo)
- Avolan® y Ablev® como agentes dispersantes

3.4.2.2. Reactivos

- Ácido acético
 - Fórmula química: $C_2H_4O_2$
 - Peso molecular: 60,05 g/mol
 - Punto de ebullición: 118 °C
 - Punto de fusión: 16 °C
 - Densidad relativa (agua = 1): 1 050,0 a 20 °C

3.4.2.3. Cristalería

- *Beackers*
- Balones aforados
- Probetas
- Pipetas
- Termómetros
- Tubos de ensayo
- Matraz Erlenmeyer

3.4.2.4. Equipo

- Pipeteadora automática computarizada
- Balanza analítica
- Vaso de tinción de aluminio
- Cronómetro
- Máquina teñidora
- Secador de bandejas
- Espectrofotómetro

3.4.2.5. Otros materiales

- Marcador textil
- Hojas de papel bond

3.5. Técnica cuantitativa y cualitativa

En esta sección se muestra en detalle la experimentación general de la investigación. El criterio de aceptabilidad fue la única técnica cualitativa en el estudio.

Tabla IV. Variables de las propiedades y características cuantitativas

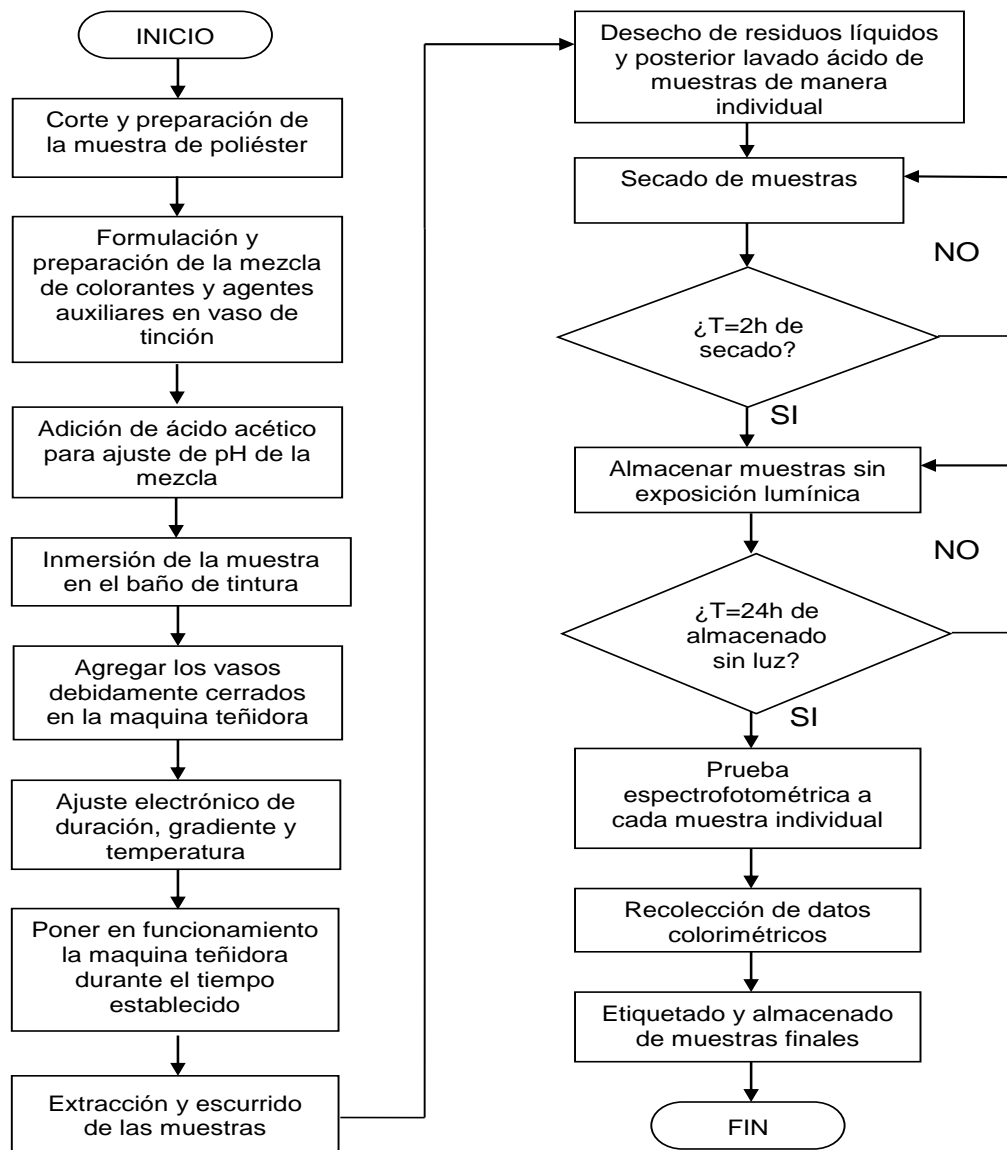
Técnica cuantitativa	Instrumento / Método	Cuantitativa	
		Continua	Discreta
Colorimetría	Espectrofotómetro	X	
pH	Potenciómetro	X	
Temperatura	Máquina teñidora	X	
Duración	Máquina teñidora	X	
Gradiente	Maquina teñidora	X	
Aceptabilidad	Espectrofotómetro		X

Fuente: elaboración propia.

3.5.1. Diseño experimental general

Logística de experimentación a nivel laboratorio, tanto en el proceso de tintura como la posterior lectura de muestras en el espectrofotómetro.

Figura 21. Diagrama de flujo del experimento



Fuente: elaboración propia.

3.5.2. Análisis del diseño experimental

Al haber realizado la primera parte experimental, se obtuvo un número determinado de muestras de tela teñida a partir de la tricromía de colorantes dispersos con la respectiva variación de condiciones en cada corrida. En la segunda parte experimental, luego de pasadas 24 horas, se evaluaron las propiedades colorimétricas de las muestras por medio del espectrofotómetro y se compararon cada uno de los parámetros con los del color ideal. Al finalizar, se etiquetó y almacenó cada una de las muestras.

3.5.3. Métodos y modelos de los datos según tipo de variables

La variación de algunas condiciones en la experimentación fue la base para el posterior desarrollo del modelo probabilístico y la generación de hiperplanos. Para cuantificar este proceso, se cuenta con variables que determinan en sí la incidencia de los resultados, proporcionando respuestas al fenómeno fisicoquímico que interactúa en la tintura de fibra de poliéster con colorantes dispersos.

3.5.3.1. Peso de la muestra

Variable: peso

Modelo: fuerza de campo por gravedad

Método: pesado de muestra

Explicación del método:

- Se cortó progresivamente un número de muestras de tela de poliéster sobre una balanza analítica hasta alcanzar el peso estándar de 10 gramos.

3.5.3.2. Concentración de ácido

Variable: mililitros de ácido

Modelo: análisis volumétrico

Método: volumetría

Explicación del método:

- Se programó la cantidad de ácido añadido utilizando la pipeteadora automática computarizada en un rango que fue desde los 0ml hasta los 5 ml, según el caso por cada baño de tintura.

3.5.3.3. Acidez

Variable: pH

Modelo: relación de Henderson-Hasselbach

Método: potenciómetro

Explicación del método:

- Se utilizó la relación de Henderson-Hasselbach para calcular la concentración teórica a un pH determinado.
- Se extrajo un volumen de ácido acético glacial utilizando la pipeteadora electrónica.

- Por último, con la ayuda un potenciómetro, se confirmó el pH real de la solución.

3.5.3.4. Temperatura

Variable: temperatura

Modelo: ley cero de la termodinámica

Método: lectura de termómetro

Explicación del método:

- Utilizando el termómetro incluido en la máquina teñidora, se observaron los cambios de temperatura dentro de los rangos establecidos en la experimentación que van de 115°C a 135°C.

3.5.3.5. Duración

Variable: tiempo

Método: medición con cronometro

Explicación del método:

- Por medio de un cronometro se procedió a medir el tiempo de teñido según cada corrida; dicho tiempo fluctuó entre los 30 a los 50 minutos.

3.5.3.6. Gradiente

Variable: gradiente

Modelo: primera y segunda ley de la termodinámica

Método: medición de temperatura por unidad de tiempo

Explicación del método:

- En la máquina teñidora se programó *a priori* cada uno de los gradientes de subida de temperatura según la corrida; dicho rango está comprendido entre los 0,5°C/min a 3°C/min.

3.5.3.7. Tiempo de secado

Variable: tiempo

Método: medición con cronómetro

- Utilizando el cronómetro se midió un tiempo constante de 45 minutos de residencia para las muestras teñidas de tela en el secador de bandejas.

3.5.3.8. Variables CIELAB

Variable: ΔA , ΔB , ΔC , ΔL

Modelo: espacio euclidiano CIELAB

Método: espectrofotometría

Explicación del método:

- Se iluminó la muestra con luz blanca durante 3 segundos.
- Se esperó otros 3 segundos hasta que los fotodetectores terminaron de percibir la señal.
- Transcurridos los 6 segundos, se obtuvo la lectura de forma digital.

3.5.3.9. Aceptabilidad

Variable: dicotómica si/no

Modelo: espacio euclidiano CIELAB

Método: espectrofotometría

Explicación del método:

- Se iluminó la muestra con luz blanca durante 3 segundos.
- Se esperó otros 3 segundos hasta que los fotodetectores terminaron de percibir la señal.
- Transcurridos los 6 segundos se obtuvo la lectura de forma digital de las variables CIELAB.
- Se solicitó a la computadora el cálculo de aceptabilidad e intervalo bidimensional.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Los datos que se obtuvieron en el proceso dependen de la cantidad de ácido acético añadido al baño de tintura, la temperatura de proceso, el gradiente y la duración del mismo. Una vez realizada la tintura de las muestras, se secó todo el lote de muestras por medio de un secador de bandejas. Finalmente, se realizó el análisis espectrofotométrico y se determinó la información colorimétrica CIELAB subdividida en parámetros y aceptabilidad. Los formatos en los cuales se tabularon los datos se presentan a continuación.

Tabla V. **Concentración de colorantes en el baño de tintura**

Color grey flannel 1 %		
Colorante azul	Colorante amarillo	Colorante rojo
%x1	%x2	%x3

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Ácido acético glacial para ajuste de pH ácido en el baño de tintura**

No.	CH ₃ COOH (ml)	pH inicial (adim)
1	ml1	x1
2	ml2	x2
3	ml3	x3
4	ml4	x4
5	ml5	x5

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Duración del proceso**

Corrida No.	1	2	3	4	5
Tiempo (min)	t1	t2	t3	t4	t5

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Temperatura en estado estable**

Corrida No.	1	2	3	4	5
T (°C)	T1	T2	T3	T4	T5

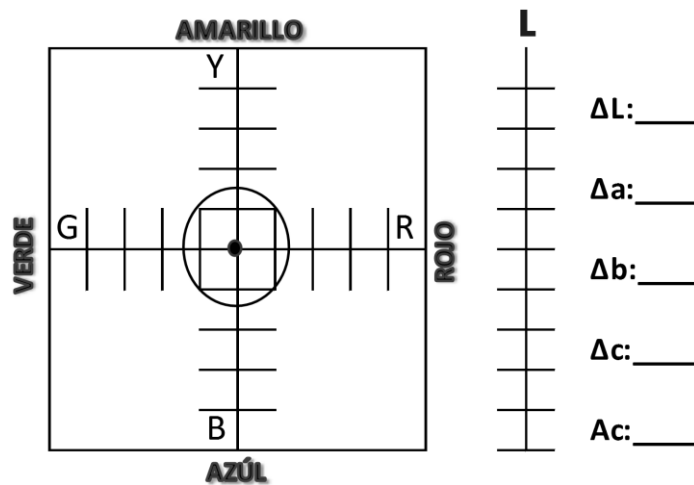
Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Gradiente de temperatura**

Corrida No.	1	2	3	4	5
gr (°C/min)	$\Delta T1$	$\Delta T2$	$\Delta T3$	$\Delta T4$	$\Delta T5$

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Formato para la recolección de la información CIELAB**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Presentación de los parámetros CIELAB**

No.	ΔA	ΔB	ΔC	ΔL	Aceptabilidad
1	ΔA_1	ΔB_1	ΔC_1	ΔL_1	si / no

Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación y procesamiento de la información

3.7.1. Microsoft Office Excel 2013

Se utilizó Microsoft Office Excel® 2013 como herramienta eficaz de análisis de datos, valores cuantitativos y estadística, que contiene la capacidad para generar informes y gráficos. Es frecuentemente utilizado por personas involucradas en el campo de la investigación. Con este programa se puede:

- Manipular de la data experimental de manera versátil
- Analizar descriptivamente los datos como tablas y gráficas

3.7.2. Micro Software QMS Eviews 9

Es un paquete estadístico para Microsoft Windows, usado principalmente para análisis econométrico. Combina tecnología de una hoja de cálculo con tareas encontradas en un software estadístico tradicional. Puede ser empleado para análisis estadístico general análisis econométrico, modelo de corte transversal, datos de panel, estimaciones y predicciones con modelos en series de tiempo entre otros. Se utilizara para:

- Análisis descriptivo adicional
- Aplicación de pruebas estadísticas
- Estimación de curvas
- Estimación del modelo probabilístico
- Algunas gráficas adicionales

3.7.3. StataCorp Stata 12

Es un paquete de software estadístico utilizado principalmente por instituciones académicas dedicadas a la investigación científica y económica entre otros. Stata permite, entre otras funcionalidades, la gestión de datos, el análisis estadístico, el trazado de gráficos y simulaciones. Se utilizará para:

- Contrastar estimaciones
- Comparación de parámetros
- Algunas gráficas

3.8. Análisis estadístico

El tratamiento estadístico por aplicar, una vez concluida la determinación de los resultados experimentales, estará conformada por una serie de análisis y pruebas previos al tratamiento de los datos; las cuales incluyen la ausencia de auto correlación, refutación de proceso Martingala y verificación de normalidad.

Una vez concluido el análisis sobre los datos experimentales se procederá a realizar, en el caso de los hiperplanos colorimétricos, la estimación por medio del método de mínimos cuadrados ordinarios aplicando luego las respectivas pruebas para la comprobación de los supuestos Gauss-Markov; esto con la finalidad de asegurar la obtención de estimadores MCO lineales, consistentes,

insesgados y óptimos. Dichas pruebas buscan determinar perturbaciones esféricas en los residuos por medio de los test de normalidad y heterocedasticidad en los errores.

Por otro lado, para el modelo probabilístico probit se utilizará un método no lineal de estimación como es la máxima verosimilitud. Finalmente se procederá a analizar los efectos marginales y sensibilidad de las variables exógenas dentro del modelo para definir criterios de aceptabilidad.

3.8.1. Análisis de autocorrelación

El término autocorrelación se define como la “correlación entre miembros de series de observaciones ordenadas en el tiempo (como en datos de series de tiempo) o en el espacio (como en datos de corte transversal)”. En el contexto de regresión, el modelo clásico de regresión lineal supone que no existe tal autocorrelación en las perturbaciones u_i , simbólicamente

[Ecuación 1]

$$cov(u_i, u_j | x_i, x_j) = E(u_i u_j) \neq 0 \quad i \neq j$$

Donde:

u_i = Perturbación en la serie i [adimensional]

u_j = Perturbación en la serie [adimensional]

x_i = Valor en la serie i [dimensionales varias]

x_j = Valor en la serie j [dimensionales varias]

Para este análisis se utiliza un correlograma. Este es una imagen de la correlación de estadísticas, también conocido como gráfico de autocorrelación, es una representación gráfica de las autocorrelaciones de la muestra frente al tiempo.

Figura 22. **Correlograma**

Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob	
		1	0.598	0.598	36.844	0.000
		2	0.364	0.010	50.634	0.000
		3	0.306	0.132	60.481	0.000
		4	0.432	0.313	80.310	0.000
		5	0.750	0.631	140.70	0.000
		6	0.428	-0.549	160.58	0.000
		7	0.234	0.065	166.59	0.000

Fuente: elaboración propia.

3.8.2. Distribución de los datos

A la hora de realizar una estimación por métodos lineales, es de suma importancia que los datos estén distribuidos de manera normal " $x_i \sim N(0, \sigma)$ "; esto se puede analizar por medio de pruebas estadísticas como el test de Jarque-Bera o el de Kolmogorov-Smirnov entre otros. Estos son ampliamente utilizados para analizar normalidad en los residuos de una regresión.

De manera menos formal se puede apreciar normalidad en los datos analizándolos descriptivamente por medio de los valores de sesgo y curtosis y gráficamente por medio de un histograma, gráfica Q-Q o a través de un gráfico de caja.

3.8.3. Refutación de un proceso martingala

Un martingala o proceso estocástico de tipo martingala es en el cual no hay deriva o tendencia específica y, por tanto, el mejor pronóstico a futuro siempre será el último dato disponible por lo que, si una serie de datos experimentales siguiera un proceso de esta naturaleza no tendría sentido tratar de explicar dicho fenómeno por medio de una estimación.

Es por ello que, a través del test de ratio de variación planteado por Lo-Mackinlay, cuya hipótesis nula indica un martingala es posible rechazar o no este proceso en una serie de datos.

