



**Determinación de modelos matemáticos para la predicción del pH en procesos  
de tintura textil**

Cristian López Botero

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero químico

Semestre de industria

Asesores

Felipe Bustamante Londoño, Doctor en Ingeniería Química

Jorge Hernán De la cruz Gaona, Ingeniero químico

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Pregrado en Ingeniería Química

Medellín

2024

---

Cita	López Botero [1]
<b>Referencia</b>	[1] López Botero, “Determinación de modelos matemáticos para la predicción del pH en procesos de tintura textil”, Trabajo de grado, Pregrado en Ingeniería Química Universidad de Antioquia, Medellín, 2024.

---

Estilo IEEE (2020)



Centro de documentación UdeA

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Dedicatoria**

Le quiero dedicar este trabajo a mi papá y a mi mamá, que con su paciencia, cariño y esfuerzo me apoyaron durante toda la trayectoria de mi carrera, que día a día se entregaban en cuerpo y alma velando que nunca me faltara nada, sin ellos, lo que en su momento era un sueño y, gracias a Dios, hoy ya es una realidad, jamás hubiera sido posible. Agradecer también al profesor Juan Guillermo Patiño, que con su inspiradora manera de transmitir conocimiento y su profesionalismo como Ingeniero Químico me inspiró a estudiar esta bella profesión.

## **Agradecimientos**

En primer lugar, agradecer a mis padres por todo el esfuerzo que han hecho a lo largo de estos años, a los docentes que por medio de sus conocimientos han guiado el camino del profesional en el que estoy a punto de convertirme; también quiero agradecer a los conductores de Sotrapeñol, que con su paciencia, carisma y bondad hicieron que mi proceso académico fuera más fácil de llevar económicamente, le agradezco profundamente a Crystal SAS, colaboradores y trabajadores de esta empresa por brindarme la oportunidad de realizar mis prácticas académicas, que con sus instalaciones y el conocimiento de su personal me ayudaron a dar este gran paso de la academia a la industria, especialmente quiero agradecer a Jorge De la Cruz y a Julio Correa por poner a su disposición y sin ningún egoísmo la amplitud del conocimiento que como ingenieros químicos han cosechado a lo largo de los años, y siempre tener la disposición de solucionar mis inquietudes en este proceso de formación; finalmente me gustaría agradecer a la Universidad de Antioquia por brindarme una segunda casa durante estos años que tuve la fortuna de hacer parte de sus estudiantes, y que hoy hace posible ser un profesional íntegro y en busca del progreso de la sociedad.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	10
ABSTRACT	11
I. INTRODUCCIÓN	12
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
III. JUSTIFICACIÓN	17
IV. OBJETIVOS	18
A. Objetivo general	18
B. Objetivos específicos	18
V. HIPÓTESIS	19
VI. MARCO TEÓRICO	21
VII. METODOLOGÍA	26
VIII. RESULTADOS	28
A. Selección de variables significativas para el modelo matemático.	28
B. Regresión lineal múltiple.	33
C. Modelo matemático a utilizar.	34
D. Evaluación y validación del modelo.	34
IX. DISCUSIÓN	36
A. Identificación y desarrollo del modelo.	36
B. Evaluación y validación del modelo.	39
X. CONCLUSIONES	41
REFERENCIAS	44

ANEXOS	47
ANEXO A. DATOS OBTENIDOS DEL ESCENARIO DE PRACTICAS.	47
ANEXO B. DATOS OBTENIDOS PARA LA EVALUACION Y VALIDACION DEL MODELO	50

## LISTA DE TABLAS

TABLA I RESULTADOS DE PRUEBA DE HUMECTACION EN TELAS DE DIFERENTE CALIBRE	32
TABLA II COEFICIENTES DE REGRESIÓN OBTENIDOS	33
TABLA III COEFICIENTES DE CORRELACION PARA CADA PROCESO	34
TABLA IV. EFICIENCIA DE NEUTRALIZACIÓN PARA LOS PROCESOS C/C Y C/S ANTES Y DESPUÉS DEL MODELO	35
TABLA V HEURISTICAS PARA LA ADICIÓN DE ÁCIDO DEPENDIENDO DEL pH OBTENIDO	39
TABLA VI DATOS EXPERIMENTALES DE PROCESOS C/C	47
TABLA VII DATOS EXPERIMENTALES DE PROCESOS C/S	49
TABLA VIII. DATOS DE VALIDACION PARA LOS PROCESOS C/C	50
TABLA IX. DATOS DE VALIDACION PARA LOS PROCESOS C/S	50

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Fragmento de tela afectado por hidrólisis catalizada por ácido	15
Fig. 2. Fragmento de tela neutralizado correctamente	15
Fig. 3. Variación del pH de una disolución de ácido acético a diferentes concentraciones	30

## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

<b>C/S</b>	Carbonato de sodio y soda cáustica
<b>C/C</b>	Carbonato de sodio y carbonato de sodio
<b><math>\psi</math></b>	Relación de volumen de lavado y volumen de proceso de la máquina
<b>pH</b>	Potencial de hidrógeno
<b>K<sub>a</sub></b>	Constante de disociación de una sustancia pura
<b>CH<sub>3</sub>COOH</b>	Ácido acético
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Agua
<b>NaOH</b>	Hidróxido de sodio o soda cáustica
<b>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	Carbonato de sodio
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>CH<sub>3</sub>COONa</b>	Acetato de sodio
<b>H<sub>3</sub>O<sup>+</sup></b>	Ion hidronio
<b>OH<sup>-</sup></b>	Ion hidroxilo
<b>CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup></b>	Ion acetato
<b>H<sup>+</sup></b>	Hidrogenión
<b>[---]</b>	Concentración de una sustancia o ion químico que se ingresa como formula en medio de los corchetes

## RESUMEN

Los procesos de tintura textil están influenciados por una gran cantidad de variables, tales como, la temperatura, la cantidad de agua, el tipo y concentración de sustancias que se agregan, el tipo de fibra, el tipo de colorante, el pH, entre otras. Específicamente, en los procesos de tintura de algodón con colorantes reactivos se pueden identificar cuatro etapas principales: el blanqueo, la tintura, la neutralización y el jabonado. Además de la tintura (que es la etapa principal), la neutralización con ácido acético tiene un papel muy importante, ya que es el puente entre la tintura y la etapa de jabonado. En concreto, es de vital importancia que el pH con el cual finalice la etapa de neutralización se encuentre dentro de los rangos permitidos para no afectar la apariencia final del producto. Por tanto, en este trabajo se desarrolló y validó una ecuación lineal múltiple con algunos parámetros que tienen influencia en la determinación del pH para la etapa de neutralización. Debido a la complejidad y la gran cantidad de variables que influyen en los procesos textiles, se identificaron y seleccionaron las variables con mayor influencia en la determinación del pH, teniendo en cuenta los conocimientos teóricos y prácticos adquiridos en el semestre de industria.

***Palabras clave:* Neutralización, pH, tintura de algodón, ecuación lineal múltiple, ácido acético, concentración, conocimientos teóricos, conocimientos prácticos.**

## ABSTRACT

Textile dyeing processes are influenced by a large number of variables, such as temperature, amount of water, type and concentration of substances added, type of fiber, type of dye, pH, among others. Specifically, in cotton dyeing processes with reactive dyes, four main stages can be identified: bleaching, dyeing, neutralization, and soaping. In addition to dyeing (which is the main stage), neutralization with acetic acid plays a very important role, since it is the bridge between the dyeing and the soaping stage, therefore it is of vital importance that the pH at the end of this neutralization stage is within the permitted range so as not to affect the final appearance of the product; For this reason, this article will develop and validate a multiple linear equation with some parameters that influence the determination of the pH for the neutralization stage. Due to the complexity and the large number of variables that influence the textile processes, this work will identify and select the variables to which a greater influence is attributed in the determination of the pH, taking into account the theoretical and practical knowledge acquired in the industry semester.

***Keywords*** — Neutralization, pH, cotton dye, multiple linear equation, acetic acid, concentration, theoretical knowledge, practical knowledge.

## I. INTRODUCCIÓN

Crystal es una compañía colombiana productora y comercializadora de marcas de vestuario y moda, con un modelo de negocio, estructurado bajo cuatro líneas principales: Hilandería, paquete completo, industria, y marcas. Dentro de estas cuatro líneas se encuentran diferentes procesos que permiten llegar hasta el producto terminado. Uno de esos procesos es tintorería, cuyo objetivo principal es otorgar un color determinado a diferentes tipos de fibras textiles, como lo pueden ser el algodón, el poliéster, el nylon, mezclas de estas y algunas fibras más.

Los procesos de tintura están influenciados por una gran cantidad de variables que determinan la manera en la que se debe realizar el proceso para que sea exitoso. Una variable de mucha importancia es el pH, el cual determina, influencia o inhibe diferentes fenómenos como la velocidad de montaje, la migración del color, el agotamiento del colorante y otros de menor importancia [1]. En los procesos de tintura del algodón con colorantes reactivos, el correcto ajuste del pH en cada una de las etapas del proceso, hace que los fenómenos anteriormente mencionados se lleven a cabo de manera eficaz y correcta; sin embargo, cuando hay una desviación o anormalidad en el ajuste del pH ocurren algunas situaciones indeseables, tales como una baja reactividad del colorante en la etapa del agotamiento, un grado de blanqueo inferior en la etapa de blanqueo, la hidrólisis del colorante catalizada por ácido en la etapa de neutralización [2], o una incorrecta remoción del colorante absorbido y adsorbido debido a una neutralización insuficiente.

Para que la fibra que se está tiñendo salga dentro de los estándares permitidos, el pH es ajustado mediante el uso de diversas sustancias de carácter ácido, alcalino, anfótero o amortiguador que, para alcanzar un pH determinado, se agregan cantidades calculadas principalmente en base a la experiencia o la recomendación de los proveedores, como es el caso de la concentración de auxiliares de tintura, de electrolito, de álcali, o de peróxido de hidrógeno. No obstante, no hay una indicación o correlación que permita conocer la cantidad de ácido acético que se debe utilizar para hacer una correcta neutralización del baño y del sustrato, y, por lo tanto, a veces la manera de realizar este ajuste en el pH no es eficiente en tiempo y en el uso de producto. De aquí nace la necesidad de diferentes modelos matemáticos que permitan realizar un ajuste de una manera más eficiente y exacta. Ya que estos modelos pueden estar influenciados por todas las demás variables que afectan los procesos de tintura, se debe identificar estas variables mediante el uso de

conocimientos adquiridos en la práctica, tales como la adquisición de datos reales del proceso y la opinión de profesionales con una vasta experiencia en el área, referencias bibliográficas y el uso de herramientas estadísticas, como la regresión por mínimos cuadrados, las ecuaciones lineales múltiples, el coeficiente de determinación, entre otras. En definitiva, el objetivo de este trabajo va a ser el desarrollo de algunos modelos matemáticos que, por medio de la determinación del pH de neutralización con el uso de algunos parámetros de influencia en esta etapa, permitan calcular la concentración de ácido acético necesaria para realizar una correcta neutralización.

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria de tintura textil ha tenido grandes cambios a lo largo de los años. Desde el inicio de esta industria con el teñido de algodón y fibras naturales como el lino y la seda, el descubrimiento de las fibras sintéticas como el poliéster, el nylon, sus combinaciones entre sí y con fibras naturales ha abierto un sinfín de posibilidades y ha generado la necesidad de desarrollar productos y colorantes específicos para cada tipo de proceso.

La concentración que se necesita usar de estos productos y colorantes se ha ido estandarizando a través de los años. Por ejemplo, para la tintura de algodón hay numerosos métodos y productos para realizar cada una de las etapas de tintura, y existen artículos donde se menciona la concentración, orden y tipo de productos que son necesarios para realizar un blanqueo de algodón exitoso [3]; también se han realizado estudios y recomendaciones en la cantidad de electrolito y álcalis necesarios para que los colorantes reactivos se agoten en la cantidad esperada.

De la etapa de neutralización no se menciona mucho además de que es realizada con ácido acético, pero no se ha establecido una recomendación en cuanto a la concentración que se debe usar de este producto. Esto puede deberse a que el pH debe ajustarse a un rango entre 6,0 y 7,0, y la cantidad necesaria de ácido acético para alcanzar este pH dependerá de las peculiaridades de cada proceso de tintura al interior de una compañía o fábrica textil.

La importancia de obtener un pH de neutralización dentro del rango permitido se debe a dos problemas:

- La hidrólisis de algunos colorantes es catalizada por un pH ácido. Este fenómeno provoca la degradación de algunos grupos funcionales presentes en algunos tipos de colorantes, lo cual termina afectando la intensidad, el tono o ambos en el producto final [2]. En la Figura 1 se puede observar la apariencia de un tono en una tela correctamente neutralizada, y en la Figura 2 la apariencia de un tono neutralizado hasta un pH ácido.
- El uso de una cantidad insuficiente de ácido. Un pH levemente ácido ayuda a que el colorante adsorbido y absorbido en la tela se hidrolice a una mayor velocidad (sin afectar el colorante que ha reaccionado), facilitando su remoción ya que este colorante deja de interactuar con la fibra. Por lo tanto, realizar una neutralización insuficiente inhibe la

remoción completa del colorante adsorbido y absorbido en la tela, haciendo que la eficiencia de los lavados posteriores a la neutralización disminuya, dejando colorante sin reaccionar que puede terminar fijándose en los procesos de acabado, pudiendo generar una apariencia manchada.



Fig. 1. Fragmento de tela afectado por hidrólisis catalizada por ácido



Estos inconvenientes ocasionados por una incorrecta neutralización tienen una influencia importante y directa en la apariencia final del producto. Por esto, el desarrollo de un modelo matemático que permita ajustar el pH a los rangos indicados usando la cantidad correcta de ácido acético, es de gran utilidad para ahorrar tiempo y recursos en reprocesos causados por una incorrecta neutralización.

### III. JUSTIFICACIÓN

La etapa de neutralización en el proceso de tintura de algodones es una etapa muy importante del proceso, ya que es el enlace directo entre la tintura y los lavados finales antes de pasar al proceso de acabado. Dentro de la gran cantidad de variables que influyen en la apariencia final de una tela, una correcta neutralización es uno de los detalles que se deben cuidar para lograr esta apariencia adecuada. Tal como se ha mencionado anteriormente, existen fundamentalmente dos inconvenientes en caso de no lograr ejecutar la etapa de neutralización. Por una parte, una neutralización excesiva puede afectar el colorante llevando a cabo una reacción de hidrólisis, y, por otra, una neutralización insuficiente disminuye la remoción de colorante en los lavados posteriores a esta etapa.

Bajo este contexto que surge la necesidad de desarrollar un modelo que permita determinar la concentración de ácido acético necesaria para alcanzar un pH dentro del rango permitido (6,0 – 7,0). En la práctica, la etapa de neutralización puede ser bastante complicada pues cada proceso de tintura es diferente y existe una gran cantidad de variables que marcan estas diferencias como el color que se desea obtener, los álcalis y la concentración en que se utilizan, el tipo de electrolito (p.ej., sulfato de sodio o cloruro de sodio), la relación de baño, el tiempo de giro, los auxiliares de tintura y un sinnúmero más de variables. Algunas de estas variables pueden tener una influencia directa con la etapa de neutralización y la cantidad de ácido que se necesita para alcanzar el pH objetivo. Si para determinado proceso de tintura se utiliza una cantidad excesiva de ácido, se tendrá un gasto adicional de agua para intentar remover el exceso de ácido que se haya impregnado en la tela y así intentar corregir los defectos que esto puede provocar. Si, por otra parte, la cantidad de ácido recomendada es inferior a la requerida, será necesario adicionar progresivamente más ácido en función del pH que se vaya obteniendo en medidas consecutivas, lo que genera una pérdida de tiempo y energía mientras el ácido se dosifica y homogeniza en el medio para poder tomar una medida representativa del pH.

La determinación de un modelo matemático que permita calcular la concentración de ácido acético en función del pH es de gran utilidad para evitar tanto inconvenientes técnicos tales como la pérdida de tiempo o el daño de la tela, así como los inconvenientes económicos, tales como el uso innecesario de ácido, agua, energía o reprocesos.

#### IV. OBJETIVOS

##### *A. Objetivo general*

Establecer uno o varios modelos matemáticos para determinar la concentración de ácido acético en función del rango de pH permitido para la etapa de neutralización en la tintura de algodones.

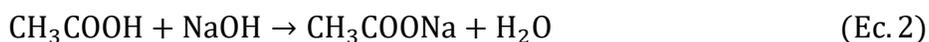
##### *B. Objetivos específicos*

- Reconocer y enumerar las variables que puedan tener influencia en la determinación y ajuste del pH en la etapa de neutralización.
- Realizar un análisis estadístico y basado en la experiencia práctica, que permita determinar las variables con un impacto significativo en el ajuste del pH de neutralización.
- Evaluar el desempeño de los modelos desarrollados para verificar su aproximación al comportamiento real del proceso.

## V. HIPÓTESIS

### A. Hipótesis de trabajo

Hay una gran cantidad de variables que pueden afectar la etapa de neutralización en la tintura de algodones. Sin embargo, hay algunas que se podrían identificar inicialmente y que podrían tener influencia por diversos fenómenos fisicoquímicos. Tal como su nombre lo indica, la etapa de neutralización se basa en la reacción de una base y un ácido que da como resultado una sal y agua [4]. En el proceso de tintura se realiza con el fin de neutralizar los iones hidroxilo que generan un incremento en el pH y mediante los cuales se produce el agotamiento del colorante. En la etapa de neutralización esencialmente se identifican dos reacciones principales que pueden llegar a ocurrir: la reacción del carbonato de sodio con el ácido acético (Ec. 1) [5], y la reacción del hidróxido de sodio con el ácido acético (Ec. 2).



Al tratarse de una reacción química, a mayor cantidad de uno de los reactivos (en este caso de la base o álcali) mayor cantidad se requiere del otro reactivo (ácido). Por lo tanto, la concentración de álcali va a ser una variable de relevancia en el estudio.

Existen otras variables que pueden tener influencia en la etapa de neutralización. Por ejemplo, el volumen de agua usado en el enjuague de la tela antes de agregar el ácido acético puede ser relevante teniendo en cuenta que una mayor cantidad de agua de lavado puede disminuir la cantidad de álcali absorbido y adsorbido en la tela. También en relación a la absorción de álcali, el calibre del hilo y la forma en la que está tejida la tela puede tener influencia en esta etapa. Por ejemplo, una tela tejida con una mayor cantidad de hilos por metro cuadrado va a tener mayor área de transferencia de masa disponible, lo que a su vez disminuye la oposición ejercida a las partículas para ingresar al intersticio de las fibras de algodón; de manera similar, una tela tejida con un hilo delgado o de mayor calibre, también tiene mayor área de transferencia de masa disponible. Esto puede significar que las telas que gozan de un área mayor pueden albergar una mayor cantidad de álcalis retenidos en su interior. Por lo tanto, a la hora de hacer el vaciado de agua de la máquina de teñido y pasar al lavado de neutralización, queda una mayor cantidad de esta álcalis en el interior de la tela, pudiéndose requerir una mayor cantidad de agua y de ácido para conseguir una neutralización adecuada. Otro tipo de situaciones relevantes para esta etapa

pueden ser: el pH que del conjunto de tela y baño, ya que este pH puede reflejar qué tan difícil va a ser disminuirlo hasta los rangos indicados; el pH del agua que está llegando a la planta también puede influir ya que se utilizan grandes cantidades de agua en la etapa; sin embargo, puede ser muy difícil cuantificar y determinar el pH del agua en todo momento pues se trata de una variable que fluctúa bastante.