[Ecuación 2]

$$H_0 = mp$$

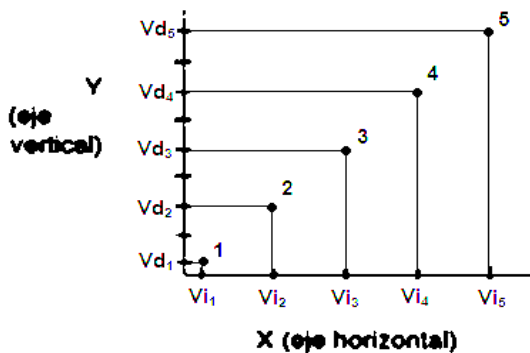
$$H_1 \neq mp$$

3.8.4. Estimación por mínimos cuadrados (MCO)

Mínimos cuadrados es una técnica de análisis numérico enmarcada dentro de la optimización matemática, en la que, dados un conjunto de pares ordenados: variable independiente, variable dependiente, y una familia de funciones, se intenta encontrar la función continua, dentro de dicha familia, que mejor se aproxime a los datos (un "mejor ajuste"), de acuerdo con el criterio de mínimo error cuadrático. La técnica de mínimos cuadrados se usa comúnmente en el ajuste de curvas.

El análisis de regresión se utiliza también para comprender cuáles de las variables independientes están relacionadas con la variable dependiente, y explorar las formas de estas relaciones. En circunstancias especiales, el análisis de regresión puede utilizarse para inferir correlación entre las variables independientes y dependientes. La regresión se determina en base al diagrama de dispersión, el cual se grafica a partir de la relación de las puntuaciones de una muestra en dos variables. El diagrama de dispersión se construye graficando cada par de puntuaciones en un espacio plano o plano bidimensional.

Figura 23. **Diagrama de dispersión**



Fuente: elaboración propia.

3.8.5. **Análisis de heterocedasticidad en los residuos**

En estadística se dice que un modelo de regresión lineal presenta heterocedasticidad cuando la varianza de las perturbaciones no es constante a lo largo de las observaciones. Esto implica el incumplimiento de una de las hipótesis básicas sobre las que se asienta el modelo de regresión lineal. De ella se deriva que los datos con los que se trabaja son heterogéneos, ya que provienen de distribuciones de probabilidad con distinta varianza.

El test de White es la prueba más general para detectar la heterocedasticidad en los modelos de regresión lineal en la cual la hipótesis nula indica residuos homocedasticos

[Ecuación 3]

$$H_0 = \sigma_i^2 = \sigma^2$$

$$H_1 = \sigma_i^2 \neq \sigma^2$$

3.8.6. Análisis de normalidad en los residuos

Para la obtención de estimadores eficientes se debe asegurar que los residuos están distribuidos de manera normal, lo cual se puede probar a través de un histograma o bien utilizando un test de hipótesis.

El test de Jarque-Bera es una prueba de bondad de ajuste que compara si el sesgo y la curtosis concuerdan con los parámetros de una distribución normal. La hipótesis nula del test indica que los residuos se distribuyen de forma normal.

[Ecuación 4]

$$H_0: x_i \sim N(0, \sigma)$$

$$H_1: x_i \sim \neg N(0, \sigma)$$

3.8.7. Modelo probit de respuesta cualitativa binaria

El modelo probit pertenece a la familia de modelos probabilísticos no lineales, los cuales se caracterizan por explicar una variable dicotómica por medio de la utilización de una función de distribución acumulativa (FDA). Para este caso específico se utilizará la distribución normal, ya que al tratarse de una serie de datos experimentales de corte transversal sin estructura, puede favorecerse el supuesto de normalidad en los residuos, lo cual justifica la utilización de dicha función en lugar de otra.

En un modelo de respuesta binaria, el interés yace principalmente en la probabilidad de respuesta dada:

[Ecuación 5]

$$P(y = 1|x) = P(y = 1|x_1, x_2, \dots, x_k)$$

Donde “x” denota el conjunto total de variables explicativas y “y” a la variable respuesta. Ahora bien, considerando una clase de modelos de respuesta binaria de la forma

[Ecuación 6]

$$P(y = 1|x) = G(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k) = G(\beta_0 + x\beta)$$

Donde G es una función que asume valores estrictamente entre cero y uno $0 < G(z) < 1$, para todos los números reales z. Esto asegura que las probabilidades de respuesta estimada se encuentren estrictamente dentro de ese

conjunto compacto. En el modelo probit, como se indicó anteriormente, es la función acumulativa normal estándar definida de la siguiente manera:

[Ecuación 7]

$$G(z) = \Phi(z) \equiv \int_{-\infty}^z \varphi(v)dv$$

Donde $\Phi(z)$ es la densidad normal estándar es:

[Ecuación 8]

$$\Phi(z) = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{z^2}{2}}$$

Las funciones G son funciones crecientes. Cada una aumenta con más rapidez en $z=0$ a medida que el valor de z tiende al infinito.

El modelo probit puede derivarse a partir de un modelo de variable latente subyacente; sea y^* una variable inobservable, o latente, determinada por:

[Ecuación 9]

$$y^* = \beta_0 + \mathbf{x}\boldsymbol{\beta} + e, \quad y = 1[y^* > 0]$$

La función indicador asume el valor de uno si el evento dentro de los corchetes es verdadero y cero si no es. Por lo tanto, y es uno si $y^* > 0$ y es cero si $y^* \leq 0$. Se supone que e es independiente de x y que e tiene la distribución

normal estándar, en cualquier caso, e se distribuye simétricamente en torno a cero, lo cual significa que $1 - G(-z) = G(z)$ para todos los números reales z .

En la mayoría de las aplicaciones de los modelos de respuesta binaria, la meta principal es explicar los efectos de la x_j sobre la probabilidad de respuesta $P(y=1|x)$. La formulación de la variable latente tiende a dar la impresión de que lo que principalmente interesa son los efectos de cada x_j sobre y^* .

Para hallar el efecto parcial de las variables aproximadamente continuas sobre la probabilidad de respuesta, es necesario recurrir al cálculo. Si x_j es una variable aproximadamente continua, su efecto parcial sobre $p(x) = P(y = 1|x)$ se obtiene de la derivada parcial:

[Ecuación 10]

$$\frac{\partial p(x)}{\partial x_j} = g(\beta_0 + x\beta)\beta_j, \quad \text{donde} \quad g(z) \equiv \frac{dG}{dz}(z)$$

3.8.8. Estimación por máxima verosimilitud

Debido a la naturaleza no lineal de estos modelos, no puede utilizarse el método de mínimos cuadrados ordinarios ni ponderados. Se podrían usar las versiones no lineales de estos métodos, pero no es más difícil usar la estimación por máxima verosimilitud, aunque sí se estableció que, bajo los supuestos del modelo lineal clásico, el estimador de mínimos cuadrados es el de máxima verosimilitud (condicional a las variables explicativas). Para estimar modelos de variables dependientes limitadas, los métodos de máxima verosimilitud son indispensables. Como la estimación de máxima verosimilitud está basada en la distribución de y dada x , la heterocedasticidad en $\text{Var}(y|x)$ automáticamente se toma en cuenta.

Para obtener el estimador de máxima verosimilitud, condicional sobre las variables explicativas, se necesita la densidad de y_i dada x_i . Esto se puede escribir como:

[Ecuación 11]

$$f(y|x_i; \beta) = [G(x_i\beta)]^y [1 - G(x_i\beta)]^{1-y}, y = 0, 1,$$

Donde, por simplicidad, se absorbe el intercepto en el vector x_i . se puede ver con facilidad que cuando $y=1$, se obtiene $G(x_i \beta)$ y cuando $y=0$, se obtiene $1 - G(x_i \beta)$.

3.8.9. Efectos parciales y criterios de aceptabilidad

Al ser un modelo no lineal, la interpretación de los coeficientes no es directa y únicamente indica la dirección; para los efectos marginales se evalúa en la función de distribución de densidad y luego se multiplica por cada coeficiente.

4. RESULTADOS

4.1. Preparación de las muestras de tintura

Nota: en cada uno de los grupos experimentales compuesto de 25 corridas, se permitió el movimiento de una única variable exógena de las cuatro disponibles en la metodología con la finalidad de capturar el efecto y la participación de cada una de ellas en el proceso de tintura. Las otras tres restantes se dejaron constantes (en un sentido determinista) a valores que empíricamente son considerados óptimos, los cuales son:

- pH de 4,5
- Temperatura de estado estable de 135°C
- Duración de 40 min
- Gradiente de 1,5 °C / min

Tabla XII. **Concentración de colorantes en el baño**

Color <i>grey flannel</i> 1 %		
colorante azul	colorante amarillo	colorante rojo
0,40 %	0,332 %	0,408 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Grupo No.1 variación de pH**

No.	CH ₃ COOH (g/L)	pH (adim)	T (°C)	t (min)	gr (°C/min)
1	0,00	7,25	135,00	40,00	1,50
2	0,00	7,30	135,00	40,00	1,50
3	0,00	7,24	135,00	40,00	1,50
4	0,00	7,00	135,00	40,00	1,50
5	0,00	7,15	135,00	40,00	1,50
6	0,25	5,00	135,00	40,00	1,50
7	0,25	4,98	135,00	40,00	1,50
8	0,25	4,98	135,00	40,00	1,50
9	0,25	4,99	135,00	40,00	1,50
10	0,25	4,98	135,00	40,00	1,50
11	0,50	4,54	135,00	40,00	1,50
12	0,50	4,50	135,00	40,00	1,50
13	0,50	4,52	135,00	40,00	1,50
14	0,50	4,51	135,00	40,00	1,50
15	0,50	4,50	135,00	40,00	1,50
16	0,75	4,30	135,00	40,00	1,50
17	0,75	4,31	135,00	40,00	1,50
18	0,75	4,29	135,00	40,00	1,50
19	0,75	4,31	135,00	40,00	1,50
20	0,75	4,31	135,00	40,00	1,50
21	1,00	4,16	135,00	40,00	1,50
22	1,00	4,15	135,00	40,00	1,50
23	1,00	4,18	135,00	40,00	1,50
24	1,00	4,19	135,00	40,00	1,50
25	1,00	4,16	135,00	40,00	1,50

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Grupo No.2 variación de temperatura**

No.	CH ₃ COOH (g/L)	pH (adim)	T (°C)	t (min)	gr (°C/min)
26	0,50	4,50	115,00	40,00	1,50
27	0,50	4,50	115,00	40,00	1,50
28	0,50	4,50	115,00	40,00	1,50
29	0,50	4,50	115,00	40,00	1,50
30	0,50	4,50	115,00	40,00	1,50
31	0,50	4,50	120,00	40,00	1,50
32	0,50	4,50	120,00	40,00	1,50
33	0,50	4,50	120,00	40,00	1,50
34	0,50	4,50	120,00	40,00	1,50
35	0,50	4,50	120,00	40,00	1,50
36	0,50	4,50	125,00	40,00	1,50
37	0,50	4,50	125,00	40,00	1,50
38	0,50	4,50	125,00	40,00	1,50
39	0,50	4,50	125,00	40,00	1,50
40	0,50	4,50	125,00	40,00	1,50
41	0,50	4,50	130,00	40,00	1,50
42	0,50	4,50	130,00	40,00	1,50
43	0,50	4,50	130,00	40,00	1,50
44	0,50	4,50	130,00	40,00	1,50
45	0,50	4,50	130,00	40,00	1,50
46	0,50	4,50	135,00	40,00	1,50
47	0,50	4,50	135,00	40,00	1,50
48	0,50	4,50	135,00	40,00	1,50
49	0,50	4,50	135,00	40,00	1,50
50	0,50	4,50	135,00	40,00	1,50

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Grupo No.3 variación de la duración**

No.	CH ₃ COOH (g/L)	pH (adim)	T (°C)	t (min)	gr (°C/min)
51	0,50	4,50	135,00	30,00	1,50
52	0,50	4,50	135,00	35,00	1,50
53	0,50	4,50	135,00	40,00	1,50
54	0,50	4,50	135,00	45,00	1,50
55	0,50	4,50	135,00	50,00	1,50
56	0,50	4,50	135,00	30,00	1,50
57	0,50	4,50	135,00	35,00	1,50
58	0,50	4,50	135,00	40,00	1,50
59	0,50	4,50	135,00	45,00	1,50
60	0,50	4,50	135,00	50,00	1,50
61	0,50	4,50	135,00	30,00	1,50
62	0,50	4,50	135,00	35,00	1,50
63	0,50	4,50	135,00	40,00	1,50
64	0,50	4,50	135,00	45,00	1,50
65	0,50	4,50	135,00	50,00	1,50
66	0,50	4,50	135,00	30,00	1,50
67	0,50	4,50	135,00	35,00	1,50
68	0,50	4,50	135,00	40,00	1,50
69	0,50	4,50	135,00	45,00	1,50
70	0,50	4,50	135,00	50,00	1,50
71	0,50	4,50	135,00	30,00	1,50
72	0,50	4,50	135,00	35,00	1,50
73	0,50	4,50	135,00	40,00	1,50
74	0,50	4,50	135,00	45,00	1,50
75	0,50	4,50	135,00	50,00	1,50

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Grupo No.4 variación del gradiente**

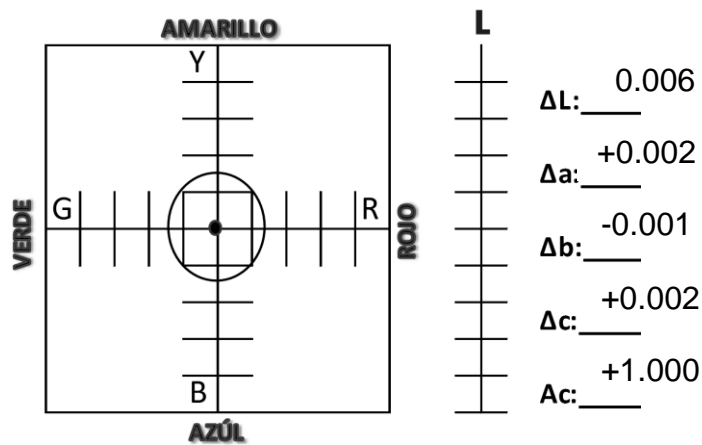
No.	CH ₃ COOH (g/L)	pH (adim)	T (°C)	t (min)	gr (°C/min)
76	0,50	4,50	135,00	40,00	1,00
77	0,50	4,50	135,00	40,00	1,50
78	0,50	4,50	135,00	40,00	2,00
79	0,50	4,50	135,00	40,00	2,50
80	0,50	4,50	135,00	40,00	3,00
81	0,50	4,50	135,00	40,00	1,00
82	0,50	4,50	135,00	40,00	1,50
83	0,50	4,50	135,00	40,00	2,00
84	0,50	4,50	135,00	40,00	2,50
85	0,50	4,50	135,00	40,00	3,00
86	0,50	4,50	135,00	40,00	1,00
87	0,50	4,50	135,00	40,00	1,50
88	0,50	4,50	135,00	40,00	2,00
89	0,50	4,50	135,00	40,00	2,50
90	0,50	4,50	135,00	40,00	3,00
91	0,50	4,50	135,00	40,00	1,00
92	0,50	4,50	135,00	40,00	1,50
93	0,50	4,50	135,00	40,00	2,00
94	0,50	4,50	135,00	40,00	2,50
95	0,50	4,50	135,00	40,00	3,00
96	0,50	4,50	135,00	40,00	1,00
97	0,50	4,50	135,00	40,00	1,50
98	0,50	4,50	135,00	40,00	2,00
99	0,50	4,50	135,00	40,00	2,50
100	0,50	4,50	135,00	40,00	3,00

Fuente: elaboración propia.

4.2. Determinación de los parámetros CIELAB

Nota: los valores que se presentan a continuación se obtuvieron utilizando técnica espectrofotométrica, por lo que pueden variar ligeramente dependiendo del equipo que se utilice. Estos se presentan como desviaciones o diferencias respecto de parámetros estándar del color.