### *B. Hipótesis estadística*

La relación que existe entre las variables mencionadas va a tener una influencia significativa en la correlación de los datos, y esto va a permitir encontrar un modelo matemático en términos de la menor y más significativa cantidad de variables posibles.

1) *Hipótesis nula:* La cantidad de ácido acético necesaria para neutralizar la tela y el baño no depende de otros parámetros además de la reacción de neutralización entre el ácido y el álcali.

a) *Hipótesis alterna:* La cantidad de ácido acético necesaria para neutralizar la tela y el baño depende de otros factores físicos además de la reacción de neutralización entre el ácido y el álcali.

## VI. MARCO TEÓRICO

La influencia del pH en los procesos de tintura ha hecho que se estudien los valores o rangos de valores que se deben alcanzar para que el proceso de tintura sea exitoso, valores que dependen significativamente del tipo de fibra y de la etapa en la que se encuentre. En el teñido de las fibras como el nylon y el poliéster se debe garantizar valores de pH ácidos que permitan desencadenar los fenómenos por los cuales el colorante se fija dentro de la fibra, mientras que fibras como el algodón deben permanecer en pH alcalinos para que estos mismos fenómenos ocurran [1]. Existen otras etapas del proceso que no corresponden a la fijación del color dentro de la fibra, pero que deben realizarse para que la calidad del producto sea la solicitada por el cliente. Numerosos estudios mencionan la importancia del pH en los procesos de tintura, así como algunas recomendaciones de la concentración de productos que en, base a la experiencia, son necesarios para que esta etapa sea exitosa. No obstante, hay poca información al respecto de un modelo que permita un control eficiente y que se pueda aplicar a cada proceso independiente. De hecho, algunos estudios mencionan que es sumamente difícil crear un modelo matemático exacto debido a la baja linealidad de los procesos de tintura [6], y por esta razón es que se opta por un control tipo *fuzzy* o influenciado principalmente por el conocimiento empírico o del operario. Justamente, todo este conocimiento puede ser aprovechado para identificar parámetros que puedan influir en la determinación del pH, y con ayuda de la estadística se puede observar si dichos parámetros tienen una influencia real dentro del proceso.

### Conceptos teóricos.

- pH: El pH o potencial de hidrógeno, es una medida de la concentración de hidrogeniones y representa el grado de acidez o alcalinidad de una disolución [7].
- Baño de tintura: Aunque no se define de manera explícita en los textos de procesos textiles, el baño de tintura hace referencia a la solución acuosa en la cual se diluyen los auxiliares, colorantes, electrolitos y demás compuestos utilizados en el proceso de tinción y que es puesta en contacto con la fibra o sustrato.
- Fibras textiles naturales: Son esencialmente constituidas de celulosa y se encuentran en la naturaleza en combinación con otras sustancias, siendo más común la lignina.

Contienen, también, impurezas tales como, gomas, resinas, grasas, ceras y pigmentos [1].

Algunas de estas fibras son el algodón, la viscosa, el lino etc.

- Fibras textiles sintéticas: En la fabricación de estas fibras se parte de sustancias orgánicas de bajo peso molecular, con las cuales se fabrican los monómeros. Éstos reaccionan por adición simple (polimerización) o adición con pérdida de agua (policondensación) para formar moléculas grandes de cadenas lineales (macromoléculas), con alto peso molecular [1]. Algunas de estas fibras son el nylon y el poliéster.
- Agotamiento: Proceso por el cual el colorante es desplazado del baño de tintura a la fibra. Esta etapa se puede dar en medio ácido o alcalino dependiendo del tipo de fibra: por ejemplo, en los algodones esta etapa se presenta en medio alcalino [1].
- Tintura: Acción y efecto de teñir [8], específicamente una fibra textil.
- Modelo matemático: Un modelo matemático es una representación mediante ecuaciones de la relación entre distintas variables, parámetros y restricciones.
- pH-metro: Instrumento de medición para determinar el valor del pH.
- Velocidad de montaje: Es la velocidad con la cual el colorante se monta dentro de la fibra [1].
- Migración de color: Es la propiedad del colorante de permanecer durante la fase de equilibrio en constante movimiento, montando en la fibra y retornando al baño sucesivamente [1]. Este fenómeno es determinante a la hora de obtener una buena igualación en la fibra.
- Igualación: Se refiere a la uniformidad del color en toda la superficie de la fibra. Una buena igualación indica una fibra en la que el color se encuentra uniformemente repartido por toda la superficie.
- Análisis estadístico: Es la ciencia de recopilar, explorar y presentar grandes cantidades de datos para descubrir patrones y tendencias implícitos [9].
- Diseño de experimentos (DoE): Es un método sistemático utilizado en estadística aplicada para evaluar las numerosas alternativas posibles en una o varias variables de diseño. Permite manipular varios factores de entrada para determinar qué efecto podrían tener para obtener el resultado deseado o mejorar el resultado [10].

- Tono o matiz: Es el nombre que se le da a cada color [11]. Específicamente en procesos textiles, se refiere al color obtenido por la mezcla de diferentes colorantes, el cual debe asemejarse a un patrón de comparación.
- Intensidad: Es la cantidad de energía que llega a una determinada sección por unidad de tiempo [12]. Esta propiedad debe asemejarse a un patrón de comparación.
- Regresión lineal múltiple: Es un modelo que, mediante el uso de variables independientes linealizables, trata de predecir el comportamiento de una variable dependiente [13].
- Neutralización: Es la reacción entre un ácido y una base en la cual se genera una sal, agua y algunas otras sustancias dependiendo de los reactivos y sustancias que se encuentren presentes en el medio de reacción. Específicamente, en los procesos de tintura de algodones, una neutralización se refiere a la reacción entre el álcali (comúnmente carbonato de sodio o hidróxido de sodio) y el ácido (comúnmente ácido acético) con el fin de garantizar un rango de pH entre 6,0 y 7,0 para pasar a la etapa de jabonado.
- Control de procesos: Es una disciplina de la Ingeniería Química y de otras profesiones. Su principal aplicación es el análisis, diseño y automatización en aquellos procesos que así lo requieran [14].
- Tintura de algodones: Es un proceso compuesto por varias etapas en las que intervienen operaciones físico químicas con el fin de otorgar un color al algodón, así como las características necesarias para avanzar en procesos posteriores para la obtención del producto final. Las etapas que intervienen en estos procesos son: semi blanqueo, preparación de baño de tintura, migración de color, agotamiento, neutralización y jabonado (en algunos procesos se pueden incluir etapas adicionales como un *antipilling*, fijado y suavizado).
- Semi blanqueo de algodón: Es el proceso mediante el cual se remueven sustancias tales como aceites, resinas, ceras, semillas y suciedad del algodón que le otorgan propiedades de hidrofobicidad, aspereza y color. El objetivo principal de este proceso es obtener un algodón limpio, hidrofílico y con mayor suavidad al tacto. Comúnmente se utiliza peróxido de hidrógeno en un medio alcalino para ejecutar este procedimiento.
- Preparación de baño de tintura: Es la etapa inmediatamente anterior a la migración de color, en la cual se agregan auxiliares de tintura tales como secuestrantes, igualadores,

anti-quebres, electrolitos, etc., con el fin de adecuar el baño de tintura a las diferentes condiciones que se pueden presentar durante todo el proceso, tales como presencia de iones metálicos, mareos, poca afinidad entre el colorante y la fibra, quebres en la tela, entre otros.

- Jabonado: Es la etapa posterior a la neutralización. En esta se busca la remoción completa del colorante que se encuentre hidrolizado en la tela. Es una etapa fundamental para garantizar la solidez final del producto.
- Mareo: Este fenómeno se debe a la baja o nula igualación del colorante sobre la tela, obteniéndose manchas de difícil remoción. Entre las causas más comunes de este fenómeno se encuentran la ausencia de igualador o la presencia de iones metálicos en el baño de tintura.
- Calibre: Es el grosor del hilo con el cual se teje la tela. Entre mayor sea el valor de este atributo más delgado es el hilo, y entre menor sea el calibre, más grueso es el hilo.
- Jersey: Son telas de punto flexibles y cómodas, de fácil estiramiento y adaptabilidad, tanto a lo largo como a lo ancho. Pueden ser elaboradas con distintas variedades de fibras [15]. Con esta tela se fabrican principalmente prendas de vestir. Es la tela principal o mayoritaria en la mayoría de las prendas.
- Rib: Es un tejido acanalado, que genera buena elasticidad transversal. Es de fácil corte y confección. Se usa generalmente para cuellos, puños o pijamas [16].
- Regresión por mínimos cuadrados: Es un método de regresión en el cual se busca minimizar la suma de residuos cuadrada (SSR) la cual obedece a la siguiente ecuación [17].

$$SSR = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

$y_i$ : Datos reales

$\hat{y}_i$ : Datos obtenidos por un modelo matemático

Al minimizar esta función se está garantizando la mejor relación entre los datos reales y los datos calculados mediante un modelo matemático, ya que dependiendo del modelo matemático se puede alcanzar un mínimo relativo inferior al que ya se había obtenido

anteriormente, garantizando una mejor correlación. Un parámetro que permite medir la correlación que existe entre los datos reales y los calculados por el modelo es el coeficiente de correlación ( $R^2$ ), el cual calcula la diferencia relativa que existe en la suma de cuadrados total y la residual. Este parámetro varía entre 0 y 1: un valor muy cercano a 0 significa que hay poca correlación entre los datos, mientras que un valor más cercano a 1 significa que hay una mejor correlación; si es exactamente 1, la correlación es perfecta. El cálculo del coeficiente de correlación se muestra a continuación.

$$R^2 = \frac{SST - SSR}{SST} \quad (\text{Ec. 4})$$

En los modelos de regresión múltiple se suele utilizar un coeficiente de correlación ajustado, el cual ajusta el valor de este coeficiente deduciendo el efecto causado por la adición de más de un factor a la ecuación o modelo. Este coeficiente de correlación se muestra en la siguiente ecuación [18].

$$R_a^2 = 1 - \left( \frac{n-1}{n-k} \right) \cdot (1 - R^2) \quad (\text{Ec. 5})$$

- Eficiencia de neutralización: Es un concepto que se fue desarrollando a lo largo del presente trabajo. Compara la cantidad de muestras de neutralización que se ajustan a un pH entre 6,0 y 7,0 con respecto al total de las muestras tomadas, para evaluar la eficiencia de un modelo matemático, la concentración sugerida por la fórmula de proceso o las heurísticas desarrolladas acerca de la neutralización. La expresión matemática con la cual se calcula el valor de este parámetro se muestra en la Ec. 6.

$$Ef_{neut} = \frac{\text{Muestras con pH [6,0 - 7,0]}}{\text{Total de muestras}} \quad (\text{Ec. 6})$$

- Heurísticas: Son guías basadas en el método inductivo que se van desarrollando durante el diseño, operación o mantenimiento de un proceso químico. Estas guías no garantizan una única solución, y a veces se contradicen unas con otras, pero suelen disminuir el tiempo que gasta la resolución de un problema. Su acierto, más allá del entorno en donde se han desarrollado, dependen del contexto inmediato en donde están siendo utilizadas [19].

## VII. METODOLOGÍA

Para desarrollar modelos matemáticos representativos es necesario identificar diferentes variables cuantitativas y cualitativas que estén asociadas al cambio del pH en el baño de tintura. Para esto se tomaron datos de cada una de las variables identificadas como significativas mediante las tarjetas de información del proceso, las cantidades indicadas en la fórmula, las cantidades extras que se agregan, usando instrumentos de medidas específicos como el pH-metro. Posteriormente, todos los datos recolectados se procesaron mediante técnicas de tratamiento de datos estadísticos que permitieran determinar cuáles son las variables que tienen un real impacto sobre el pH en el proceso. La toma de medidas directas, tales como el pH, se realizaron independientes del tiempo y solo fue de importancia su registro en el momento anterior y posterior de agregar el ácido acético a la máquina; la información del pH de la máquina se toma por medio de un grifo que sale de las tuberías por las cuales está circulando en todo momento el baño de la máquina. La muestra del baño de la máquina se extrae con el fin de identificar el cambio que esta sustancia produce en el baño de tintura. En una tercera fase, los modelos desarrollados para cada fase del proceso de tintura se evaluaron para verificar su desempeño en la predicción del pH, específicamente utilizando el modelo matemático desarrollado para calcular la cantidad de ácido acético “necesaria” para garantizar que el pH sea neutralizado hasta un rango comprendido entre 6,0 y 7,0. Después de agregar la cantidad calculada de ácido acético, se midió el pH con los procedimientos descritos anteriormente, y, en caso de que fuera necesario agregar una cantidad adicional de ácido debido a que la neutralización fue insuficiente, se utilizó nuevamente el modelo para poder determinar dicha cantidad.

Además de la toma de datos principales, se realizaron otros experimentos adicionales como parte de la identificación de las variables o parámetros representativos del modelo. La importancia de algunas de estas variables se puede explicar por diversos fenómenos físico químicos, pero existen otras que pueden no ser tan evidentes, tales como el calibre del hilo en la neutralización del pH. Para verificar el efecto que esta variable puede tener, se tomaron varias muestras de tela con diferente calibre de hilo y se determinó su masa en seco; posteriormente se sumergieron en una cantidad abundante de agua durante suficiente tiempo, se sacaron del baño en el que se

encontraban y se esperó hasta que el goteo de la tela se detuviera o fuera insignificante; por último, se tomó el peso de las muestras húmedas y se calculó el factor de absorción de la tela.

## VIII. RESULTADOS

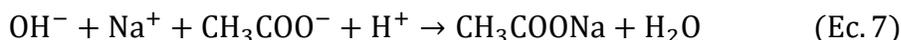
Los datos obtenidos se dividieron en dos clases diferentes, ya que, como se discutió en la hipótesis, la reacción de neutralización del carbonato de sodio es diferente a la reacción de neutralización del hidróxido de sodio, dependiendo la cantidad necesaria de ácido acético para neutralizar uno u otro proceso va a variar además de la cantidad de la naturaleza del álcali.

En total se recolectaron 34 datos de procesos realizados con carbonato de sodio e hidróxido de sodio, y 46 datos de procesos realizados solo con carbonato de sodio. Inicialmente se extrajeron los mismos datos o parámetros de la ficha técnica de la tintura para cada grupo de procesos, tanto para los C/S como para los C/C. Los parámetros que se identificaron de relevancia para la etapa de neutralización fueron los siguientes.

### A. Selección de variables significativas para el modelo matemático.

- pH antes de agregar el ácido acético y pH de ajuste.

El pH antes de agregar el ácido acético se identificó como un parámetro de relevancia debido principalmente a que la cantidad de ácido que se debe agregar para llegar al rango de pH objetivo depende del valor de pH actual: la concentración de iones hidroxilo disminuye a medida que lo hace el pH, por lo tanto, y debido a la naturaleza de las reacciones de neutralización, a medida que el pH disminuye la cantidad de hidrogeniones que se deben agregar para alcanzar un pH más ácido también van disminuyendo,. Por ejemplo, para alcanzar un pH de 6,5 partiendo de un pH de 10,5, se debe agregar mayor cantidad de ácido a la que se debería agregar si se parte de un pH de 8,5. El principio químico de este parámetro parte de la siguiente reacción de neutralización entre el hidróxido de sodio y el ácido acético en forma iónica.



Como se puede observar en la Ec. 7, al tener una concentración mayor de iones hidroxilo, será necesario agregar una mayor concentración de iones de hidrogeniones para que el pH

disminuya. En efecto, el pH en función de la concentración de hidrogeniones está dada por [20]:

$$\text{pH} = -\log([\text{H}^+]) \quad (\text{Ec. 8})$$

A pesar de que este parámetro es de gran influencia para la determinación del pH no es el único. Como se verá más adelante, la concentración de ácido acético necesaria para ajustar el pH a un rango entre 6,0 y 7,0 puede ser diferente para un mismo pH de partida o de ajuste.

- Concentración de carbonato de sodio o de hidróxido de sodio.

Como se ha mencionado anteriormente, la toma de datos se dividió en dos categorías diferentes debido a la naturaleza del fenómeno que ocurre, la cual es la reacción de neutralización, tanto para el carbonato de sodio (Eq.1) como para el hidróxido de sodio (Eq.2). De manera análoga a lo que sucede con el pH antes de agregar el ácido acético o el pH de ajuste, la concentración de álcali incide fuertemente en la concentración de ácido acético que se debe agregar para alcanzar el pH deseado. Es evidente que si el objetivo de una reacción química es agotar uno de los reactivos (en este caso el álcali o la base) habrá que utilizar una cantidad proporcional o equivalente a la que se encuentra de la otra sustancia en el medio de reacción.

Se podría pensar que existe una relación directa entre el pH antes de agregar el ácido o de ajuste y la concentración de álcali. La existencia de esta colinealidad podría significar un error al momento de utilizar la regresión lineal múltiple, ya que no debe existir entre un factor y otro. Esta hipótesis se plantea debido a que la naturaleza del fenómeno es la misma, pero la correlación pierde linealidad o directamente no la tiene cuando se considera la constante de disociación de las sustancias que se encuentran presentes, ya que el cambio del pH en función de la concentración varía en escala logarítmica mientras que la concentración de la sustancia lo hace de manera lineal. Para una sustancia pura, el fundamento científico se explica de mejor manera tomando el ácido acético como ejemplo: La reacción de disociación del ácido acético en agua se muestra en la Ec. 9, y la constante de equilibrio o de disociación en función de esta reacción se define en la Eq. 10.



$$K_a = \frac{[\text{CH}_3\text{COO}^-][\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{CH}_3\text{COOH}]} \quad (\text{Ec. 10})$$

Considerando el agua como una sustancia pura, su concentración se asume como 1. Para esta reacción se considera que se consume una cantidad  $x$  de ácido acético, y que se genera una cantidad  $x$  de acetato y de ion hidronio. Por lo tanto, haciendo una sustitución de variables y utilizando la Ec. 8, el pH se podría obtener como:

$$\text{pH} = -\log\left(\frac{-K_a + \sqrt{K_a^2 + 4 K_a [\text{CH}_3\text{COOH}]}}{2}\right) \quad (\text{Ec. 11})$$

La constante de disociación del ácido acético a diferentes temperaturas puede encontrarse en literatura científica [21]. Por lo tanto, la expresión para determinar el pH de la disociación de una sustancia pura en agua queda en términos de la concentración de esta. Claramente, en un proceso de tintura nunca se va a encontrar una sustancia pura solubilizada en agua, pero la dinámica del fenómeno sigue siendo válida e independiente de la naturaleza de la sustancia, pues en las bases también ocurre el mismo comportamiento: a medida que se va aumentando la concentración de la sustancia que se agrega, el cambio en el pH se hace menor tal como se observa en la siguiente gráfica.