Tabla XVII. **Lectura del espectrofotómetro para la muestra estandarizada**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Parámetros CIELAB de la muestra estandarizada**

No.	ΔA	ΔB	ΔC	ΔL	aceptabilidad
1	0,00	0,00	0,00	0,01	Sí

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Parámetros CIELAB Grupo No. 1**

No.	Δa	Δb	Δc	ΔL	aceptabilidad
1	0,54	0,13	-0,56	0,46	No
2	0,53	-0,01	0,53	0,49	Sí
3	0,60	-0,13	0,61	0,69	Sí
4	0,59	0,07	-0,59	0,51	Sí
5	0,44	-0,06	0,44	0,51	Sí
6	-0,06	-0,13	0,14	0,14	No
7	0,02	-0,15	0,15	0,19	Sí
8	0,10	-0,18	0,21	0,41	Sí
9	0,04	-0,22	0,22	0,36	Sí
10	0,10	0,12	-0,16	0,50	Sí
11	0,00	-0,12	0,12	0,11	No
12	0,15	0,17	-0,23	0,25	Sí
13	0,17	0,54	-0,57	0,51	No
14	0,03	0,20	-0,20	0,30	Sí
15	0,12	-0,05	0,13	0,29	Sí
16	0,03	-0,08	0,09	0,11	No
17	0,02	-0,09	0,09	0,11	Sí
18	0,04	-0,10	0,11	0,26	Sí
19	0,06	-0,04	0,07	0,16	Sí
20	0,08	-0,09	0,12	0,27	Sí
21	0,00	0,07	-0,07	0,22	No
22	0,02	-0,03	0,04	0,12	Sí
23	0,04	-0,07	0,08	0,31	Sí
24	0,13	-0,01	0,13	0,25	Sí
25	0,10	0,07	-0,12	0,53	Sí

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Parámetros CIELAB Grupo No. 2**

No.	Δa	Δb	Δc	ΔL	aceptabilidad
26	-0,03	-0,23	0,23	0,25	Sí
27	-0,01	-0,31	0,31	0,34	Sí
28	-0,06	-0,28	0,29	0,25	Sí
29	0,01	-0,19	0,19	0,27	Sí
30	-0,12	-0,31	0,33	0,39	Sí
31	-0,06	-0,16	0,17	0,23	No
32	-0,1	-0,27	0,29	0,25	No
33	0,02	0,06	-0,06	0,29	Sí
34	-0,16	-0,41	0,44	0,35	Sí
35	0,03	-0,10	0,10	0,47	Sí
36	0,05	-0,24	0,25	0,19	No
37	-0,04	-0,09	0,10	0,35	Sí
38	0,09	0,00	-0,09	0,17	Sí
39	-0,05	-0,26	0,26	0,38	Sí
40	0,06	0,20	-0,21	0,24	No
41	0,06	0,04	-0,07	0,10	Sí
42	-0,01	-0,09	0,09	0,31	No
43	-0,01	0,02	-0,02	0,08	No
44	0,02	0,23	-0,23	0,39	Sí
45	0,07	0,42	-0,43	0,35	Sí
46	0	-0,12	0,12	0,11	No
47	0,15	0,17	-0,23	0,25	Sí
48	0,17	0,54	-0,57	0,51	Sí
49	0,03	0,20	-0,20	0,30	No
50	0,12	-0,05	0,13	0,29	Sí

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Parámetros CIELAB Grupo No. 3**

No.	Δa	Δb	Δc	ΔL	aceptabilidad
51	0,05	-0,04	0,06	0,23	Sí
52	0,06	0,02	-0,06	0,18	Sí
53	0,04	-0,21	0,21	0,18	Sí
54	0,14	0,50	-0,52	1,22	Sí
55	0,03	-0,26	0,26	0,28	Sí
56	0,01	-0,19	0,19	0,16	Sí
57	0,02	-0,05	0,05	0,15	Sí
58	0,03	-0,20	0,20	0,27	Sí
59	0,01	-0,19	0,19	0,22	Sí
60	0,00	-0,05	0,05	0,17	Sí
61	0,00	-0,12	0,12	0,11	Sí
62	0,15	0,17	-0,23	0,25	Sí
63	0,17	0,54	-0,57	0,51	No
64	0,03	0,20	-0,20	0,30	Sí
65	0,12	-0,05	0,13	0,29	Sí
66	-0,02	-0,05	0,05	0,06	No
67	-0,05	0,14	-0,15	0,20	Sí
68	0,00	0,00	0,00	0,31	Sí
69	0,05	-0,23	0,24	0,30	Sí
70	0,28	0,08	-0,29	0,32	Sí
71	0,05	-0,21	0,22	0,18	No
72	-0,07	0,10	-0,12	0,24	Sí
73	0,01	-0,08	0,08	0,20	Sí
74	0,06	-0,17	0,18	0,24	No
75	0,12	0,17	-0,21	0,29	Sí

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Parámetros CIELAB Grupo No. 4**

No.	Δa	Δb	Δc	ΔL	aceptabilidad
76	0,11	0,27	-0,29	0,58	No
77	0,17	0,32	-0,36	3,05	Sí
78	0,19	0,17	-0,25	0,24	Sí
79	0,23	-0,21	0,31	0,39	Sí
80	0,28	-0,02	0,28	0,34	Sí
81	0,00	-0,12	0,12	0,11	No
82	0,15	0,17	-0,23	0,25	Sí
83	0,17	0,54	-0,57	0,51	No
84	0,03	0,20	-0,20	0,30	No
85	0,12	-0,05	0,13	0,29	No
86	0,12	-0,19	0,22	0,18	No
87	0,29	-0,03	0,29	0,57	No
88	0,12	-0,34	0,36	0,32	No
89	0,12	0,27	-0,30	0,40	Sí
90	0,18	-0,21	0,28	0,25	No
91	0,08	-0,13	0,15	0,17	No
92	0,11	-0,23	0,25	0,25	Sí
93	0,09	-0,11	0,14	0,22	No
94	0,11	0,16	-0,19	0,22	Sí
95	0,16	-0,10	0,19	0,25	Sí
96	0,13	0,19	-0,23	0,24	No
97	0,15	-0,21	0,26	0,22	Sí
98	0,17	-0,29	0,34	0,28	No
99	0,14	-0,04	0,15	0,15	Sí
100	0,15	-0,01	0,15	0,35	Sí

Fuente: elaboración propia.

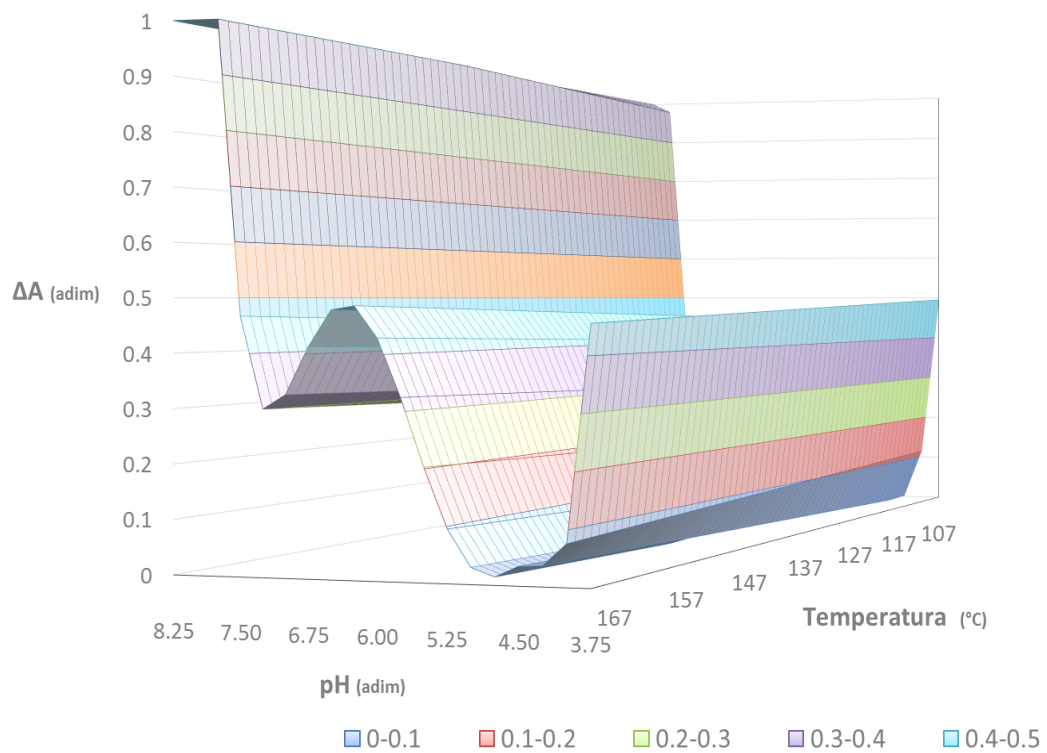
4.3. Hiperplanos colorimétricos determinísticos

Tabla XXIII. Ajuste para el componente rojo-verde (ΔA)

estimación	$\Delta A = \sqrt{-0,03pH^4 + 0,69pH^3 - 5,63pH^2 + 19,96pH + 0,001\frac{T}{2} - 26,21}$
R ²	0,9046

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Hiperplano del componente rojo-verde (ΔA)



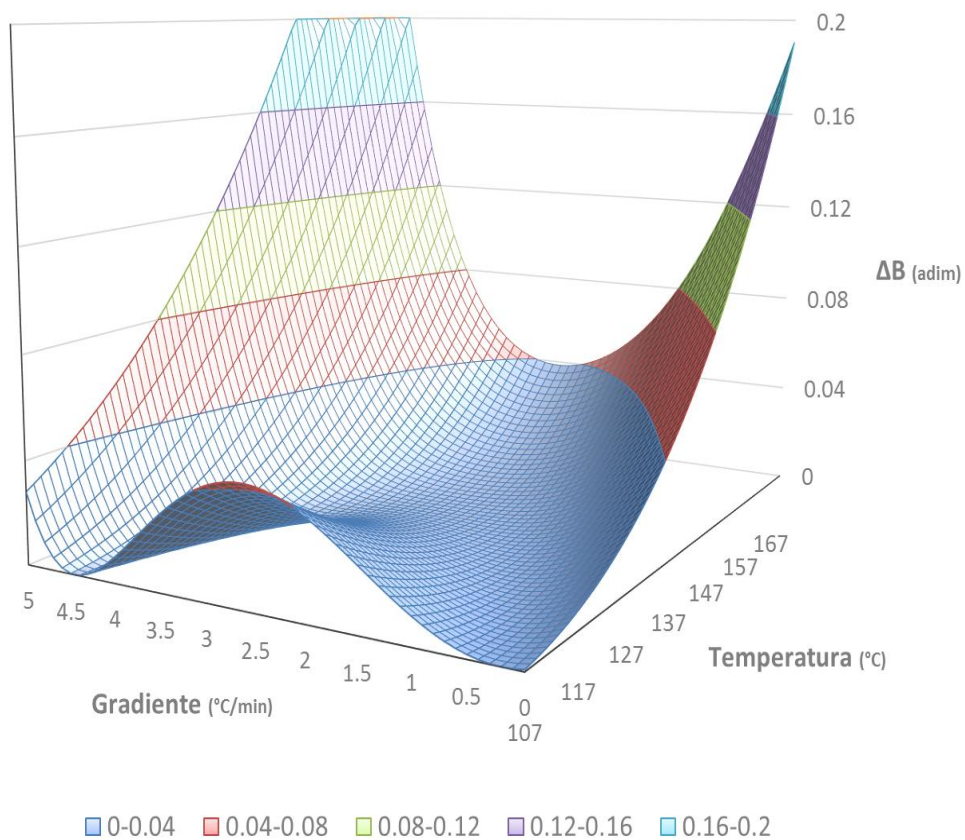
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Ajuste para el componente amarillo-azul (ΔB)**

estimación	$\Delta B = \left(-0,27 \frac{\nabla T^3}{2} + 0,01 \frac{\nabla T}{2} + 0,0002 T^{\frac{8}{5}} - 0,34 \right)^2$
R ²	0,6346

Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Hiperplano del componente amarillo-azul (ΔB)**



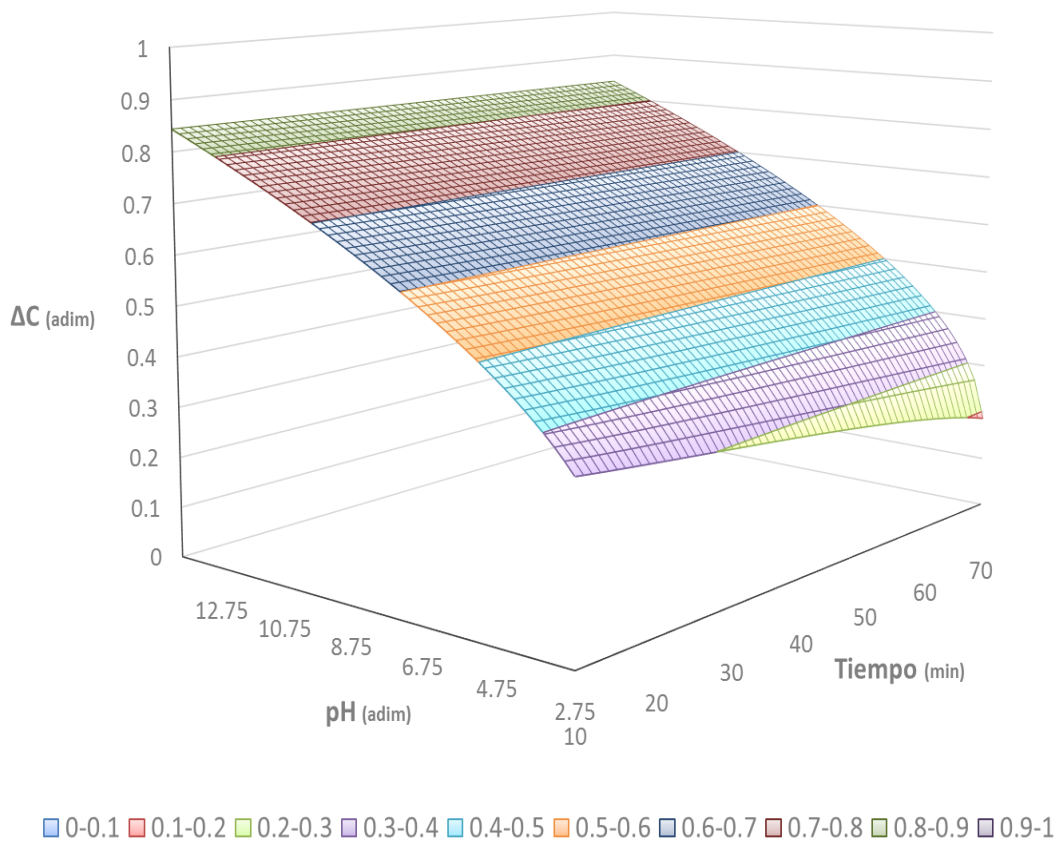
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Ajuste para el componente cromasaturación (ΔC)**

estimación	$\Delta C = \sqrt[4]{0,003pH^2 - 0,007t^{\frac{1}{2}}}$
R ²	0,6941

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Hiperplano del componente cromasaturación (ΔC)**



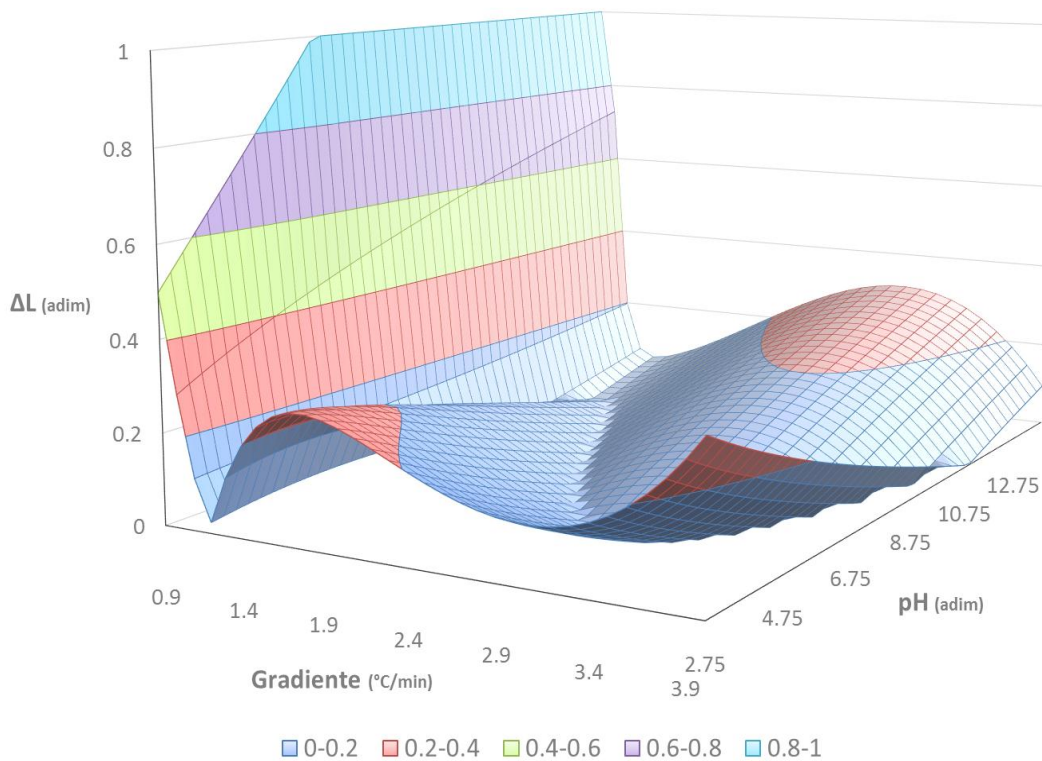
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Ajuste para el componente de claridad (ΔL)**

estimación	$\Delta L = -0,06\nabla T^3 + 0,32\nabla T^2 - 1,01 \frac{\nabla T}{2} + 0,69\nabla T^{-(\nabla T * pH)} + 0,21 \frac{pH}{2}$
R ²	0,6489

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Hiperplano del componente de claridad (ΔL)**



Fuente: elaboración propia.

4.4. Modelo probabilístico probit

Nota: lo que se realizó fue la conversión de la variable aceptabilidad en una dicotómica convencional, luego se estimó por el método de máxima verosimilitud los coeficientes de los regresores y finalmente se expresa el resultado transformado, tanto en su forma analítica como en su forma aproximada.

Tabla XXVII. Estimación de los regresores

pH	-0,99
t	+0,04
T	+0,034
∇T	-0,084
c	-0,92
pseudo R ² de Mcfadden	0,2565

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. Resultado del modelo

Forma analítica	$P_{accept} = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{(z)^2}{2}} dz$
Forma aproximada	$P_{accept} = 100 \left(0,5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(z)^{2n+1} (-1)^n}{(2n+1)(2^n)n!} \right] \right)$
Valor z	$-0,99pH + 0,04t + 0,034T - 0,084\nabla T - 0,92$

Fuente: elaboración propia.