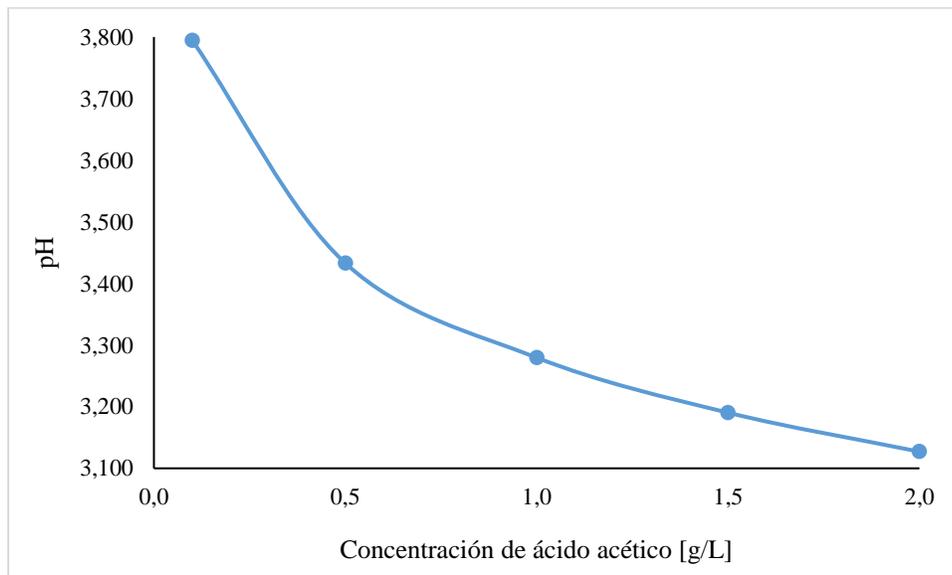


Figura 3. Variación del pH de una disolución de ácido acético a diferentes concentraciones.

- Relación de volumen de lavado respecto al volumen de agua utilizado por la máquina.

Una variable que tiene relación con la neutralización del pH es la cantidad de agua utilizada para realizar el lavado de la tela antes de agregar el ácido acético. Una mayor cantidad de agua representa una mejor remoción de álcali, electrolito y colorante retenido sobre la superficie de esta, por que al incrementar la cantidad de agua en el lavado previo a la neutralización se tiene una disminución en el uso de ácido acético para alcanzar el rango de pH objetivo. A pesar de que se podría lavar la tela hasta el punto en el que la cantidad de colorante, electrolito y álcali sean mínimas, hay regulaciones ambientales que limitan la cantidad de agua que las empresas deben utilizar en cierto intervalo de tiempo. Por lo tanto, ya que el objetivo principal de este lavado es la remoción de colorante se suele utilizar una mayor cantidad de agua entre más oscuro sea el color que se está tiñendo. La expresión mediante la cual se representa la relación entre el volumen de lavado y el volumen utilizado por la máquina se muestra en la Ec. 12. Generalmente en los procesos de tintura los volúmenes se expresan en litros, pero lo importante es que esta relación sea adimensional.

$$\psi = \frac{\text{Volumen}_{\text{lavado}}}{\text{Volumen}_{\text{proceso}}} \quad (\text{Ec. 12})$$

- Calibre del hilo con el cual se teje la tela.

La tela es un tejido de una gran cantidad de hilos de determinado grosor en cierto orden. De manera análoga a lo que sucede con los cables metálicos, el calibre de un hilo indica qué tan grueso o delgado es, de un valor de calibre menor a uno mayor el hilo se va adelgazando. Un hilo más delgado permite tejer un tela con una mayor densidad de hilos por metro cuadrado de superficie, generando una mayor área de superficial e incidiendo en los fenómenos de transferencia de masa entre la tela y las sustancias que se impregnan sobre ella, tales como el baño de tintura, el colorante, etc. De cierta manera la tela actúa como un filtro que absorbe las sustancias que se encuentran solubilizadas en el baño de tintura. En este sentido, la velocidad de filtrado es proporcional al área del filtro; esto se puede observar de mejor manera mediante una deducción de la teoría de Carman [22].

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A^2 (-\Delta P)}{r_c \mu \Phi V} \quad (\text{Ec. 13})$$

En esta ecuación el término de la izquierda es la velocidad de filtrado y el término  $A$  es el área del medio filtrante. Una mejor transferencia de masa o filtrado por parte de la tela asegura una mayor absorción de sustancias dentro de ella. Puesto que entre dichas sustancias se encuentra el álcali, después del vaciado del baño de tintura, una mayor cantidad de este álcali queda impregnado o absorbido en la tela.

El efecto que tiene el calibre de la tela en la absorción o filtrado de sustancias se verificó con un simple experimento en el que se humedecen telas de diferente calibre para determinar la cantidad de agua que fue absorbida por la tela,. Los resultados de este experimento se muestran en la Tabla I.

TABLA I  
RESULTADOS DE PRUEBA DE HUMECTACION EN TELAS DE DIFERENTE CALIBRE

Referencia	Peso seco [g]	Peso húmedo [g]	Calibre	Absorción
51253	10,11	33,67	20	2,33
49825	9,99	31,87	24	2,19
46740	10,14	36,89	26	2,64
40776	10,1	38,49	30	2,81
41282	10,17	40,21	36	2,96

El parámetro de absorción es obtenido mediante la Ec. 14:

$$\text{Absorción} = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \quad (\text{Eq. 15})$$

La tendencia de este parámetro incrementa a medida que el calibre lo hace. A un calibre de 24 se observa un decrecimiento que no corresponde a la tendencia.

- Concentración de ácido acético.

La importancia de esta variable dentro del modelo matemático que se va a desarrollar es indiscutible.

*B. Regresión lineal múltiple.*

Después de haber encontrado los parámetros de importancia para el desarrollo del modelo matemático se tomaron datos reales del proceso; estos datos pueden ser consultados en el Anexo A.

Un modelo de regresión lineal múltiple tiene la forma general de:

$$y = \epsilon + A x_1 + B x_2 + C x_3 + \dots N x_n \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde:

$\epsilon$ : Término independiente

$A, B, C, N$ : Coeficientes de regresión de cada factor

$x_1, x_2, x_3$ : Factores o parámetros de la ecuación

Específicamente, las ecuaciones de regresión para cada uno de los procesos C/C y C/S se muestran en la Ec. 16 y Ec. 17, respectivamente.

$$pH = \epsilon + \alpha pH_{antes} + \beta [Na_2CO_3] + \gamma [CH_3COOH] \quad (\text{Ec. 16})$$

$$pH = \epsilon + \alpha pH_{antes} + \beta [NaOH] + \gamma [CH_3COOH] + \mu \Psi + \theta Calibre \quad (\text{Ec. 17})$$

Para obtener el valor de los coeficientes de regresión se utilizó el complemento Solver de Excel mediante la metodología de regresión por mínimos cuadrados.

Los coeficientes de regresión obtenidos se muestran en la Tabla II.

TABLA II  
COEFICIENTES DE REGRESIÓN OBTENIDOS

Parámetros	C/C	C/S
$\epsilon$	5,851	8,231
$\alpha$	0,172	-0,139
$\beta$	0,17	0,602
$\gamma$	-1,816	-3,622
$\mu$	-	-0,701
$\Theta$	-	0,053

Los coeficientes de correlación tradicionales y ajustados se muestran en la Tabla III.

TABLA III  
COEFICIENTES DE CORRELACION PARA CADA PROCESO

Proceso	$R^2$	$R_a^2$
C/C	0,544	0,522
C/S	0,659	0,612

*C. Modelo matemático a utilizar.*

Finalmente, después de determinar los coeficientes de los parámetros que se tuvieron en cuenta para el desarrollo de los modelos matemáticos, se puede despejar la concentración de ácido acético como variable de interés o de manipulación para el ajuste del pH de neutralización obteniendo la Ec. 18 para los procesos C/C y la Ec. 19 para los procesos C/S. El valor para los coeficientes de estas ecuaciones se encuentran en la Tabla II.

$$[\text{CH}_3\text{COOH}] = \frac{pH - \epsilon - \alpha pH_{antes} - \beta [\text{Na}_2\text{CO}_3]}{\gamma} \quad (\text{Ec. 18})$$

$$[\text{CH}_3\text{COOH}] = \frac{pH - \epsilon - \alpha pH_{antes} - \beta [\text{NaOH}] - \mu \Psi - \theta \text{Calibre}}{\gamma} \quad (\text{Eq. 20})$$

*D. Evaluación y validación del modelo.*

De manera similar a como se recolectaron los datos para la determinación del modelo, se hizo la evaluación y validación del mismo. Se identificaron los procesos de tintura de algodón y se recolectó la información necesaria para determinar la concentración de ácido acético necesaria para lograr una correcta neutralización (pH entre 6,0 y 7,0); la información de los procesos en los cuales se evaluó el modelo se encuentra detallada en el Anexo B. Además, haciendo uso de los datos recolectados para la determinación del modelo (Anexo A), se evaluó la eficiencia de neutralización de cada una de las ecuaciones, tanto para los procesos C/C como para los procesos C/S; los resultados se muestran en la Tabla IV.

TABLA IV.  
EFICIENCIA DE NEUTRALIZACIÓN PARA LOS PROCESOS C/C Y C/S ANTES Y DESPUÉS DEL MODELO

Datos	C/C	C/S
A.M	36,96%	32,35%
D.M	63,64%	57,89%

Nota: A.M: antes del modelo, D.M: después del modelo.

## IX. DISCUSIÓN

### *A. Identificación y desarrollo del modelo.*

La determinación de los modelos matemáticos para cada uno de los procesos (C/C y C/S) se hizo basados en la determinación de parámetros que tenían influencia directa en la etapa de neutralización. Tal como se explicó en la sección de resultados, se buscó que estos parámetros representaran la mayor cantidad de fenómenos que pueden existir dentro de un proceso de tintura, tales como: las reacciones químicas que, se tuvieron en cuenta por medio de los parámetros del pH antes de agregar el ácido acético o de ajuste y también de la concentración de carbonato de sodio o de hidróxido de sodio; la transferencia de masa entre la tela y el baño, que se tuvo en cuenta mediante la inclusión parámetro de calibre del hilo con el que está tejido la tela; la eficiencia de enjuague de las sustancias sobrantes de la tintura mediante la relación de volumen de lavado y volumen de proceso de la máquina; y, por último, la variable más importante es la concentración de ácido acético que se agrega para neutralizar el pH al rango de interés (6,0 – 7,0).