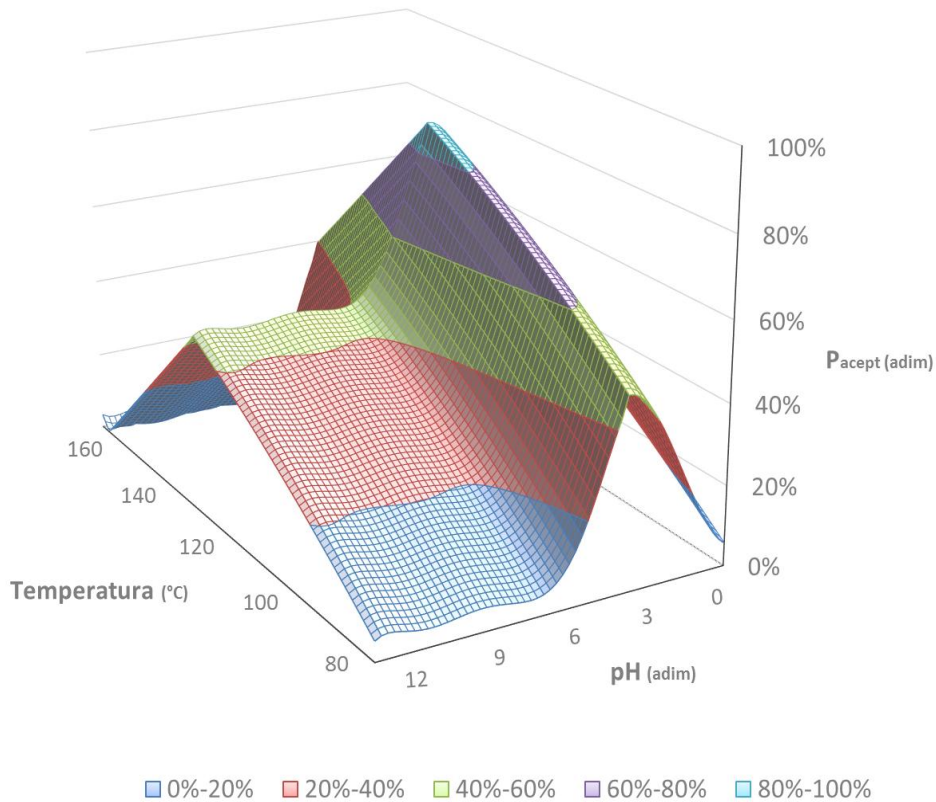
Tabla XXIX. **Modelo variando pH y temperatura**

$$P_{accept} = 100 \left(0,5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-0,99pH + 0,04t + 0,034T - 0,084\nabla T - 0,92)^{2n+1} (-1)^n}{(2n+1)(2^n)n!} \right] \right)$$

t	40 min
∇T	1,5 °C/min

Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Probabilidad de aceptación variando pH y temperatura**



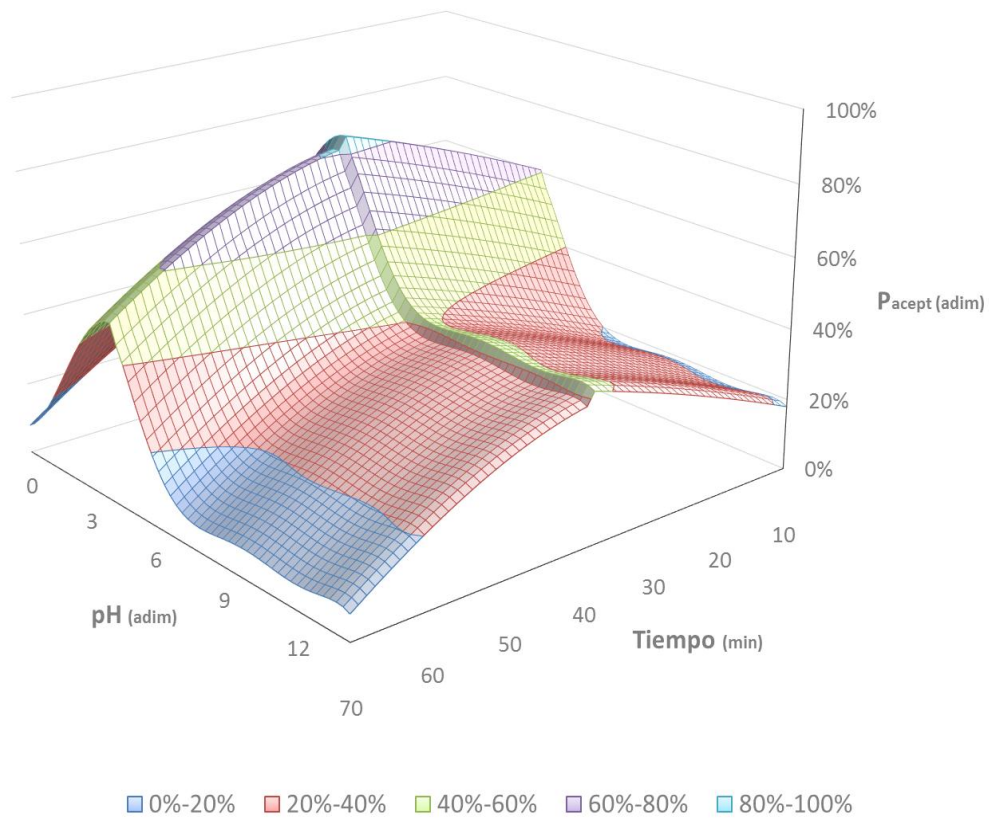
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Modelo probabilístico variando pH y tiempo**

$P_{accept} = 100 \left(0,5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-0,99pH + 0,04t + 0,034T - 0,084\nabla T - 0,92)^{2n+1} (-1)^n}{(2n+1)(2^n)n!} \right] \right)$	
T	135 °C
∇T	1,5 °C/min

Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Probabilidad de aceptación variando pH y tiempo**



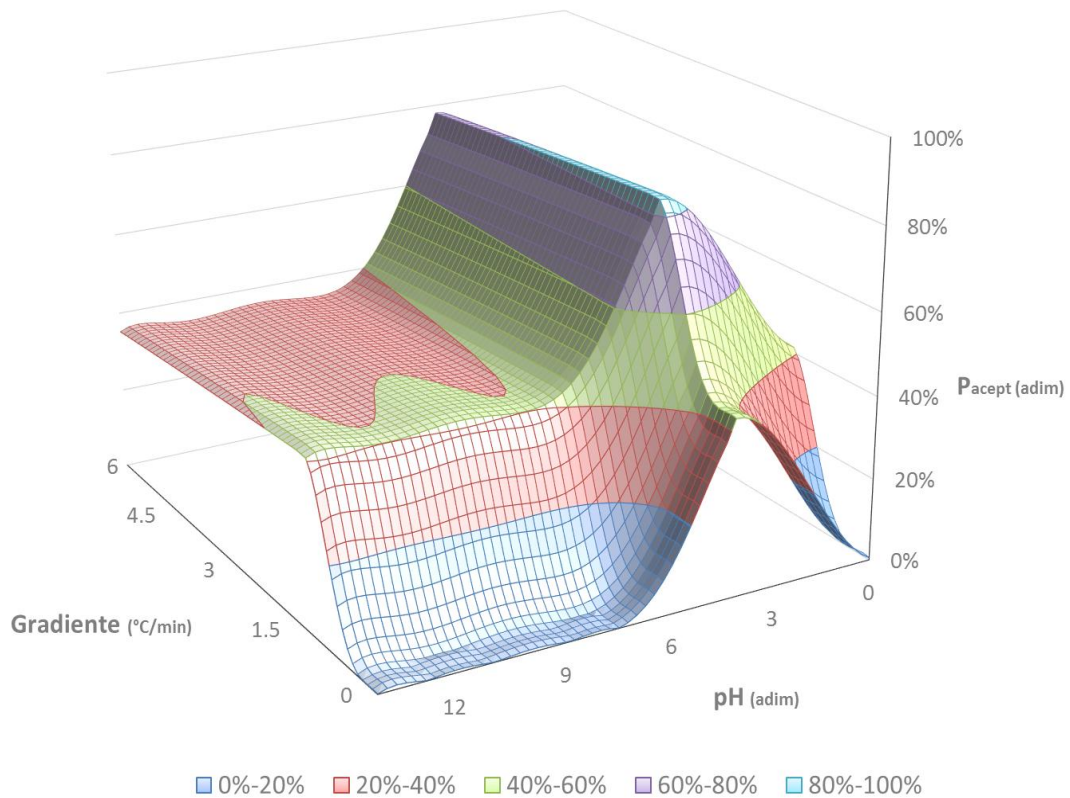
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Modelo probabilístico variando pH y gradiente**

$P_{accept} = 100 \left(0,5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-0,99pH + 0,04t + 0,034T - 0,084\sqrt{T} - 0,92)^{2n+1} (-1)^n}{(2n+1)(2^n)n!} \right] \right)$	
T	135 °C
t	40 min

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Probabilidad de aceptación variando pH y gradiente**



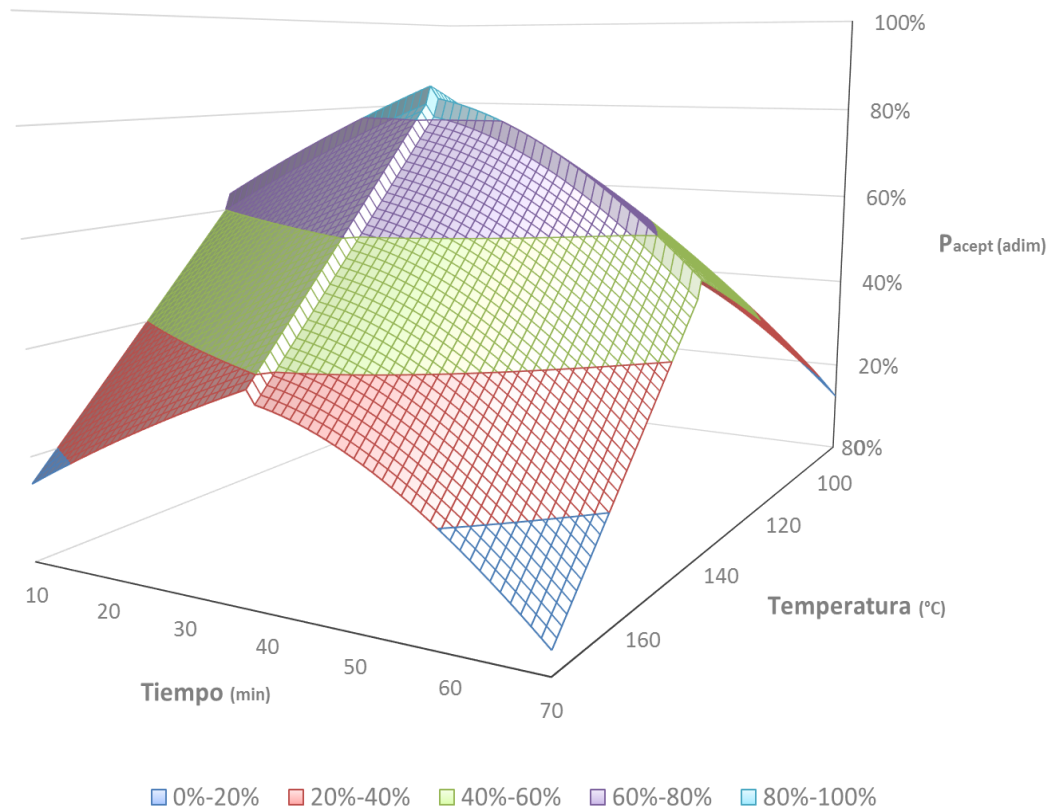
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Modelo probabilístico variando temperatura y tiempo**

$P_{accept} = 100 \left(0,5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-0,99pH + 0,04t + 0,034T - 0,084\nabla T - 0,92)^{2n+1} (-1)^n}{(2n+1)(2^n)n!} \right] \right)$	
pH	4,5
∇T	1,5 °C/min

Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Probabilidad de aceptación variando temperatura y tiempo**



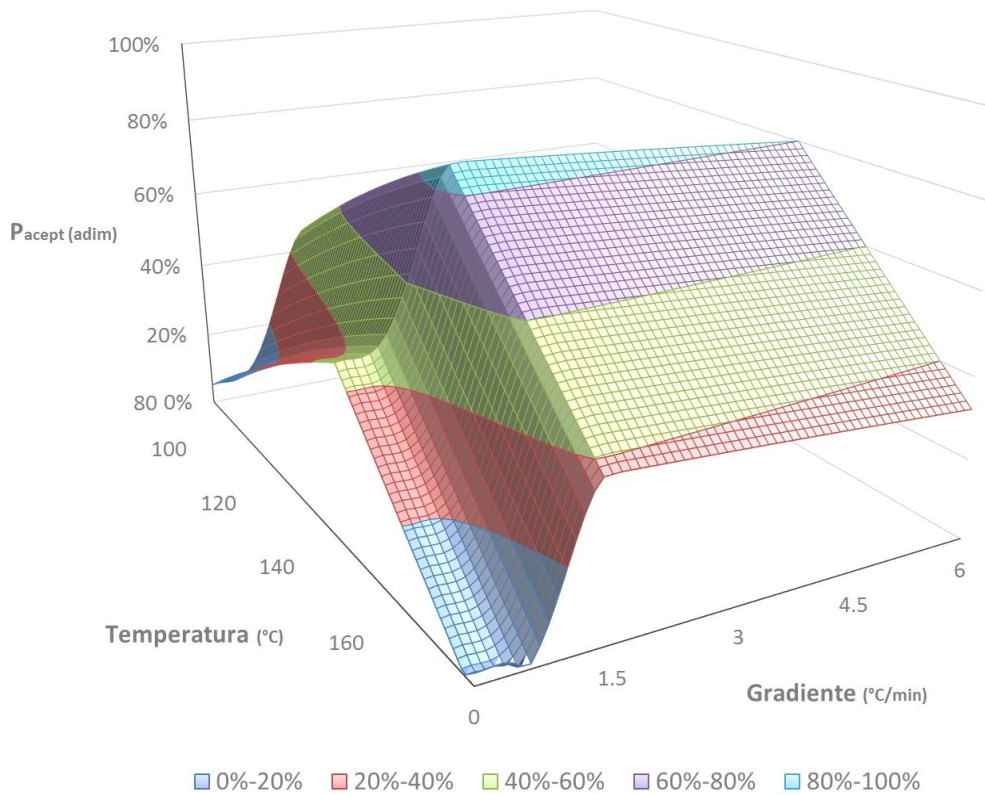
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Modelo probabilístico variando temperatura y gradiente**

$P_{accept} = 100 \left(0,5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-0,99pH + 0,04t + 0,034T - 0,084\nabla T - 0,92)^{2n+1} (-1)^n}{(2n+1)(2^n)n!} \right] \right)$	
pH	4,5
t	40 min

Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Probabilidad de aceptación variando temperatura y gradiente**



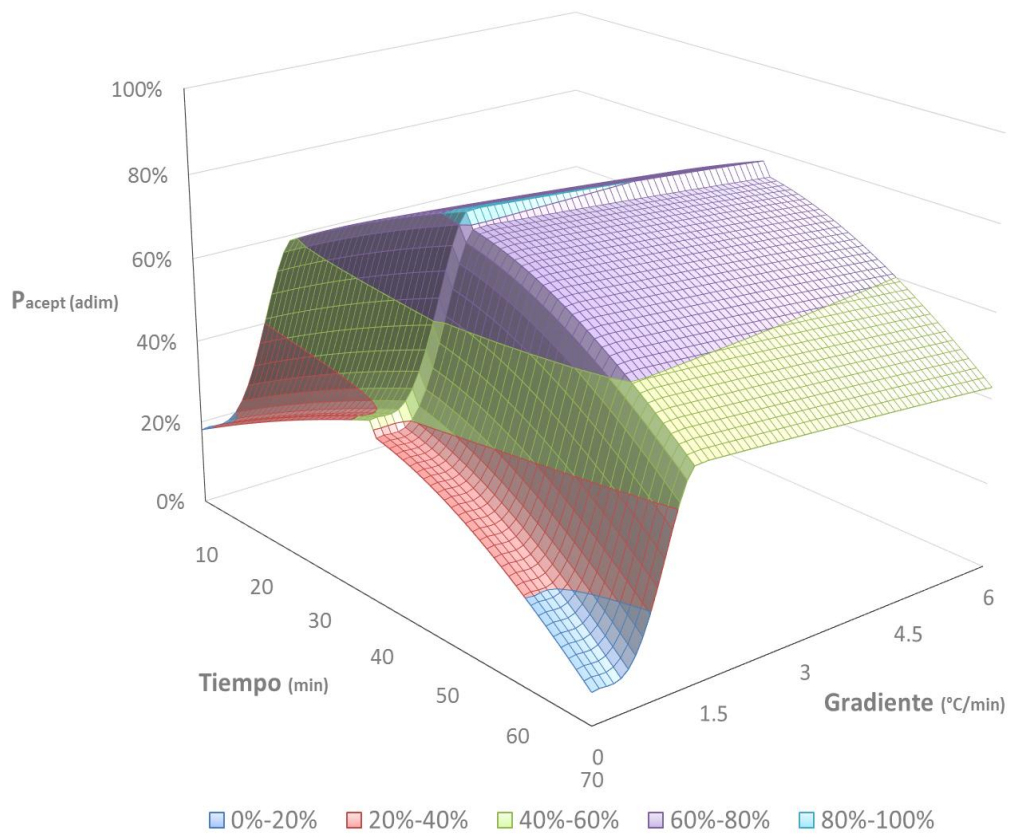
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Modelo probabilístico variando tiempo y gradiente**

$P_{accept} = 100 \left(0,5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-0,99pH + 0,04t + 0,034T - 0,084\nabla T - 0,92)^{2n+1} (-1)^n}{(2n + 1)(2^n)n!} \right] \right)$	
pH	4,5
T	135°C

Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Probabilidad de aceptación variando tiempo y gradiente**



Fuente: elaboración propia.

4.5. Efectos parciales, óptimos y sensibilidad de las variables

Nota: los efectos parciales representan el cambio sobre la probabilidad de aceptación por ligeras desviaciones en cada una de las variables. Dichas desviaciones corresponden a la mínima unidad de medida controlable en el laboratorio.

Tabla XXXV. Efectos parciales marginales

variable	valor empírico óptimo	desviación	Efecto en P_{accept}
pH	4,5	+ 0,1	-2,11 %
T	135 °C	- 1 °C	-0,49 %
t	40 min	- 1 min	-0,90 %
∇T	1,5 °C/min	+ 0,5 °C/min	-0,91 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. Valores teóricos óptimos

variable	valor teórico
pH	4,216
T	133,741 °C
t	40,213 min
∇T	1,617 °C/min

Fuente: elaboración propia.

Nota: el cálculo de la sensibilidad de las variables exógenas es información cualitativa la cual surge del análisis del efecto parcial marginal promedio (no confundir con el efecto marginal parcial en el promedio).

Tabla XXXVII. **Sensibilidad de las variables exógenas**

variable	sensibilidad
pH	+++
T	+
t	++
∇T	++

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se realizaron cien muestras de tintura a nivel laboratorio utilizando tela de poliéster tipo interlock a partir de una mezcla a base de agua destilada, ácido acético, agentes auxiliares y la tricromía de colorantes dispersos conformada por rojo, amarillo y azul en proporciones predefinidas para la obtención del color *grey flannel*, como lo muestra la tabla XII en la sección de resultados.

Generalmente, la tintura de fibras de poliéster con colorantes dispersos se lleva a cabo en ciertas condiciones de proceso determinadas de manera empírica por los maestros tintoreros y estas pueden diferir ligeramente de un lugar a otro; por lo tanto, cuando se diseñó y construyó la parte experimental se procuró que permitiese un análisis del tipo *ceteris paribus* con el objeto de capturar el efecto que cada variable aporta al resultado final. Esto puede apreciarse en las tablas XIII, XIV, XV y XVI en la sección de resultados en donde se permitió la variación de una única condición por tabla.

Para la determinación de parámetros CIELAB, primero se obtuvieron los valores de una muestra estandarizada proporcionada por el fabricante de los colorantes, como puede apreciarse en las tablas XVII y XVIII. Estos valores son estadísticamente cero, lo cual indica que, tal y como se esperaba a priori, estos coincidieron de manera cuasi perfecta con los parámetros CIELAB teóricos del espectrofotómetro.

Al analizar la lectura de las 100 muestras experimentales se obtuvieron 31 que no entraron en el rango de aceptación, además de valores, tanto positivos como negativos en la desviación de los parámetros; como puede observarse en

las tablas XIX, XX, XXI y XXII lo cual evidenció la existencia de valores máximos relativos o puntos óptimos dentro del intervalo en el cual se variaron las condiciones de proceso.

Respecto de los hiperplanos colorimétricos determinísticos, se generaron 4 con el objeto de modelar el comportamiento endógeno de los parámetros CIELAB con las variables de proceso exógenas a través de una regresión múltiple estimada por MCO. Cabe destacar que, luego de realizar las pruebas de significancia estadística, se observó que no todas las variables afectaron en igual cuantía a cada parámetro, por lo que se tomaron las dos más significativas a modo de obtener una representación gráfica en el espacio euclídeo R^3 .

El parámetro rojo-verde (ΔA) exhibió una fuerte dependencia con el pH y la temperatura del proceso, logrando así un buen ajuste en la regresión como puede apreciarse en la tabla XXIII. Nótese que el pH mostró un comportamiento polinomial y a pesar de ser menor el aporte de la temperatura, este fue estadísticamente significativo. Al analizar el hiperplano se puede intuir fácilmente esta relación ya que la gráfica mantiene en gran medida su forma funcional a lo largo del eje de profundidad con ligeras variaciones en la parte baja provocadas por el efecto de la temperatura. El punto mínimo se encontró en la 3-tupla $(pH, T, \Delta A) = (4,75; 146; 0,00010)$.

El parámetro amarillo azul (ΔB), por su parte, se vio afectado en mayor medida por el gradiente y la temperatura aunque esto no fue garantía para un buen ajuste como puede observarse en la tabla XXIV. En el hiperplano se puede intuir el marcado efecto del gradiente cuando la temperatura de proceso se encuentra en algún punto extremo (muy baja o muy alta) lo cual disparó al alza el parámetro. El punto mínimo se encontró en la 3-tupla $(\nabla T, T, \Delta B) = (2,6; 142; 0)$.

La cromia-saturación (ΔC) presentó una considerable dependencia respecto al pH y en menor medida al tiempo, logrando un módico ajuste que, si bien no fue alto, es conceptualmente valioso ya que muestra la dirección en la cual disminuye el valor de la diferencia de dicho parámetro. Al analizar el hiperplano en la figura 26 nótese que este es monótono decreciente en el intervalo mostrado sin exhibir ningún mínimo o máximo relativo y únicamente valores absolutos. Su punto mínimo se encontró en la 3-tupla $(pH, t, \Delta C) = (2,75; 70; 0,18640)$.

En valor de claridad (ΔL) se vio fuertemente afectado por el gradiente y en menor medida por el nivel de acidez, como se muestra en la tabla XXVI. La figura 27 muestra que en el hiperplano se logró distinguir más de un extremo relativo lo cual es un hecho interesante sobre el fenómeno ya que indica que pueden coexistir varios puntos pseudo óptimos a la hora de teñir y que pueden inducir a errores en la práctica. Además, cuando el gradiente fue menor que $1^\circ\text{C}/\text{min}$ o mayor que $3^\circ\text{C}/\text{min}$ se disparó al alza el parámetro, por lo que se pudo acotar una zona bien definida de valores “aceptables” y “estables” dentro de este rango. El punto mínimo se encontró en la 3-tupla $(\nabla T, pH, \Delta L) = (2,1; 8,25; 0,00052)$.

En términos generales, luego de abordar el fenómeno por medio de estimaciones MCO y la generación de hiperplanos determinísticos, se puede afirmar que conformaron un análisis valioso para formar una idea general del comportamiento de las variables de proceso involucradas y su vinculación con los parámetros CIELAB, mas no representaron necesariamente una base de cálculo robusta, confiable e infalible a la hora de pronosticar, o bien, intentar determinar condiciones de aceptabilidad, dada la naturaleza estocástica inherente de todo proceso físico-químico la cual lo impide. Esta última idea quedó evidenciada con los valores de coeficiente de determinación de los ajustes, los cuales fueron de moderados a bajos a excepción del ajuste para ΔA .

En lo que respecta al modelo probabilístico, la estimación por máxima verosimilitud dio como resultado coeficientes para cada una de las variables de proceso que conformaron la función de transición como se muestra en la tabla XXVII, con un pseudo R^2 de Mcfadden de 0,2565, el cual es un valor alto para esta clase de regresiones. No confundir con el coeficiente de determinación R^2 de las estimaciones MCO ya que conceptualmente son dos cosas diferentes y, por lo tanto, poseen distinta interpretación.

Este análisis fue de naturaleza no lineal y dado que el fundamento del modelo se basó en el ajuste de valores Z, se hizo necesaria la transformación del contradominio hacia un conjunto cerrado y acotado entre 0 y 1 definido en una distribución normal como se muestra en la tabla XXVIII. Ahí cada valor z calculado con la información experimental fue un parámetro que regresó la probabilidad de aceptación en función de los parámetros espectrofotométricos de forma aproximada por medio de una serie de Taylor y de forma analítica por medio de la integral impropia de la distribución acumulativa normal.

Con la finalidad de que el análisis fuese óptimo, versátil e intuitivo y que tomase en cuenta todas las posibilidades que un maestro tintorero tiene en planta, se presentaron los resultados dejando dos variables fijas y dos libres dando un total de 6 combinaciones posibles (${}_4C_2$). Cabe resaltar que, debido a la naturaleza de la metodología y a su planteamiento, esta admitiría muchos otros análisis que por su extensión no fueron incluidos en este estudio.

Cuando se modeló el pH y la temperatura fijando el tiempo y gradiente como se muestra en la tabla XXIX, se observó que conforme aumenta el nivel de acidez, específicamente cuando se rompe la barrera de la neutralidad en 7, existió un crecimiento cuadrático de la probabilidad que se mantuvo hasta 4,25 luego del cual descendió suavemente en forma constante.

De manera similar se logró percibir un incremento lineal respecto de la temperatura que se mantuvo hasta alcanzar los 134°C; posterior a esto disminuyó rápidamente. Como se muestra en la figura 28, la máxima probabilidad de aceptación registrada bajo las condiciones descritas fue de 87,36 %.

Al analizar el comportamiento respecto del tiempo y al pH manteniendo fijas las demás variables como se muestra en la tabla XXX, se observó un incremento constante de la probabilidad de aceptación hasta que se alcanzó un tiempo de 39 minutos, luego del cual comenzó a decaer en forma polinomial; el pH exhibió un comportamiento muy similar al caso cuando se varió la temperatura descrito en el párrafo anterior en el cual se alcanzó un máximo a pH 4,25 como lo muestra la figura 29. El máximo valor de probabilidad en estas condiciones fue de 84,48 %.

Al modelar el gradiente de calor y el pH se apreció un rápido incremento de la probabilidad en el rango comprendido entre los 0°C/min y los 1,5°C/min encontrando su punto máximo en 1,6°C/min como muestra la figura 30, posterior a este intervalo comenzó a descender paulatinamente. Ahora bien, el pH contribuyó a un incremento de la probabilidad en medio ácido, específicamente en el intervalo entre 7 y 3 encontrando su máximo en 4,25, coincidiendo el punto óptimo con el de las anteriores modelaciones. La máxima probabilidad alcanzada en las condiciones descritas fue de 83,56 %.

La aceptación respecto del tiempo y de la temperatura se caracterizó por presentar una forma casi simétrica en el espacio euclídeo R^3 , similar a un paraboloides elíptico como se puede apreciar en la figura 31. Esta superficie mostró transiciones suaves desde casi todos los puntos, lo cual indica que cada una de las variables mantuvo un aporte más o menos constante hasta que se alcanzó el valor de máxima probabilidad de 86,42 % cuando la temperatura fue de 135°C y el tiempo alcanzó los 38 minutos.

Cuando se modeló el gradiente y la temperatura como se aprecia en la tabla XXXIII se observó que, mientras la temperatura mantuvo una transición moderada alcanzando un valor máximo en 134°C, el gradiente presentó un incremento brusco entre el intervalo de 0,5°C/min a 2°C/min con un valor máximo en 1,6°C/min. Al analizar la figura 32 se puede percibir que la superficie presentó una forma de cascada con una probabilidad máxima de 85,54 % lo cual implicaría que, a la hora de realizar una tintura, fijar el gradiente en primera instancia sería una buena estrategia para conseguir el resultado esperado.

Al modelar el gradiente y el tiempo como se muestra en la tabla XXXIV, la probabilidad de aceptación exhibió un comportamiento muy similar al del análisis gradiente-temperatura explicado en el párrafo anterior con la pequeña diferencia que el tiempo presentó transiciones aún más suaves que la temperatura pero mantuvo la forma de cascada. El valor máximo de probabilidad fue de 82,65 % con un tiempo de 39 minutos y un gradiente de 1,5°C/min como lo muestra la figura 33 en la sección de resultados.

Como se pudo apreciar, el análisis de la probabilidad de aceptación de una muestra terminada en función de variables de proceso por medio de un modelo probit, no se limitó a la obtención de las condiciones óptimas de tintura, sino que fue más allá obteniendo también el conjunto de trayectorias posibles que pudiera seguir el fenómeno fisicoquímico. Esta información resultaría muy valiosa en la práctica a la hora de realizar ajustes de último momento para rescatar o mejorar un lote a través del aumento subyacente de probabilidad, minimizando el número de reprocesos necesarios lo cual, a su vez, optimizaría el uso de materias primas y reduciría costos.

Adicional al modelo probit en sí, se realizó un análisis de sus efectos parciales marginales para conocer la contracción que sufriría la probabilidad de aceptación de una muestra terminada ocasionada por ligeras variaciones en las condiciones empíricamente óptimas de proceso, tal y como se muestra en la tabla XXXV. Para que dicho análisis tuviera una interpretación realista se tomaron variaciones sobre la mínima unidad controlable en el laboratorio y en la dirección en la cual se reportó que es más común el error, aunque cabe señalar que no sería el único análisis posible.

Los resultados mostraron que, en el punto óptimo empírico, una variación de un décimo en el pH ocasionaría una contracción del 2,11 % en la probabilidad, mientras que una variación tanto de 1 minuto en el tiempo como de 5 décimos en el gradiente tendrían casi el mismo efecto a la baja de aproximadamente 0,90 %. En lo que respecta a la temperatura, esta exhibiría la magnitud más baja de contracción con aproximadamente 0,50 %. Cabe recordar la naturaleza no lineal del modelo el cual toma en cuenta el vector de características (eigenvector) por lo que, al evaluar efectos parciales en cualquier otro punto (en otras condiciones de proceso) estos serían diferentes.

Utilizando el modelo probit, se calcularon los valores teóricos que maximizarían la probabilidad, logrando un 90,3 % de aceptación en contraste con el 84,7 % que se obtuvo al utilizar los valores empíricos. Dichos valores óptimos teóricos no difirieron sustancialmente de los valores iniciales como lo muestra la tabla XXXVI. El pH óptimo se situó casi 3 décimas por debajo del inicial llegando a un valor de 4,216; la temperatura fue ligeramente menor con una cifra de 133,74°C, el tiempo óptimo fue superior aunque solo por 13 segundos y finalmente, el gradiente presentó un leve incremento alcanzando una cifra de 1,617 °C/min.

Cabe resaltar que al tratarse de valores teóricos muchos de ellos son difíciles o imposibles de alcanzar con el equipo disponible por lo cual, a la hora de realizar una tintura, estos tendrían que aproximarse a la unidad de medida más cercana posible dependiendo del instrumento.

La sensibilidad de las variables exógenas (o condiciones de proceso) se midió de manera cualitativa exclusivamente por medio del análisis del efecto parcial marginal promedio donde se evidenció que, en la totalidad del dominio, la variable que llegaría a afectar más la probabilidad por medio del vector de características sería el pH, seguido por el gradiente y el tiempo en casi igual cuantía y, finalmente, la temperatura que mostraría el menor efecto de todos.

Este estudio se abordó desde dos perspectivas diferentes, la primera por medio del análisis determinístico convencional, a través de estimaciones MCO procurando realizar ajustes para las variables del espectrofotómetro, y la segunda desarrollando un modelo probabilístico el cual permitió el análisis de trayectorias, efectos parciales, determinación de óptimos entre otros. Por lo anterior, se puede concluir que, si bien la utilización de hiperplanos pudo dar una idea general del comportamiento de las variables CIELAB de forma individual, este análisis no debería de pertenecer más que a la parte descriptiva dentro de un estudio ya que posee ciertas debilidades como coeficientes de determinación no lo suficientemente altos lo cual se traduciría en una base de cálculo poco confiable para pronósticos.

Queda claro que al abordar este tipo de fenómenos respetando la naturaleza estocástica de los procesos fisicoquímicos por medio de la utilización de probabilidades (sin predecir variables individuales) se obtienen mejores resultados los cuales son relativamente más sencillos de poner en práctica y representan un mayor control y mejor manejo del proceso en la vida real.

CONCLUSIONES

1. Los parámetros CIELAB se vieron afectados de diferente forma y con distinto nivel de significancia por cada una de las variables de proceso involucradas, al punto de omitir algunas dentro de un ajuste determinado.
2. El mejor ajuste a través de una estimación MCO fue para el parámetro rojo-verde (ΔA) el cual exhibió una fuerte dependencia con la acidez del baño y con la temperatura.
3. Las variables tiempo y temperatura presentaron una transición suave de forma casi lineal, mientras que el pH y el gradiente una transición brusca, cuando se estimaron probabilidades de aceptación en el marco del modelo probit.
4. Las condiciones óptimas teóricas se caracterizaron por poseer un pH más ácido, una menor temperatura, la misma duración y un gradiente ligeramente más alto en comparación con las condiciones empíricas.
5. La evaluación de los puntos óptimos teóricos en el modelo lograría una mejora de, aproximadamente, 6 % en la probabilidad de aceptación respecto de la evaluación de valores óptimos empíricos, aunque cabe resaltar que estos últimos son una buena aproximación a pesar de que fueron determinados sin utilizar el método científico a través de la experiencia.

6. El análisis de efectos parciales sobre el modelo probit reveló que la variable más sensible en el proceso fue el pH y la menos sensible la temperatura; el tiempo y el gradiente presentaron una sensibilidad moderada.

7. El abordaje de este estudio a través del modelo probit generó mejores resultados que los obtenidos por estimaciones MCO convencionales, ya que el primero sí toma en cuenta la naturaleza inherentemente estocástica del fenómeno fisicoquímico y no trata de predecir valores puntuales, ya que analiza la probabilidad final de éxito.

RECOMENDACIONES

1. Realizar nuevamente el análisis expuesto en este estudio pero incluyendo otras variables de proceso para conocer, si es que existe, su aporte a la probabilidad final de aceptación de una muestra terminada.
2. Por medio del modelo probit, determinar la probabilidad de aceptación utilizando diferentes combinaciones de las mismas variables pero que no formaron parte de este análisis.
3. Identificar bandas de confianza en cada una de las variables de proceso para así poder fijar un objetivo de aceptabilidad realista, logrando con ello mejorar la planificación en lo que respecta a materia prima disponible y tiempo de operación, entre otros.
4. Llevar a cabo un análisis de costos para determinar, en unidades monetarias, cuánto influye cada variable en el incremento o decremento del valor marginal de una pieza terminada, colocando así los puntos de control de forma estratégica, logrando optimizar los beneficios.
5. Proponer un estudio de impacto ambiental el cual analice la posible reducción de efluentes contaminantes como resultado de una mejor gestión en el área de producción a causa de la aplicación de modelos similares.