Para dar una mayor certeza y validez al modelo que se desarrolló, se intentó realizar una prueba de análisis de varianza (ANOVA). Sin embargo, el software en el cual se intentó realizar esta prueba determinó que a los datos que se estaban ingresando no era posible realizarles esta prueba. Una posible razón es que los datos experimentales no obedecen a un diseño de experimentos convencional, tal como lo puede ser un diseño de experimentos factorial, que identificando el tipo de proceso que se estaba llevando a cabo sería el más adecuado para el caso; específicamente, para la cantidad de factores que se estaban considerando se hubiese podido desarrollar un diseño de experimentos factorial de 5 factores y 3 niveles, lo cual sería un total de 243 muestras. No obstante, el problema fundamental obedece al objetivo de un proceso de tintura, que es otorgar un color específico a una tela, y para que esto se pueda hacer adecuadamente se deben de seguir ciertos patrones o recomendaciones en cuanto a la concentración de algunos productos que se utilizan o la cantidad de agua con la que se lava, principalmente. Estos experimentos podrían ser realizados a escala de laboratorio, pero no serían representativos para el objetivo de mejoramiento que se está buscando en planta, pues los procesos en las máquinas de producción

son muy diferentes a los procesos que se llevan a cabo en el laboratorio. De otra parte, algunas combinaciones de niveles no serían técnicamente correctas, por ejemplo, un color oscuro con una concentración menor de álcali a la que se trabaja normalmente, ya que el colorante no tendría la fuerza suficiente para agotarse hasta el punto de que se encuentra estandarizado actualmente. Por esto, autores que han trabajado los procesos de tintura mencionan la dificultad en el desarrollo de modelos matemáticos que permitan la optimización de algunas etapas del proceso [6].

Otras de las razones por las cuales a los datos no se les pudo realizar el análisis de varianza es por los supuestos que se deben cumplir para que las pruebas que se realizan tengan validez. Estos supuestos son: normalidad, homocedasticidad y no colinealidad; el supuesto que mayor incidencia pudo haber tenido en estas razones es la homocedasticidad, la cual asume que la varianza del error estocástico para cada observación es la misma o, en otras palabras, la varianza solo se debe al error aleatorio y no a la ausencia de otros parámetros que puedan tener influencia dentro de la regresión que se está llevando a cabo. Este fenómeno es fácilmente observable en los datos experimentales, Anexo A, y es que para dos medidas diferentes a los mismos niveles del factor se pueden encontrar resultados muy diferentes.

A pesar de que los estudios previos a la realización del modelo no daban claridad en cuanto a la regresión, uso y validación del modelo, se utilizaron herramientas tales como la experiencia de algunos integrantes de la empresa, así como la evidencia encontrada y los conocimientos adquiridos para identificar los parámetros y obtener los modelos matemáticos. Entre algunas de las observaciones que se hicieron, está la existencia de una solución amortiguadora con el carbonato de sodio [23] (estas soluciones tienen como objetivo mantener el pH constante), pero para los propósitos del proceso no es deseable que esto suceda y es una variable que tiene mayor dominio que las otras que se estaban teniendo en cuenta. Por lo tanto, el efecto del calibre y de la relación de volumen de lavado en los sistemas C/C era prácticamente despreciable. Con los sistemas C/S, al contrario, al tratarse de una base fuerte no forma ácidos conjugados que generen una solución buffer, por lo que la influencia de las demás variables sobre el pH tenía mayor relevancia y sensibilidad.

Por otra parte, las ecuaciones obtuvieron un coeficiente de correlación medio o regular. Por lo tanto, la aproximación de los valores obtenidos mediante el modelo difieren en cierta medida con los obtenidos en la realidad. Por lo tanto el término de pH se puede usar más a nivel de recomendación que un valor fijo como tal. A medida que se ha venido utilizando la ecuación, se

ha notado que este parámetro que, teóricamente sería el pH al que se desea llegar al calcular la concentración de ácido acético, funciona adecuadamente bien con valores entre 7,2 y 7,4 para la ecuación de C/C (Ec. 18) y con valores de entre 6,2 y 6,5 para la ecuación de C/S (Ec. 19). La selección de este pH objetivo va en función de las características del proceso, por ejemplo para colores más claros (o de alta concentración de álcali) los valores cercanos a 7,2 funcionan mejor en la ecuación C/C mientras que los valores de 6,5 funcionan mejor para los procesos C/S. De manera análoga, para los colores oscuros, los valores de 7,4 funcionan mejor para la ecuación C/C mientras que los valores cercanos a 6,2 funcionan mejor para los procesos con C/S. Por otra parte, en caso de que sea necesario ajustar el pH ya que quedó por encima del rango de neutralización (6,0 a 7,0), el valor para este parámetro de "pH" ha funcionado de buena manera con un valor entre 6,5 y 6,6 para los procesos C/C y un valor de 5,8 a 6,0 para procesos C/S.

Uno de los principales beneficios del modelo matemático que se desarrolló, es que la cantidad de ácido que se agregaban para diferentes procesos estaba muy estandarizada y no variaba significativamente con los parámetros que se han mencionado hasta el momento. Por lo tanto, la cantidad que se utilizaba podía llegar a ser minúscula, adecuada o exagerada en algunos de los casos, mientras que el modelo permite acercarse más a la cantidad real de ácido que se necesita para obtener el rango de pH de neutralización. Además, luego de agregar la cantidad establecida por la fórmula de proceso, y que el pH quedara por encima del rango adecuado, no se tenía una visión clara de la cantidad que se debía agregar nuevamente para alcanzar este pH. Este es uno de los problemas que soluciona el modelo matemático implementado, ya que, por ejemplo, en los procesos C/S tiene una gran eficiencia de neutralización después de haber agregado la primera cantidad de ácido acético. Aunque no es el objetivo principal del estudio, es un beneficio que ahorra tiempo y dinero ya que agiliza el proceso de neutralización que antes podía tomar hasta cinco adiciones de ácido intentando no exceder la cantidad de ácido necesaria para ajustar el pH. En relación a la cantidad de ácido acético que se debe agregar después de haber hecho la primera adición, también se han desarrollado algunas heurísticas que, a pesar de no ser tan eficaces, pueden ser de utilidad en caso de no disponer de mucho tiempo para calcular la cantidad de ácido por medio del modelo. Estas heurísticas van en función del pH que se obtenga después de agregar la primera adición de ácido acético, y determinan la concentración recomendada para ajustar el pH hasta el rango de neutralización; la heurísticas se presentan en la Tabla V.

TABLA V  
HEURISTICAS PARA LA ADICIÓN DE ÁCIDO DEPENDIENDO DEL pH OBTENIDO

Rango de pH obtenido	[CH <sub>3</sub> COOH]
>9,8	1,3[CH <sub>3</sub> COOH] <sub>0</sub>
9,0<pH<9,8	[CH <sub>3</sub> COOH] <sub>0</sub>
8,5<pH<9,0	2/3 [CH <sub>3</sub> COOH] <sub>0</sub>
8,0<pH<8,5	0,5 [CH <sub>3</sub> COOH] <sub>0</sub>
7,5<pH<8,0	0,4[CH <sub>3</sub> COOH] <sub>0</sub>
7,0<pH<7,5	0,3[CH <sub>3</sub> COOH] <sub>0</sub>

Nota: [CH<sub>3</sub>COOH]<sub>0</sub> hace referencia a la cantidad inicial que se agregó de ácido acético.

*B. Evaluación y validación del modelo.*

Después de establecer el modelo y utilizando la información recolectada para la determinación de este, se empezó a hacer uso de las ecuaciones para los procesos C/C y C/S. Tal como se mencionó anteriormente, se utilizó la variable de “pH” como un parámetro de calibración de la ecuación, ya que además de los parámetros que se identificaron, y específicamente el calibre de la tela, existen significativas diferencias entre los distintos tipos de telas que existen (jersey, rib, falso fleece, interlock, etc.). Debido a la estructura de fabricación de cada uno de estos, pueden presentar diferencias en el factor de absorción, lo cual, como ya se ha evidenciado, tiene significativo efecto en los fenómenos de transferencia de masa a lo largo del proceso, entre ellos la dificultad que uno u otro presenta a la hora de neutralizar el pH correctamente. Este fenómeno se puede evidenciar en la información del Anexo A, ya que telas como el rib suelen presentar mayor dificultad al momento de neutralizarlas correctamente. Sin embargo, debido a la dificultad que presenta la determinación del factor de absorción de cada una de las telas que se procesan día a día y que hay algunos tipos de tela que no se suelen procesar a menudo, lo cual dificulta la recolección de datos, se decidió no incluir este parámetro como uno significativo de la tela, sino dejarlo como propuesta para un estudio futuro de la etapa de neutralización. A pesar de que este parámetro no pudo ser incluido dentro de las ecuaciones, como se mencionó al principio es posible observar la dificultad que presentan algunos tipos de tela para neutralizarse. Por lo tanto, se puede otorgar un menor valor de pH dentro de la ecuación para que esto compense con un mayor uso de ácido acético.

Por otra parte, la incorporación del uso del modelo a los procesos de tintura de algodón significan una importante mejoría a la estandarización de la etapa de neutralización, pues se evidencia un incremento en la eficiencia de neutralización de 36,96% a 63,64% para los procesos C/C y de 32,35% a 57,89% en los procesos C/S. De manera rápida se puede concluir que con el uso del modelo matemático desarrollado se aumenta la facilidad de ejecutar esta etapa del proceso, lo cual puede significar un importante de ahorro de tiempo y dinero para la empresa.