BIBLIOGRAFÍA

1. APÓSTOL, Tom. *Calculus*. 2ª ed. Estados Unidos de América: Editorial Reverté S.A., 1984. 190 p.
2. ARRIAGA, Gabriela. *Determinación de tricromías para teñir poliéster basándose en las curvas de agotamiento de colorantes dispersos*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2005. 39 p.
3. ASADA, T. *Química de la fibra*. Guatemala, Guatemala: 2007. 32 p.
4. ASADA, T. *Química de los auxiliares*. Guatemala, Guatemala: 2007. 33 p.
5. ASADA, T. *Tintura con colorante disperso*. Guatemala, 2007. 26 p.
6. BRYNS, Guy; HUBERT, Mia. *A robustification of the Jarque-Bera test of normality*. Physica-Verlag/Springer, Estados Unidos de América, 2004. 8 p.
7. BUTTS, Ken. *Measurement methods for textile fabrics*. 3ª ed. Estados Unidos de América: Datacolor Editores, 2006. 5 p.
8. CAMERON, Colin; TRIVEDI, Pravin. *Microeconometrics*. Estados Unidos de América: Cambridge University Press, 2005. 997 p.

9. CARRILLO, Verónica. *Estampación con colorantes reactivos y dispersos sobre tejido de poliéster y algodón*. Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador, 2001. 25 p.
10. CEGARRA, José; PUENTE, Publio; CARBONEL, José. *Estudio de la migración de los colorantes dispersos desde la fibra de poliéster hacia la fibra de lana en diferentes condiciones tintóreas*. Escuela de ingeniería industrial de Tarrasa, España, 1985. 97 p.
11. CIFUENTES, Juan. *Polymers for textile*. [en línea] Departamento de innovación y desarrollo, Sección de tintorería química, Derypol S.A. [Barcelona España]. Disponible en web: <http://www.derypol.com/repositori/productos/docs/en/Polymers%20for%20textile%20brochure.pdf>. Consulta: 14 de febrero de 2012.
12. DIJK, Herman; HEIJ, Christian. *Econometric Methods with Applications*. 2ª ed. Estados Unidos de América: Oxford University Press, 2004. 814 p.
13. DOMÍNGUEZ, Alberto. *Espectrofotometría visible*. [en línea] Estudio sobre metrología, [Guadalajara Mexico]. Disponible en web: <http://www.basculasbalanzas.com/instrumentos-de-medicion/espectrofotometria-visible.html>. Consulta: 20 de marzo de 2013.
14. FILLER, Giancarlo. *Fiber source home. Polyester fiber*. [en línea] [Virginia EE.UU]. Disponible en web: <http://www.fibersource.com/f-tutor/polyester.htm>. Consulta: 23 de marzo de 2012.

15. GIMIGNANI, María. *Tejidos antiguos, geotextiles modernos* [en línea] [Roma Italia]. Disponible en web: <http://www.naturalfibres2009.org/es/fibras/>. Consulta: 10 de marzo de 2012.
16. GRAHAM, Samuel. *Efectos de la concentración de colorante y proporciones de colorantes en combinación sobre el agotamiento de colorantes dispersos*. Instituto de tecnología textil, Estados Unidos de América, 2009. 22 p.
17. GUTIÉRREZ, Humberto; DE LA VARA, Román. *Análisis y diseño de experimentos*. 2ª ed. Mexico: McGrawHill, 2008. 49 p.
18. HAFFAR, Oscar. *Consideraciones acerca de la tintura de las fibras de poliéster*. Venezuela: 2008. 10 p.
19. HERNÁNDEZ, Alejandro. *Influencia del pH en los procesos húmedos textiles*. Bolivia: 2006. 19 p.
20. HINCAPIÉ, Juliana. *Estudio de disminución de tiempos de procesamiento en la tintura de algodón con colorantes reactivos en tonos oscuros*. Universidad de EAFIT, Colombia, 2004. 45 p.
21. KOLMOGOROV, Andrei. *Foundations of the theory of probability*. 2ª ed. Estados Unidos de América: Chelsea Publishing Company, 1956. 33 p.

22. LIRA, Renato. *Teoría del color*. Tejidos Imperial S.A., Guatemala, 2006. 15 p.
23. MAIBAUM, Gert. *Teoría de probabilidades y estadística matemática*. 3ª ed. Alemania: Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1976. 35 p.
24. MAIER, Alfonzo. *Química y color en los textiles*. Universidad de Buenos Aires, Argentina, 2010. 33 p.
25. OHNO, Yoshi. *CIE Fundamentals for color Measurements*. Instituto Nacional de Estándares y Tecnología, Canada, 2000. 6 p.
26. RAMÍREZ, Augusto. *Red textil argentina, fibras sintéticas*. [en línea] [Buenos Aires Argentina]. Disponible en web: <http://www.redtextilargentina.com.ar/index.php/fibras/f-diseno/fibras-sinteticas>. Consulta: 18 de marzo de 2012.
27. ROZAKIS, Laurie. *Shaum's Quick Guide to Writing Great Research Papers*. Estados Unidos de América: McGrawHill, 1999. 55 p.
28. RUBINSON, Kenneth. *Análisis instrumental*. 4ª ed. México: Prentice Hall, 2001. 356 p.
29. SMALLWOOD, Ian. *Handbook of Organic Solvent Properties*. Inglaterra: Arnold, 1996. 239 p.

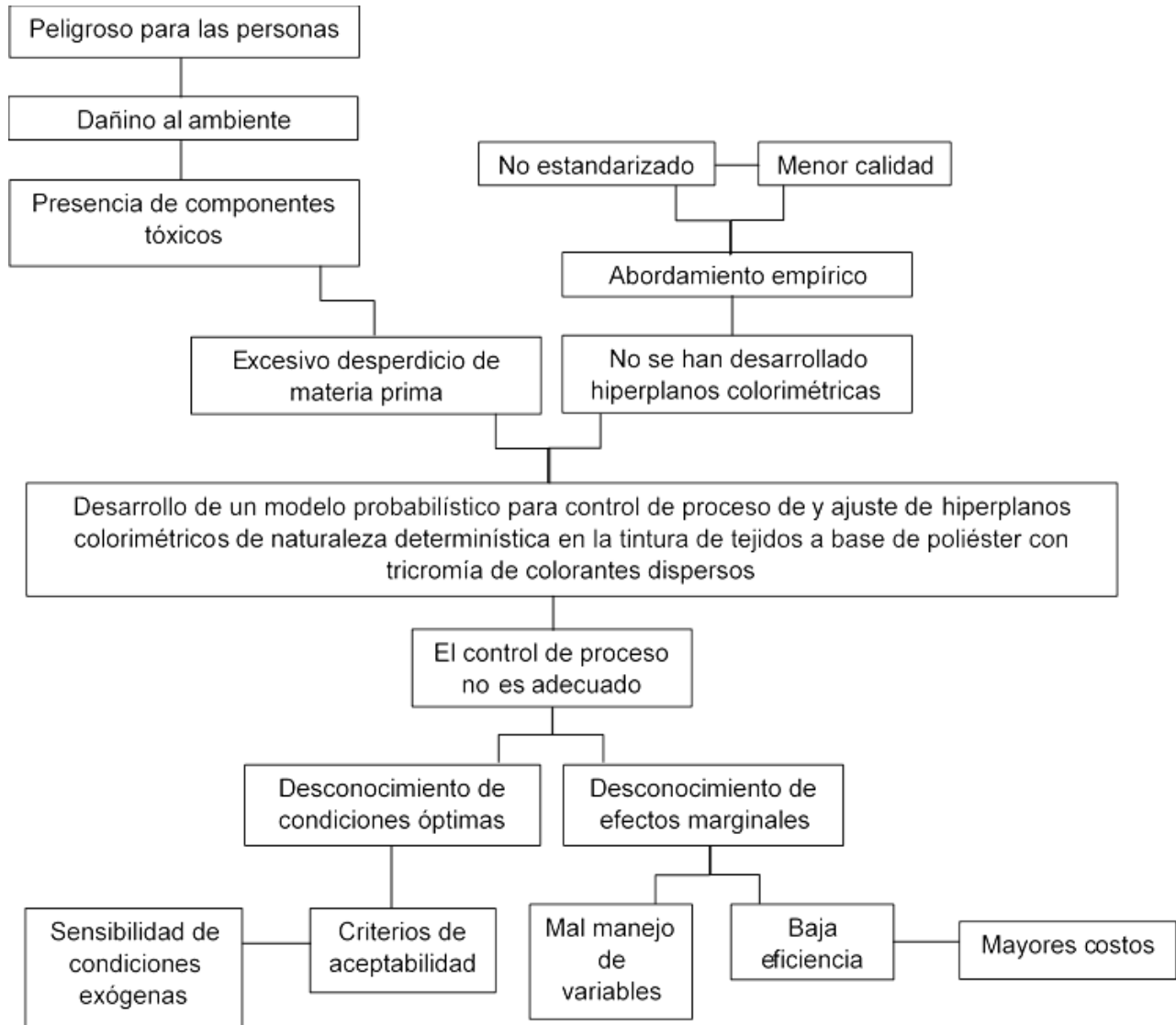
30. TARACENA, Alejandro. *Textos científicos, síntesis de tereftalato de polietileno*. [en línea] [Ciudad de México México]. Disponible en web: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/pet/produccion-pet>. Consulta: 4 de abril de 2012.
31. TOMASINO, Charles. *Chemistry & Technology of Fabric Preparation & Finishing*. Universidad de Carolina del Norte, Estados Unidos de América, 1992. 30 p.
32. WOOLDRIDGE, Jeffrey. *Introducción a la econometría*. 4ª ed. Estados Unidos de América: Cengage Learning Editores, 2010. 621 p.
33. XIAOKUN, Wang. *Application of the Dynamic Spatial Ordered Probit*. Bucknell University, Estados Unidos de América, 2006. 26 p.

Apéndice 1. Requisitos académicos

Área	Cursos	Temas
Fisicoquímica	<ul style="list-style-type: none"> • Fisicoquímica 1 • Fisicoquímica 2 	<ul style="list-style-type: none"> • Calorimetría • Espectrofotometría
Operaciones unitarias	<ul style="list-style-type: none"> • Transferencia de calor (IQ3) • Laboratorio de ingeniería Química 2 	<ul style="list-style-type: none"> • Humidificación • Secado • Difusión
Ciencias puras	<ul style="list-style-type: none"> • Estadística 1 • Estadística 2 • Matemática intermedia 1 	<ul style="list-style-type: none"> • Regresión lineal multivariada • Inferencia • Supuestos Gauss Markov • Modelo probabilístico • Integración • Distribuciones

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Muestra de cálculo

Cálculo aproximado del pH para el baño de tintura de las muestras

[Ecuación 12]

$$\text{pH} = \text{pKa} + \log\left(\frac{[A^-]}{[HA]}\right) + U$$

Donde:

pH = potencial de hidrógeno [adim.]

pKa = constante de disociación ácida [adim.]

A^- = concentración de la especie aprótica [mol/L]

HA = concentración del ácido (especie libre) [mol/L]

U = factor de corrección empírico $\approx 1,1$

Ejemplo: cálculo del pH de la muestra no. 12 con una concentración de 0,5 g/L de ácido acético (pKa = 4,76).

El valor equivalente en concentración molar de 0,5 g/L del ácido acético (peso molar = 60,02 g/mol) es de 0,00833 M. Por la ley de acción de masas se obtiene que la concentración de la especie aprótica es $3,37 \times 10^{-4}$ M. Por lo tanto

$$\text{pH} = 4,76 + \log\left(\frac{0,000337}{0,00833}\right) + 1,1$$

$$\text{pH} \approx 4,5$$

Continuación del apéndice 3.

Test de autocorrelación por el estadístico Durbin-Watson.

[Ecuación 13]

$$D = \frac{\sum_{t=2}^T (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^T e_t^2}$$

Donde:

D = estadístico de Durbin-Watson [adim.]

e_t = error en medición presente [adim.]

e_{t-1} = error en la medición pasada [adim.]

Ejemplo: cálculo del estadístico Durbin-Watson en la estimación del parámetro ΔA (componente rojo-verde)

$$D = \frac{4,486701}{2,34586}$$

$$D = 1,9126$$

Si este indicador presenta un valor mucho más pequeño que 2, existe autocorrelación, lo cual viola uno de los supuestos Gauss-Markov para estimaciones MCO.

Continuación del apéndice 3.

Test de Jarque Bera para análisis de normalidad.

[Ecuación 14]

$$JB = \frac{n - k + 1}{6} \left(S^2 + \frac{1}{4} (C - 3)^2 \right)$$

Donde:

JB = estadístico Jaque Bera [adim.]

n = número de observaciones [adim.]

k = número de regresores [adim.]

S = sesgo [adim.]

C = curtosis [adim.]

Ejemplo: análisis de normalidad para los datos del componente ΔC (croma-saturación).

$$JB = \frac{100 - 1 + 1}{6} \left(-0,618646^2 + \frac{1}{4} (2,940427 - 3)^2 \right)$$

$$JB \approx 6,39$$

Nota: debido a la complejidad de varios de los test estadísticos realizados, únicamente se incluyeron en esta muestra de cálculo aquellos que se limitan a una expresión algebraica convencional. Para mayor detalle técnico del resto de pruebas ver la bibliografía.

Apéndice 4. Datos calculados

Estimación econométrica del componente rojo-verde ΔA

Dependent Variable: $_A^2$

Method: Least Squares

Date: 06/16/15 Time: 14:07

Sample: 1 100

Included observations: 100

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
PH ⁵	0.082963	0.045020	1.842826	0.0068
PH ⁴	-2.351897	1.259203	-1.867766	0.0064
PH ³	26.30559	13.89895	1.892631	0.0061
PH ²	-145.0784	75.68596	-1.916847	0.0058
PH	394.7149	203.4423	1.940181	0.0055
TEMP ^{1/2}	0.001233	0.000764	1.614612	0.0109
C	-424.2121	216.1119	-1.962928	0.0052
R-squared	0.904618	Mean dependent var		0.025772
Adjusted R-squared	0.898464	S.D. dependent var		0.065452
S.E. of regression	0.020856	Akaike info criterion		-4.834905
Sum squared resid	0.040453	Schwarz criterion		-4.652543
Log likelihood	248.7453	Hannan-Quinn criter.		-4.761100
F-statistic	147.0041	Durbin-Watson stat		1.912604
Prob(F-statistic)	0.000000			

Continuación del apéndice 4.

Estimación econométrica del componente amarillo-azul ΔB

Dependent Variable: $(_B)^{1/2}$

Method: Least Squares

Date: 06/16/15 Time: 12:03

Sample: 1 100

Included observations: 100

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
GRA ^{1/2}	-0.274825	0.202572	-1.356678	0.0178
GRA ^{3/2}	0.013233	0.014619	0.905172	0.0367
TEMP ^{1.6}	0.000211	6.04E-05	3.497950	0.0007
C	-0.345007	0.200043	-1.724666	0.0087
R-squared	0.634674	Mean dependent var		-0.008000
Adjusted R-squared	0.116515	S.D. dependent var		0.103546
S.E. of regression	0.097327	Akaike info criterion		-1.782309
Sum squared resid	0.909358	Schwarz criterion		-1.678103
Log likelihood	93.11547	Hannan-Quinn criter.		-1.740135
F-statistic	5.352062	Durbin-Watson stat		1.972550
Prob(F-statistic)	0.001884			

Continuación del apéndice 4.

Estimación econométrica del componente cromasaturación ΔC

Dependent Variable: $_C^4$

Method: Least Squares

Date: 03/17/16 Time: 06:35

Sample: 1 100

Included observations: 100

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
PH ²	0.002693	0.000330	8.167382	0.0000
TIE ^(1/2)	-0.007319	0.001195	-6.125870	0.0000

R-squared	0.694156	Mean dependent var	0.012541
Adjusted R-squared	0.397292	S.D. dependent var	0.029890
S.E. of regression	0.023205	Akaike info criterion	-4.669141
Sum squared resid	0.052768	Schwarz criterion	-4.617037
Log likelihood	235.4570	Hannan-Quinn criter.	-4.648054
Durbin-Watson stat	2.134275		

Continuación del apéndice 4.

Estimación econométrica del componente claridad ΔL

Dependent Variable: $_L$

Method: Least Squares

Date: 03/17/16 Time: 07:07

Sample: 1 100

Included observations: 100

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
GRA ^{1/2}	-1.010615	1.137663	-0.888326	0.0376
GRA ²	0.317191	0.471149	0.673229	0.0050
GRA ³	-0.058666	0.102129	-0.574427	0.0056
PH ^{1/2}	0.212212	0.094687	2.241205	0.0273
GRA ^{1/2} -(GRA*PH)	0.686695	0.176802	3.883977	0.0002
R-squared	0.648916	Mean dependent var		0.321055
Adjusted R-squared	0.189058	S.D. dependent var		0.316657
S.E. of regression	0.285157	Akaike info criterion		0.377151
Sum squared resid	7.724860	Schwarz criterion		0.507409
Log likelihood	-13.85753	Hannan-Quinn criter.		0.429869
Durbin-Watson stat	1.988218			

Continuación del apéndice 4.

Estimación por máxima verosimilitud del modelo probabilístico probit

Dependent Variable: **ACCEPTABILITY**

Method: ML - Binary Probit (Quadratic hill climbing / EViews legacy)

Date: 06/09/15 Time: 13:39

Sample: 1 100

Included observations: 100

Convergence achieved after 6 iterations

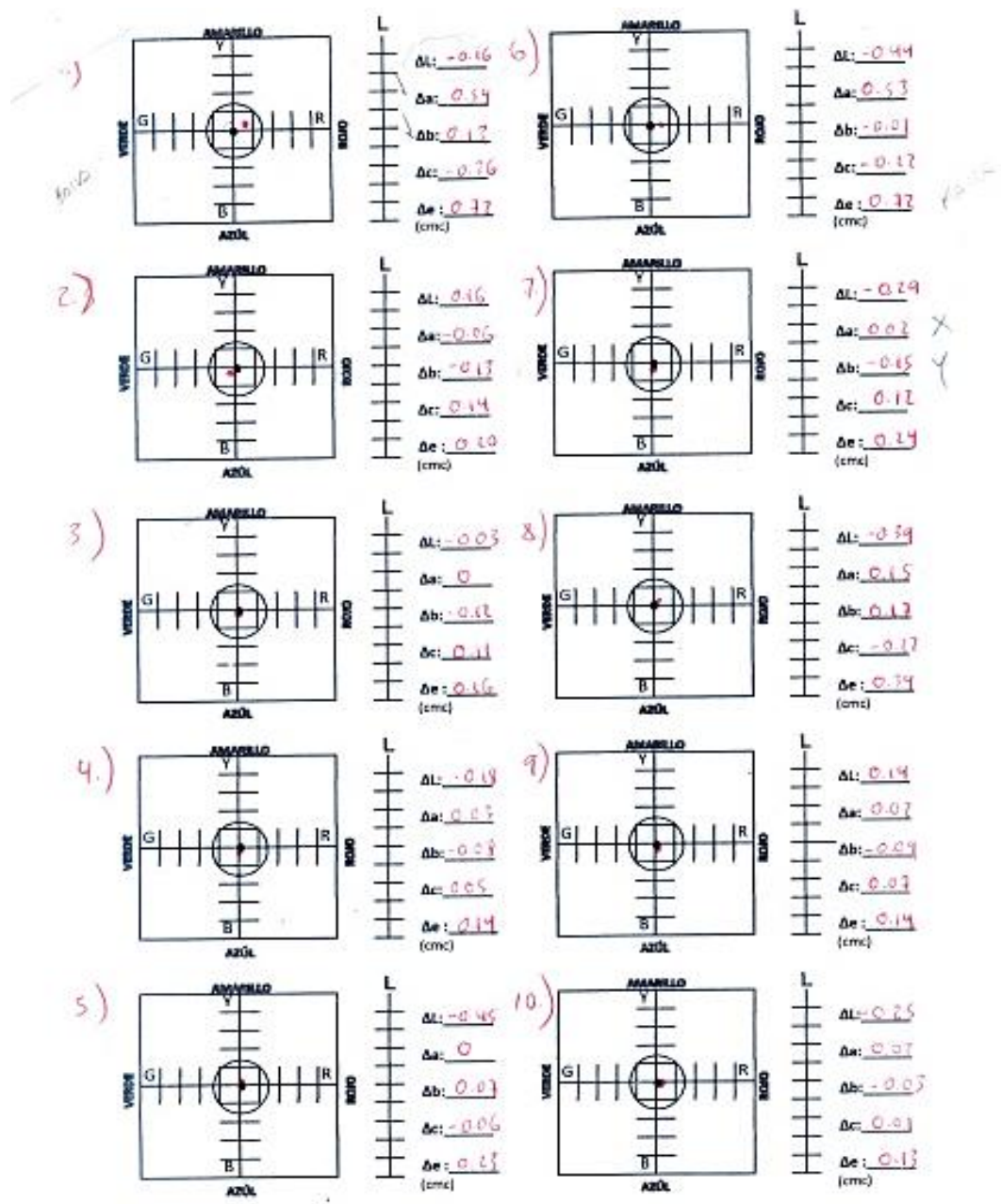
Covariance matrix computed using second derivatives

Variable	Coefficient	Std. Error	z-Statistic	Prob.
GRA	-0.083628	0.316501	-0.264228	0.0079
PH	-0.993417	0.436629	-2.275195	0.0229
TEMP	0.033926	0.023351	1.452840	0.0013
TIE	0.041441	0.041114	1.007950	0.0135
C	-0.925074	3.935433	-0.235063	0.0081
McFadden R-squared	0.256513	Mean dependent var		0.690000
S.D. dependent var	0.464823	S.E. of regression		0.441670
Akaike info criterion	1.193810	Sum squared resid		18.53184
Schwarz criterion	1.324069	Log likelihood		-54.69050
Hannan-Quinn criter.	1.246528	Deviance		109.3810
Restr. deviance	123.8201	Restr. log likelihood		-61.91007
LR statistic	14.43913	Avg. log likelihood		-0.546905
Prob(LR statistic)	0.006018			
Obs with Dep=0	31	Total obs		100
Obs with Dep=1	69			

Fuente: elaboración propia.

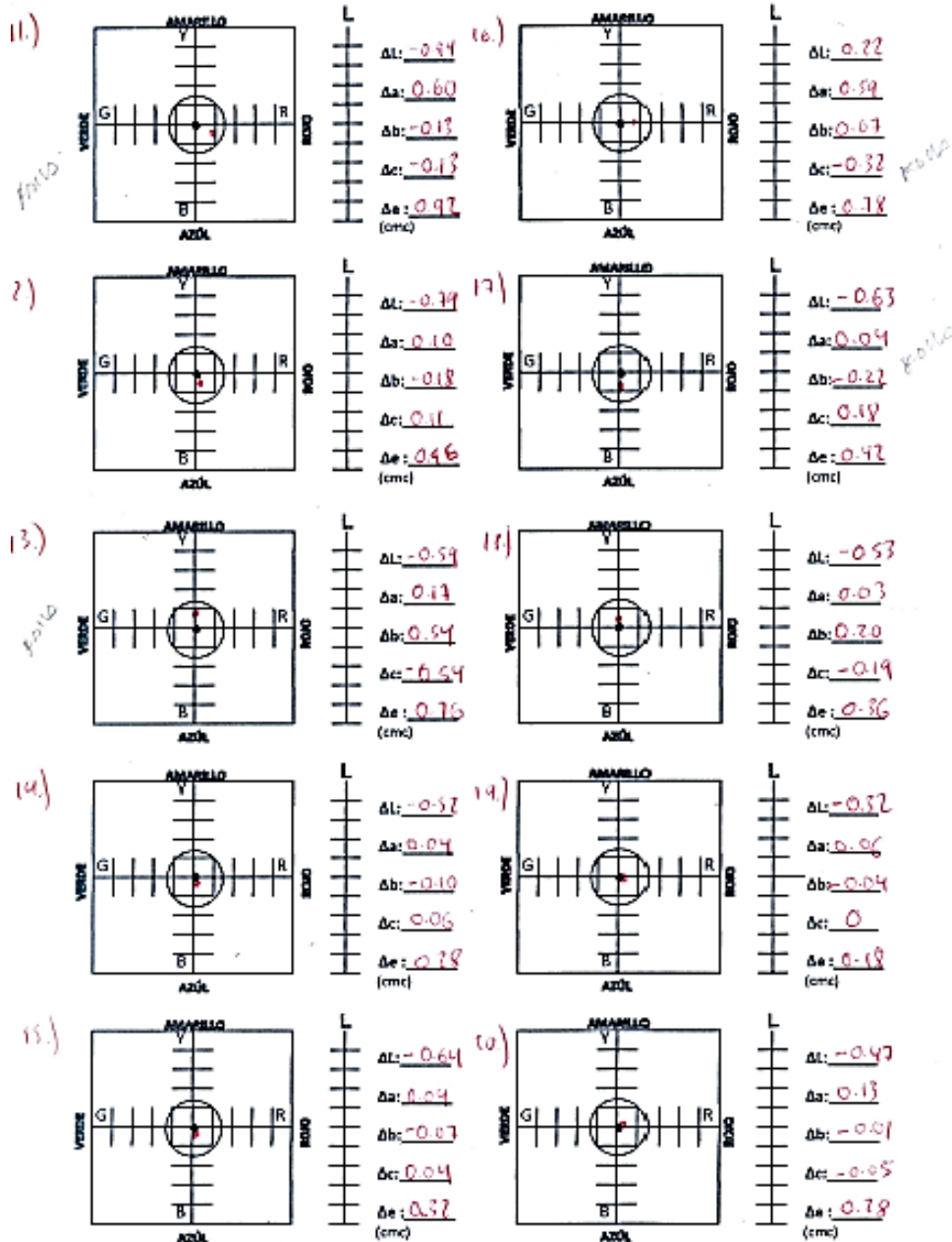
Apéndice 5. Muestra de cálculo

Toma de datos hoja Nro. 1



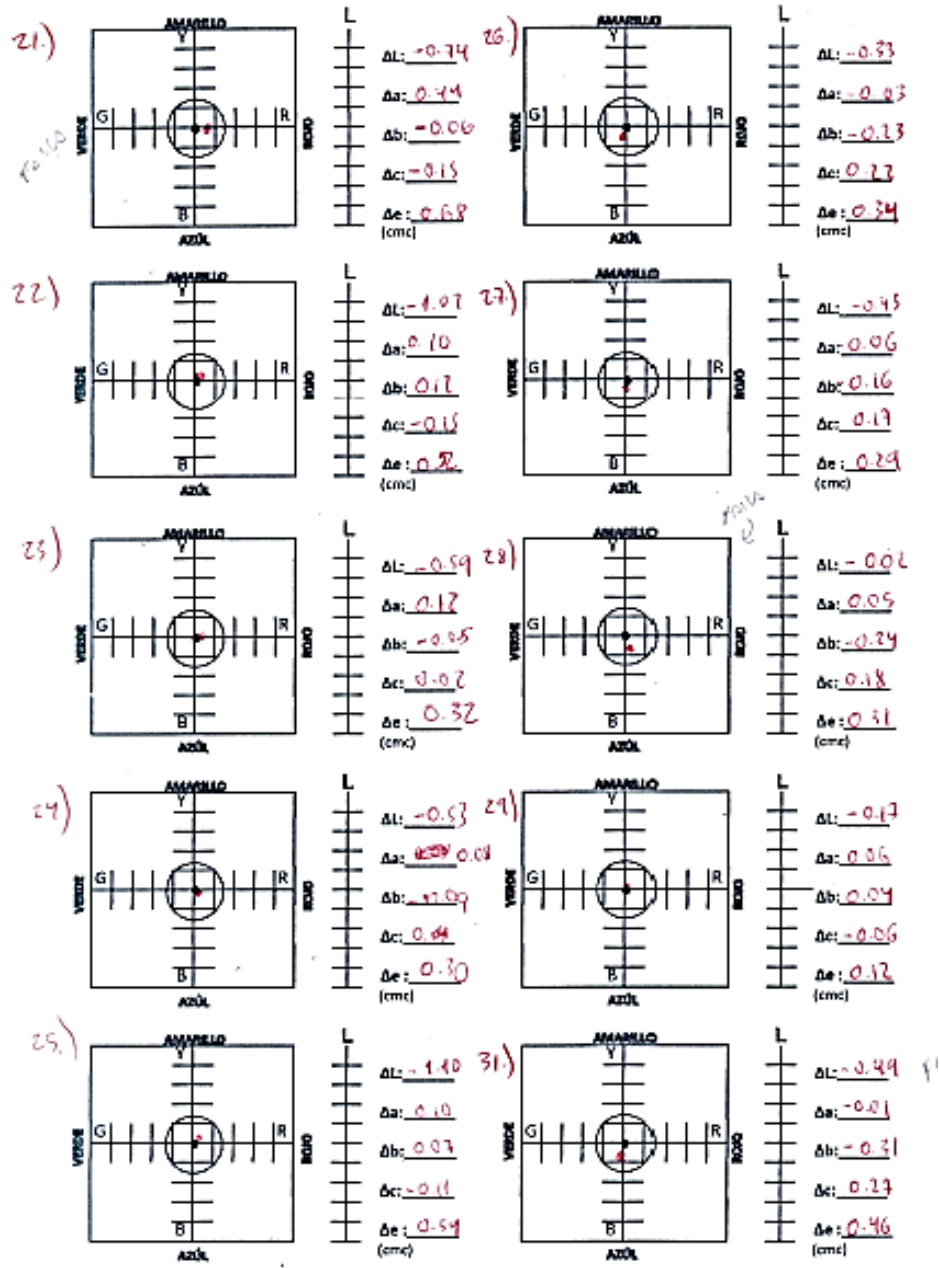
Continuación del apéndice 5.

Toma de datos hoja Nro. 2



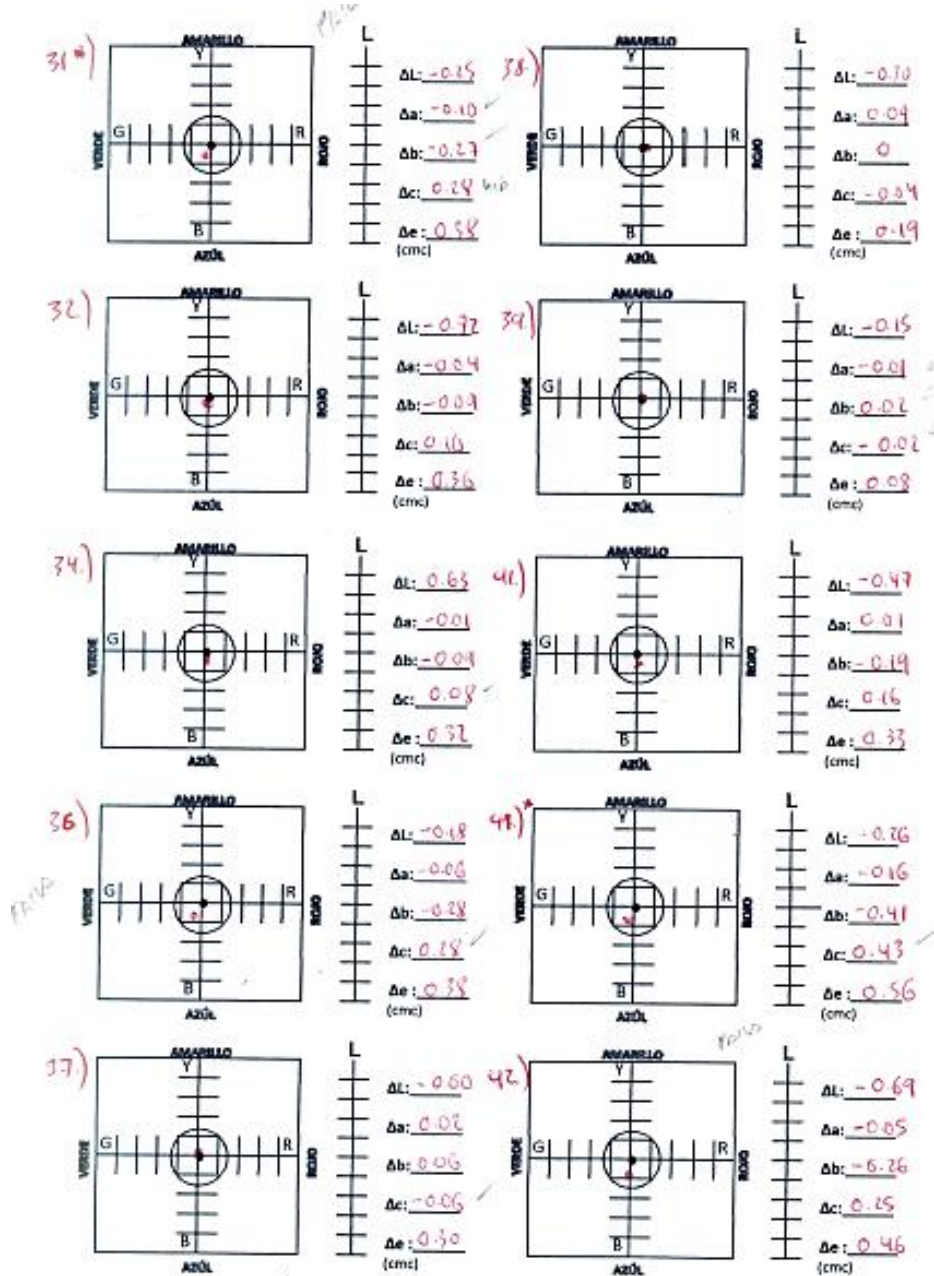
Continuación del apéndice 5.