## X. CONCLUSIONES

A pesar de que la industria textil y, específicamente los procesos de tintura de algodones, hace parte importante de la sociedad, no se ha profundizado mucho en el estudio de la etapa de neutralización, la cual es parte importante de este proceso ya que su correcta ejecución hace parte de un adecuado desarrollo del producto final. Se han hecho recomendaciones de algunas sustancias, principalmente del ácido acético, pero la concentración necesaria de este producto para cada uno de los procesos depende mucho del contexto y de cada uno de los procesos que se realizan en la planta de producción. Por esto, en búsqueda de una completa estandarización de los procesos de tintura de algodones en este trabajo se profundizó en la etapa de neutralización. A partir de datos y herramientas estadísticas que permitieron el desarrollo y evaluación de un modelo matemático, para tener una mejor aproximación a la concentración de ácido acético para alcanzar un pH adecuado a los estándares permitidos de esta etapa, se dividieron los procesos de tintura de algodones en dos naturalezas diferentes, los procesos C/C y los procesos C/S, de los cuales se extrajeron 46 y 34 muestras respectivamente. Estas muestras fueron tomadas directamente de las máquinas de producción con el fin de tener una mejor afinidad entre el modelo y los procesos que se ejecutan día a día dentro de la planta. Cada una de estas muestras está acompañada de unos parámetros que fueron identificados relevantes para el desarrollo de las ecuaciones que permitirían la predicción del pH de neutralización (pH antes de agregar el ácido acético o de ajuste, concentración total de carbonato agregado o concentración de hidróxido de sodio agregado, relación de volumen de lavado respecto al volumen de proceso de la máquina, el calibre del hilo con el cual se teje la tela, y la concentración de ácido acético). Con el uso de estos parámetros y realizando una regresión lineal múltiple, se establecieron dos ecuaciones para cada C/C y C/S; se obtuvieron los coeficientes de cada uno de los parámetros de relevancia (Tabla II) y un coeficiente de determinación ajustado de 0,522 para los procesos C/C y 0,612 para los procesos C/S. A partir del desarrollo de estas ecuaciones se estableció la concentración de ácido acético como el parámetro a manipular para la determinación del pH de neutralización, y se empezó a dar uso de estas en algunos procesos de tintura de algodones. Con la información recolectada de esta validación, se hizo uso de un concepto desarrollado a partir de este trabajo al

cual se le dio nombre de “eficiencia de neutralización”, el cual, con el uso de los modelos matemáticos desarrollados, tuvo una mejoría pasando del 36,96% al 63,64% en los procesos C/C y de 32,35% al 57,89% en los procesos carbonato soda. Esto representa una importante mejoría en la etapa de neutralización, representando un ahorro de tiempo y energía que terminan haciendo parte significativa del uso total de estos recursos en el proceso y en la empresa.

## XI. RECOMENDACIONES

Como se ha mencionado, la etapa de neutralización en los procesos de tintura de algodones es un área de la cual no se tiene mucha documentación. Esto hace que sea una gran oportunidad para estudiar y estandarizar las operaciones que se llevan a cabo, desde los lavados hasta la cantidad y tipos de productos que se pueden utilizar, entre una de ellas el ácido acético es la que se ha mencionado en este trabajo y sobre la cual se dejan algunas bases para seguir trabajando. Algunas herramientas que podrían ser de interés en futuras investigaciones puede ser la incorporación de un sistema de control que permita dosificar la cantidad progresiva que se necesite de ácido acético a medida que el pH va cambiando: la tecnología de algunos equipos de tintura actuales incorporan los sensores de pH necesarios para realizar este sondeo que se menciona. Debido a que los sistemas de control suelen ser sistemas sub amortiguados, esto podría significar un sobrepaso en la variable controlada lo que indica una disminución del pH por debajo del *set point*. Puesto que el elemento final de control no tendría la capacidad de volver a incrementar el pH, se podría optar por un sistema sobre amortiguado que, aunque tarde más tiempo, no va a tener un sobrepaso que se deba corregir.

Por otra parte, si se desea continuar la línea de investigación que se llevó a cabo en este trabajo, podría ser de interés estudiar el comportamiento de cada una de las telas de algodón que se procesan día a día, en especial el factor de absorción, e incluirlo como un parámetro adicional del modelo que podría significar un mejor ajuste a los datos experimentales. Tal como han mencionado otros autores, los procesos de tintura son altamente no lineales y esto hace que su predicción y estandarización sea compleja. Sin embargo, las recomendaciones que se dan en este apartado pueden ser de ayuda para mejorar aún más el desempeño de la etapa de neutralización como ya se ha podido evidenciar.

## REFERENCIAS

- [1] V. Salem, *Tingimento têxtil fibras, Conceitos e Tecnologias*, São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2010.
- [2] S. Mahjabin, «A Concise Theoretical Aspect of Reactive Dyeing and Solvent Dyeing,» *Journal of Fareast International University*, vol. VI, pp. 5-13, 2023.
- [3] J. C. Sanchez, «Blanqueo de hilados de algodón con agua oxigenada mediante el sistema Avesta-Karrer,» 1958.
- [4] B. Bitesize, «What is a neutralisation reaction?,» [En línea]. Available: <https://www.bbc.co.uk/bitesize/articles/z9gnn9q#zcr66g8>. [Último acceso: Mayo 2024].
- [5] T. I. A. H. K. M. Daisuke Yamamoto, «Use of sodium carbonate and sodium polyacrylate for the prevention of vinegar syndrome,» *Imaging Science Journal*, vol. LXVII, nº 3, pp. 171-178, 2019.
- [6] W.-H. Y. Chang-Chiun Huang, «Control of Dye Concentration, pH, and Temperature in Dyeing Processes,» *Sage Journals*, vol. LXIX, nº 12, pp. 914-918, 1999.
- [7] H. instruments, «¿Que es el pH?,» [En línea]. Available: <https://www.hannacolombia.com/blog/post/447/que-es-el-ph>. [Último acceso: Febrero 2024].
- [8] R. a. española, «Definición de tintura,» [En línea]. Available: <https://www.rae.es/drae2001/tintura>. [Último acceso: Febrero 2024].
- [9] SAS, «Definición de análisis estadístico,» [En línea]. Available: [https://www.sas.com/es\\_co/insights/analytics/statistical-](https://www.sas.com/es_co/insights/analytics/statistical-). [Último acceso: Febrero 2024].
- [10] S. culture, «Diseño de Experimentos (DoE): Método para optimizar los resultados,» [En línea]. Available: <https://safetyculture.com/es/temas/disen->. [Último acceso: Febrero 2024].
- [11] G. d. canarias, «Cualidades del color,» [En línea]. Available:

- <https://acortar.link/PDIQa6>. [Último acceso: Febrero 2024].
- [12] R. UTN, «Colorimetría textil generalidades,» [En línea]. Available: <https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/631/3/capitulo3.pdf>. [Último acceso: Febrero 2024].
- [13] R. M. Granados, «Modelos de regresión lineal múltiple,» Departamento de Economía Aplicada, Universidad de Granada , Granada, 2016.
- [14] P. S.A., «Control de procesos,» [En línea]. Available: <https://www.prodel.es/subareas/procesos-basicos/#:~:text=El%20Control%20de%20Procesos%20es,qu%C3%ADmicos%20que%20as%C3%AD%20lo%20requieran.> [Último acceso: Mayo 2024].
- [15] Procolombia, «Tela Jersey (Bethoveen),» [En línea]. Available: <https://b2bmarketplace.procolombia.co/es/textiles-y-confecciones/telas-de-tejidos-de-punto/tela-jersey-bethoveen-15732>. [Último acceso: Junio 2024].
- [16] Procolombia, «Tela Rib (Escorpion),» [En línea]. Available: <https://b2bmarketplace.procolombia.co/es/textiles-y-confecciones/telas-de-tejidos-de-punto/tela-rib-escorpion-15756#:~:text=Es%20un%20tejido%20acanalado%2C%20que,para%20cuellos%2C%20pu%C3%B1os%20o%20pijameria>. [Último acceso: Junio 2024].
- [17] H. S. Norman R. Draper, Applied Regression Analysis, John Wiley & Sons, 1998.
- [18] MathWorks, «Coeficiente de determinación (R cuadrado),» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/stats/coefficient-of-determination-r-squared.html>. [Último acceso: Junio 2024].
- [19] G. R. B. B. Rafael Martín, «Síntesis de procesos: una propuesta Holística,» Universidad Central de Venezuela, Caracas, 2006.
- [20] P. University, «Calculating pH and pOH,» [En línea]. Available: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjxMaU9ueGAXV\\_t4QIHankA3AQFnoECBAQA&url=https%3A%2F%2Fwww.chem.purdue.edu%2Fgchelp%2Fhowtosolveit%2FEquilibrium%2FCalculating\\_pHandpOH%23%3A~%3Atext%3DThe%2520pH%2520is%2520then%2520.](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjxMaU9ueGAXV_t4QIHankA3AQFnoECBAQA&url=https%3A%2F%2Fwww.chem.purdue.edu%2Fgchelp%2Fhowtosolveit%2FEquilibrium%2FCalculating_pHandpOH%23%3A~%3Atext%3DThe%2520pH%2520is%2520then%2520.) [Último acceso: Junio

- 2024].
- [21] R. W. E. Herbert S. Harned, «The Dissociation Constant of Acetic Acid from 0 to 60° Centigrade,» *Journal of the American Chemical Society*, vol. LV, nº 2, pp. 652-656, 1933.
- [22] U. P. d. Madrid, «Cálculo de filtración continua,» [En línea]. Available: [https://www.diquima.upm.es/old\\_diquima/Investigacion/proyectos/chevic/catalogo/FILTROS/Calc4.htm](https://www.diquima.upm.es/old_diquima/Investigacion/proyectos/chevic/catalogo/FILTROS/Calc4.htm). [Último acceso: Junio 2024].
- [23] P. S. G. R. I. A. M. A. M. Marcela A Garbagnati, «Características físico-químicas, capacidad buffer y establecimiento de la línea base ambiental del Río Grande, San Luis, Argentina,» *Ecología Austral*, vol. XV, nº 1, pp. 59-71, 2005.