Toma de datos hoja Nro. 3



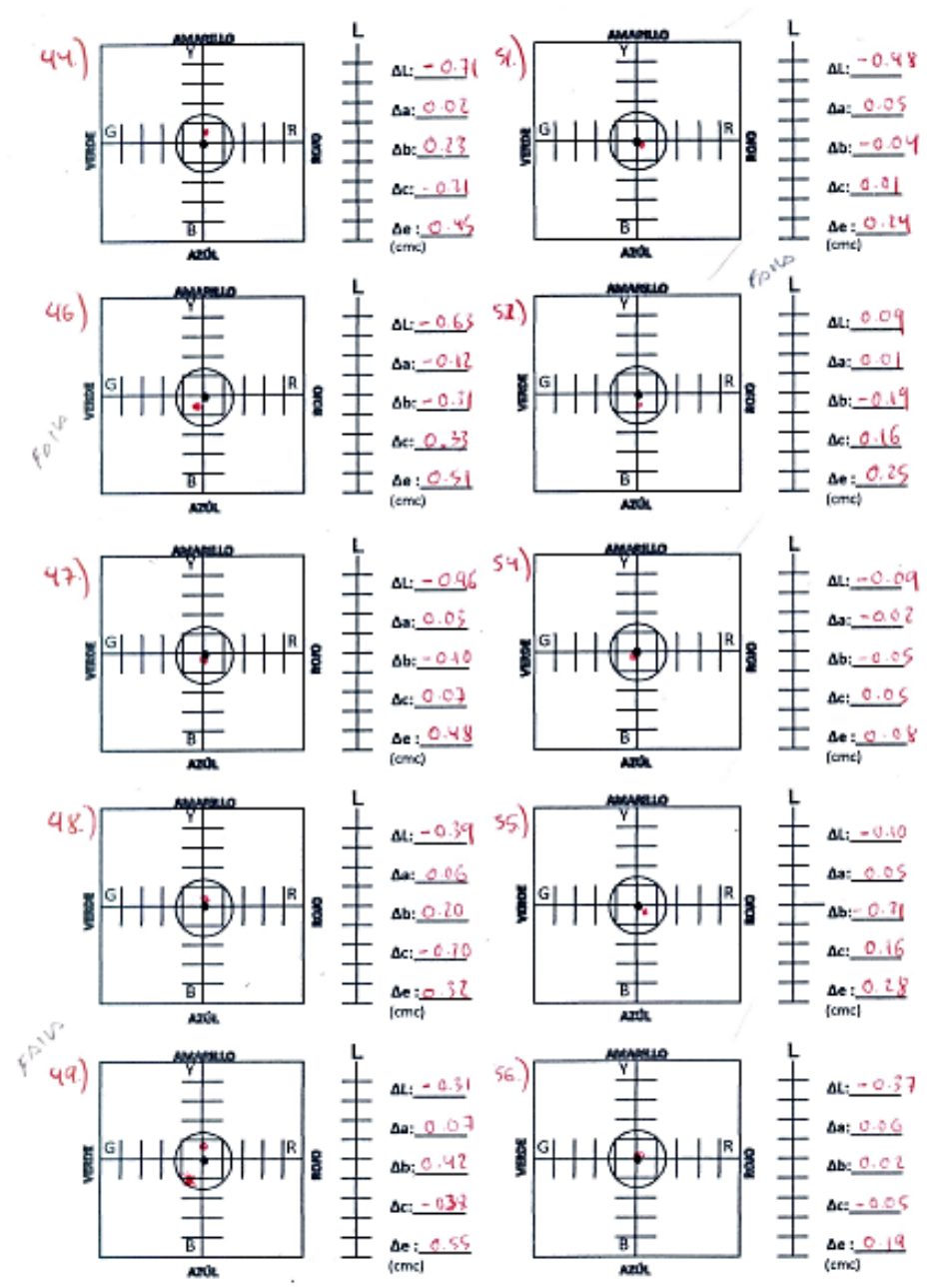
Continuación del apéndice 5.

Toma de datos hoja Nro. 4



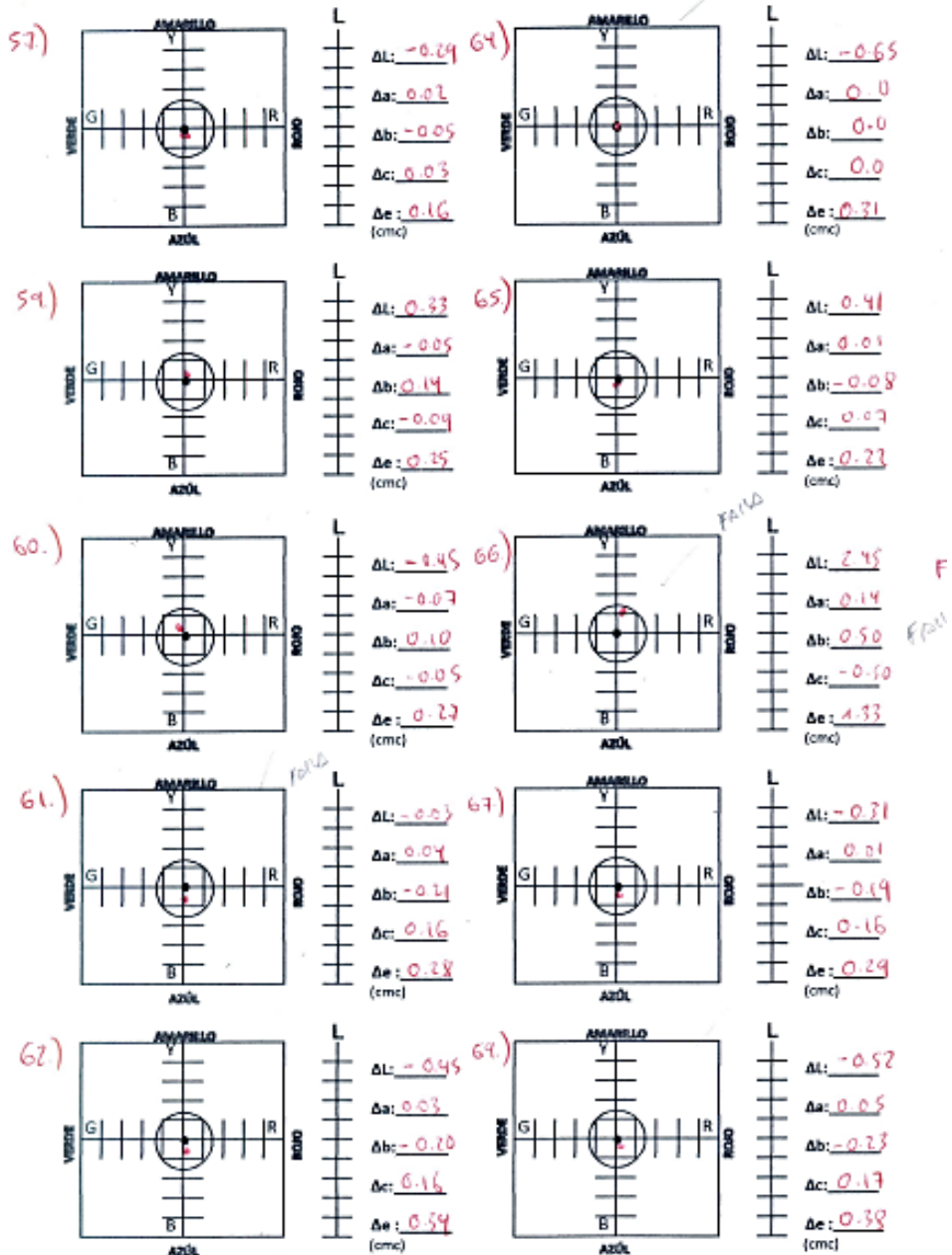
Continuación del apéndice 5.

Toma de datos hoja Nro. 5



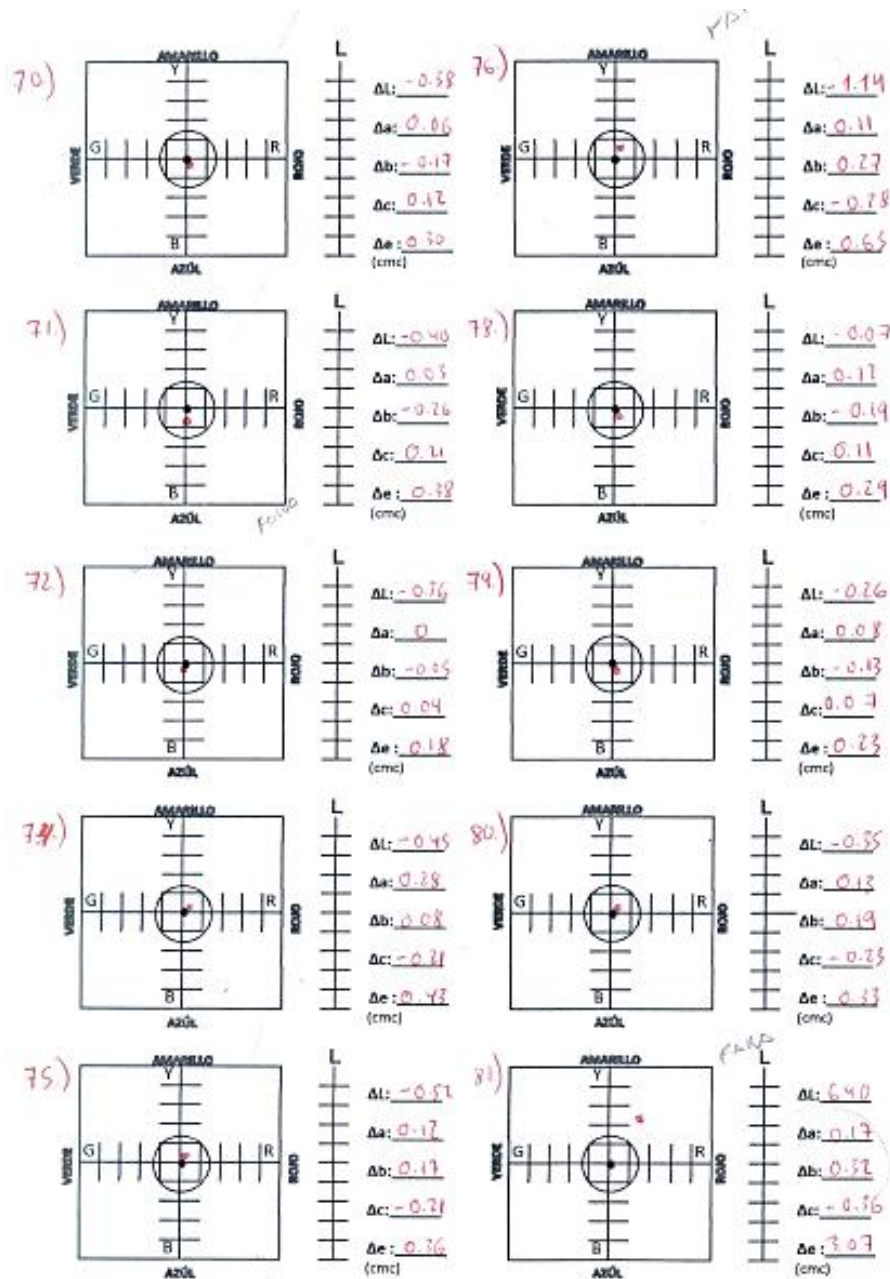
Continuación del apéndice 5.

Toma de datos hoja Nro. 6



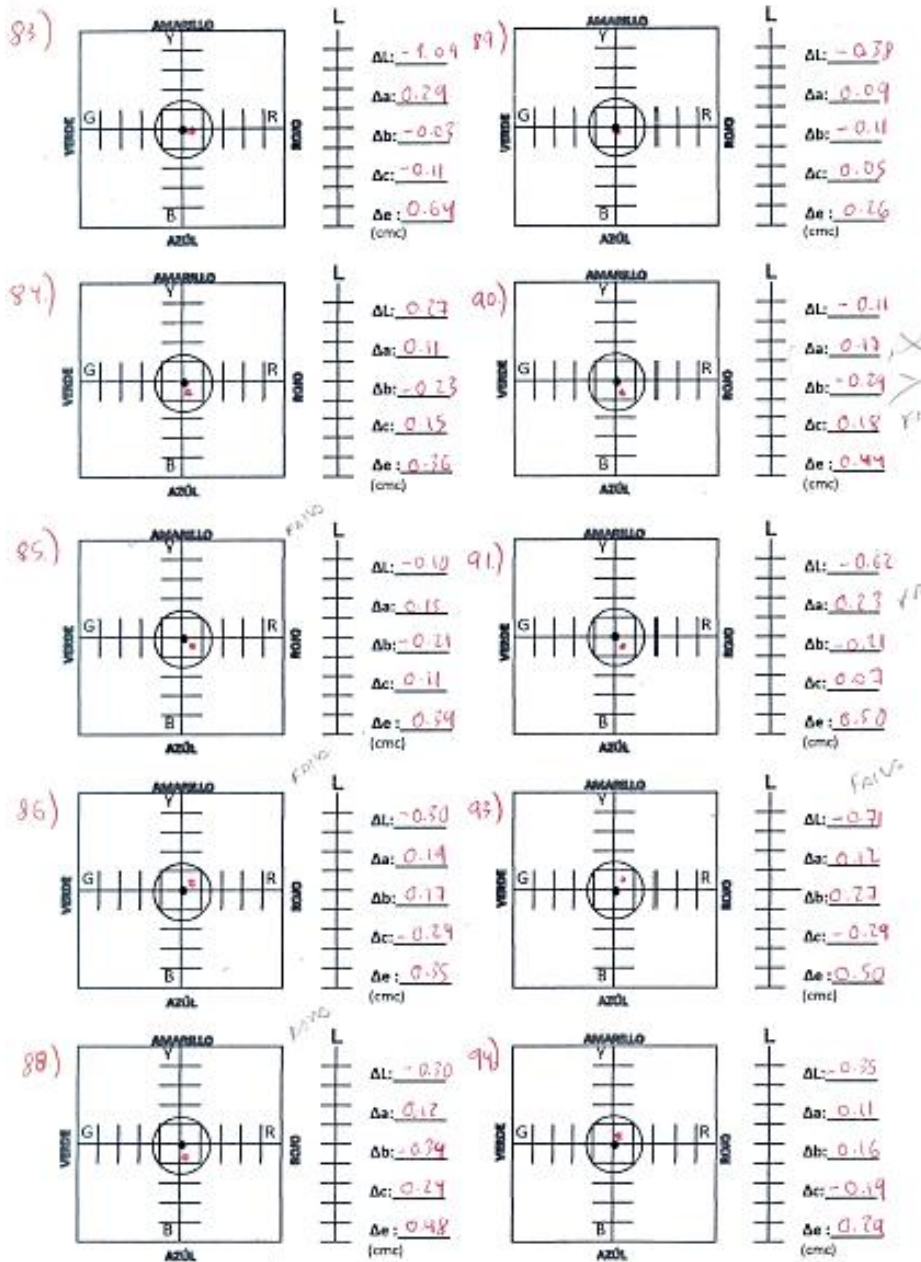
Continuación del apéndice 5.

Toma de datos hoja Nro. 7



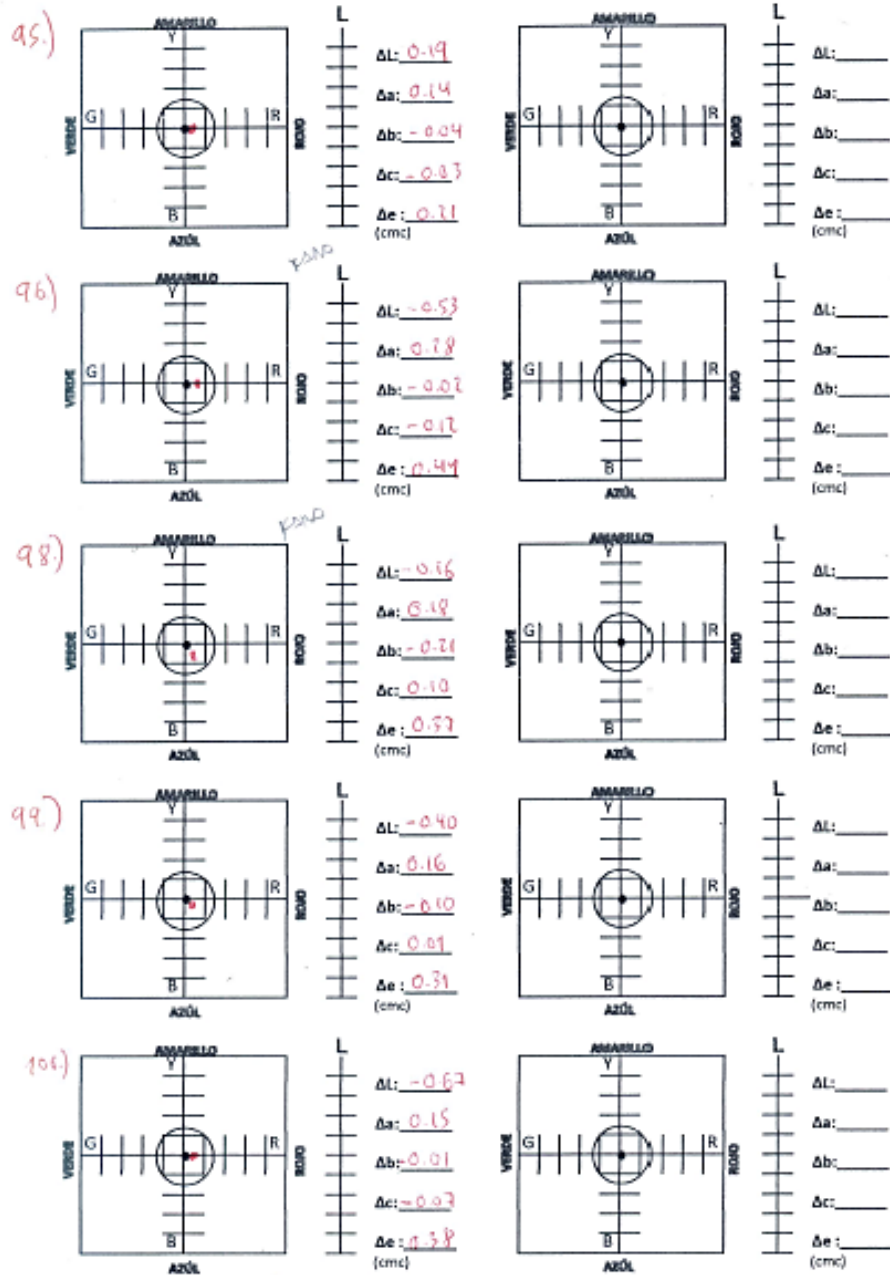
Continuación del apéndice 5.

Toma de datos hoja Nro. 8



Continuación del apéndice 5.

Toma de datos hoja Nro. 9



Fuente: elaboración propia.