ANEXOS

ANEXO A. DATOS OBTENIDOS EN PLANTA.

TABLA VI  
DATOS EXPERIMENTALES DE PROCESOS C/C

Dato	Volumen [L]	Carbonato total [g/L]	Ácido [g/L]	pH antes ácido	Calibre	Relación de lavado	Tipo	pH acidulada
1	1710	3,7	0,4	10,372	30	0,667	Jersey	7,597
2	2282	5	0,5	10,372	30	0,571	Jersey	6,848
3	2630	5	0,55	10,307	20	0,800	Jersey	8,244
4	2630	5	0,85	8,244	20	0,800	Jersey	6,773
5	1782	5	0,55	10,344	36	0,667	Jersey	6,848
6	2540	5	0,4	10,284	30	0,800	Jersey	8,375
7	2540	5	0,55	8,375	30	0,800	Jersey	7,436
8	2540	5	0,67	7,436	30	0,800	Jersey	6,388
9	1342	5	0,5	10,372	24	0,629	Jersey	7,947
10	1342	5	0,7	7,947	24	0,629	Jersey	6,421
11	1750	5	0,5	10,392	36	1,200	Rib 2x2	9,674
12	1750	5	1,05	9,674	36	1,200	Rib 2x2	5,952
13	1885	5	0,7	10,372	30	0,902	Rib 2x2	7,222
14	1885	5	0,9	7,222	30	0,902	Rib 2x2	6,264
15	2225	5	0,527	10,342	36	0,800	Rib 2x2	9,129
16	2225	5	0,877	9,129	36	0,800	Rib 2x2	7,302
17	2225	5	1,027	7,302	36	0,800	Rib 2x2	6,737
18	1900	5	0,7	10,249	20	0,800	Rib 2x2	6,602
19	1842	5	0,7	10,359	36	0,833	Rib 2x2	7,672
20	1842	5	0,971	7,672	36	0,833	Rib 2x2	6,064
21	2535	5	0,5	10,307	36	0,800	Rib 2x2	7,022
22	1925	5	0,521	10,213	30	1,557	Rib 2x2	5,905
23	2718	7	0,7	10,388	30	0,667	Falso fleece	8,639
24	2718	7	1,5	8,639	30	0,667	Falso fleece	5,352
25	1735	10	0,7	10,462	24	0,800	Interlock	9,517
26	1735	10	1,5	9,517	24	0,800	Interlock	6,825
27	3149,4	10	1	10,239	30	0,690	Jersey	4,983
28	3161	10	0,9	10,527	30	0,690	Jersey	6,549
29	960	10	0,7	10,301	30	1,658	Jersey	7,467
30	960	10	1	7,467	30	1,658	Jersey	6,629

DETERMINACION DE MODELOS MATEMATICOS PARA LA PREDICCION DEL PH EN PROCESOS DE TINTURA TEXTIL

48

31	1342	10	0,7	10,694	24	0,629	Jersey	8,869
32	1342	10	1,3	8,869	24	0,629	Jersey	6,258
33	2485	12	0,7	10,511	20	0,800	Interlock	6,457
34	1725	20	0,9	10,227	36	0,800	Doble punto	8,922
35	1725	20	1,800	8,922	36	0,800	Doble punto	7,076
36	1725	20	1,901	7,076	36	0,800	Doble punto	6,935
37	2424	20	1,2	10,777	30	0,667	Falso fleece	9,588
38	2424	20	2,2	9,588	30	0,667	Falso fleece	7,261
39	1655	20	0,9	10,542	30	1,549	Jersey	9,719
40	1655	20	1,8	9,719	30	1,549	Jersey	7,847
41	1655	20	2,1	7,847	30	1,549	Jersey	7,241
42	1655	20	2,45	7,241	30	1,549	Jersey	6,667
43	1595	20	0,9	10,229	40	0,800	Jersey	9,468
44	2615	20	0,7	10,123	30	1,200	Jersey	9,701
45	2615	20	1,082	9,701	30	1,200	Jersey	9,399
46	2615	20	1,950	9,399	30	1,200	Jersey	6,873

---

TABLA VII  
DATOS EXPERIMENTALES DE PROCESOS C/S

Dato	Volumen [L]	[NaOH] [g/L]	Ácido [g/L]	pH antes ácido	Calibre	Relación de lavado	Tipo	pH acidulada
1	1776	1	0,9	9,624	30	1,000	Falso fleece	5,434
2	2790	1	0,4	10,246	30	1,200	Jersey	5,707
3	1980	1	0,9	9,793	24	0,800	Jersey	4,821
4	1914	1	0,9	9,732	24	0,727	Jersey	5,358
5	2280	1	0,35	10,3	36	1,200	Rib 2x2	8,091
6	2280	1	0,5	8,091	36	1,200	Rib 2x2	6,964
7	2280	1	0,58	6,964	36	1,200	Rib 2x2	6,572
8	3206	1,5	0,65	10,503	16	0,714	Jersey	6,31
9	3227	1,5	0,7	10,314	16	0,995	Jersey	5,176
10	3192	1,5	0,9	10,365	16	0,571	Jersey	5,8
11	3185	1,5	0,9	9,493	16	0,571	Jersey	4,371
12	3164	1,5	0,9	9,867	16	0,571	Jersey	4,664
13	3206	1,5	0,55	10,034	16	0,932	Jersey	5,281
14	2225	2	0,516	9,794	30	1,402	Jersey	6,622
15	1840	2,6	0,9	10,063	30	0,800	Cuello rect	6,736
16	2653	2,6	0,9	10,242	30	0,571	Cuello rect	5,237
17	2790	2,6	0,9	9,906	30	0,800	Doble punto	5,057
18	3264	2,6	0,7	10,645	30	0,667	Falso fleece	6,442
19	1948	2,6	0,616	9,956	40	0,801	Interlock	8,004
20	1948	2,6	0,9	8,004	40	0,801	Interlock	7,255
21	1948	2,6	1,003	7,255	40	0,801	Interlock	7,072
22	2125	2,6	0,75	10,081	36	0,800	Interlock	7,209
23	2125	2,6	0,9	7,209	36	0,800	Interlock	6,707
24	2410	2,6	0,9	10,192	40	1,200	Jersey	5,942
25	2410	2,6	0,22	10,05	24	1,400	Jersey	8,704
26	2410	2,6	0,52	8,704	24	1,400	Jersey	6,376
27	1965	2,6	0,8	10,32	30	1,200	Jersey	7,026
28	2430	2,6	0,9	10,2	24	1,400	Jersey	5,281
29	1494	2,6	0,9	10,1	26	0,667	Jersey	7,033
30	1494	2,6	1,101	7,033	26	0,667	Jersey	6,2
31	2015	2,6	0,9	10,191	30	1,200	Jersey	6,433
32	1854	2,6	0,9	10,088	30	0,667	Rib 1x1	5,79
33	1865	2,6	0,9	9,903	30	0,800	Rib 1x1	6,071
34	2310	2,6	0,9	10,03	36	1,200	Rib 2x2	5,786

*ANEXO B. DATOS OBTENIDOS PARA LA EVALUACION Y VALIDACION DEL MODELO*

TABLA VIII.  
DATOS DE VALIDACION PARA LOS PROCESOS C/C

Dato	Volumen	pH de calibración	Concentración total de carbonato [g/L]	Ácido [g/L]	pH
1	2120	7,22	5	0,689	6,033
2	1680	7,25	5	0,676	6,011
3	1944	7,3	5	0,646	6,637
4	1865	7,3	5	0,646	7,263
5	1865	6,5	5	0,799	6,299
6	2140	7,2	5	0,701	5,318
7	1560	7,2	5	0,701	6,919
8	1758	7,3	7	0,833	6,345
9	2235,9	7,4	10	1,059	5,175
10	1680	7,4	12	1,25	6,985
11	2265	7,4	20	1,995	5,492

TABLA IX.  
DATOS DE VALIDACION PARA LOS PROCESOS C/S

Dato	Volumen	pH de calibración	[NaOH] [g/L]	Relación de lavado	Calibre	Ácido [g/L]	pH
1	1734	6,5	1	1	24	0,407	8,344
2	1734	6,1	1	1	24	0,509	6,999
3	2495	6,5	1	1,2	30	0,455	6,406
4	2130	6,3	1	1,2	36	0,599	6,332
5	1810	6,4	1	1,2	30	0,483	7,512
6	1810	6,3	1	1,2	30	0,618	6,904
7	3006	6,5	1,5	0,833	24	0,522	7,293
8	3006	6,5	1,5	0,833	24	0,637	6,648
9	2110	6,5	1,5	0,8	30	0,616	6,016
10	1905	6,5	2,6	1	33	0,804	7,485
11	1905	6,5	2,6	1	33	0,912	6,842
12	2395	6,4	2,6	1	36	0,876	6,999
13	2270	6,4	2,6	1	36	0,876	7,879
14	2270	6,3	2,6	1	36	0,996	7,318
15	1698	6,0	2,6	1	36	0,986	6,862
16	2250	6,2	2,6	1	30	0,843	8,22
17	2250	5,5	2,6	1	30	1,144	6,648
18	1580	6,0	2,6	1,2	20	0,713	8,62
19	1580	5,5	2,6	1,2	20	0,916	6,832