



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

**ANÁLISIS Y EFECTOS DE LOS PROCESOS DE SULFITACIÓN DE JUGO Y  
MELADURA SOBRE EL COLOR DEL AZÚCAR PRODUCIDA, PARA EL  
PROCESO DE DISOLUCIÓN EN UNA REFINERÍA**

**Danilo Romeo Castillo Mauricio**

Asesorado por Inga. Claudia María Barrientos

Guatemala, julio de 2012



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS Y EFECTOS DE LOS PROCESOS DE SULFITACIÓN DE JUGO Y  
MELADURA SOBRE EL COLOR DEL AZÚCAR PRODUCIDA, PARA EL  
PROCESO DE DISOLUCIÓN EN UNA REFINERÍA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**DANILO ROMEO CASTILLO MAURICIO**

ASESORADO POR LA INGA. CLAUDIA MARÍA BARRIENTOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, JULIO DE 2012



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA**

<b>DECANO</b>	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
<b>VOCAL I</b>	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
<b>VOCAL II</b>	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
<b>VOCAL III</b>	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
<b>VOCAL IV</b>	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
<b>VOCAL V</b>	Br. Mario Maldonado Muralles
<b>SECRETARIO</b>	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

<b>DECANO</b>	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
<b>EXAMINADOR</b>	Ing. Jaime Domingo Carranza González
<b>EXAMINADOR</b>	Ing. Erwin Manuel Ortiz Castillo
<b>EXAMINADOR</b>	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
<b>SECRETARIO</b>	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

### **ANÁLISIS Y EFECTOS DE LOS PROCESOS DE SULFITACIÓN DE JUGO Y MELADURA SOBRE EL COLOR DEL AZÚCAR PRODUCIDA, PARA EL PROCESO DE DISOLUCIÓN EN UNA REFINERÍA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha del 30 de noviembre de 2011.

**Danilo Romeo Castillo Mauricio**



Guatemala, 02 de mayo de 2012

Ing. Williams Alvarez  
Director de Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería, USAC  
Presente.

Por medio de la presente informo a usted que procedí a revisar el informe final de trabajo de graduación del estudiante Danilo Romeo Castillo Mauricio, cuyo título es: **“ANÁLISIS Y EFECTOS DE LOS PROCESOS DE SULFITACIÓN DE JUGO Y MELADURA SOBRE EL COLOR DEL AZÚCAR PRODUCIDA, PARA EL PROCESO DE DISOLUCIÓN EN UNA REFINERÍA”** el cual encuentro satisfactorio.

Cabe mencionar que las soluciones planteadas en este trabajo, constituyen un valioso aporte de nuestra Universidad a uno de los muchos problemas que padece el país principalmente en el apoyo técnico a empresas privadas, en la búsqueda de soluciones viables a los problemas que atraviesan y que al final, beneficiarán a la sociedad en general. En tal virtud, **LO DOY APROBADO**, solicitándole darle el trámite correspondiente.

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.

Atentamente,

  
Claudia María Barrientos  
cbarrientos@launion.com.gt

**Claudia María Barrientos**  
Ingeniera Química  
Colegiada 1257





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

Guatemala, 16 de mayo de 2012  
Ref. EI.Q.TG-IF.023.2012

Ingeniero  
Williams Guillermo Álvarez Mejía  
DIRECTOR  
Escuela Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-267-2011-IF 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: **Danilo Romeo Castillo Mauricio**

Identificado con número de carné: **2005-11794**

Previo a optar al título de INGENIERO QUÍMICO.

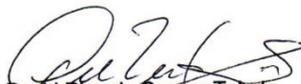
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

#### ANÁLISIS Y EFECTOS DE LOS PROCESOS DE SULFITACIÓN DE JUGO Y MELADURA SOBRE EL COLOR DE AZÚCAR PRODUCIDA, PARA EL PROCESO DE DISOLUCIÓN EN UNA REFINERÍA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por la Ingeniera: **Claudia María Barrientos**.

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"

  
Ing. David Ricardo Cerezo Toledo  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación

  
ESCUELA DE  
INGENIERIA QUIMICA

C.c.: archivo

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
ACREDITADO POR  
Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería  
Período 2009 - 2012

  
ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería

FORMANDO INGENIEROS QUÍMICOS EN GUATEMALA Desde 1939





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

Ref.EIQ.TG.102.2012

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, **DANILO ROMEO CASTILLO MAURICIO** titulado: "**ANÁLISIS Y EFECTOS DE LOS PROCESOS DE SULFITACIÓN DE JUGO Y MELADURA SOBRE EL COLOR DEL AZÚCAR PRODUCIDA, PARA EL PROCESO DE DISOLUCIÓN EN UNA REFINERÍA**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, Julio de 2012

Cc: Archivo  
VMMV/ale



Universidad de San Carlos  
de Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 351.2012

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: **ANÁLISIS Y EFECTOS DE LOS PROCESOS DE SULFITACIÓN DE JUGO Y MELADURA SOBRE EL COLOR DEL AZÚCAR PRODUCIDA, PARA EL PROCESO DE DISOLUCIÓN EN UNA REFINERÍA**, presentado por el estudiante universitario **Danilo Romeo Castillo Mauricio**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Rosinos  
Decano



Guatemala, 23 de julio de 2012.

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por ser la fuente y guía de mi vida.
- Mis padres** Romeo Baldomero y Leticia Marilú. Por ser modelos de perseverancia, responsabilidad y amor. Este logro es de ustedes.
- Mi esposa e hijo** Jennifer y Nicolás. Por ser la inspiración total de mi ser.
- Mis hermanas** Ana Cecilia y Marylin Gabriela. Por compartir los buenos y malos momentos. Su cariño y apoyo es invaluable.
- Mis abuelos** Leticia, Jesús Oswaldo (q.e.p.d.), Olga Dolores (q.e.p.d.) y Romeo Salomón (q.e.p.d.). Seguiré poniendo sus nombres en alto por siempre. Los amo.
- Mi tío** José Herman Castillo Rios (q.e.p.d.), porque desde el inicio y al final de sus días siempre fue un apoyo incondicional, nunca te olvidaré.
- Mis tíos** Lily, René, Lulú, Otto, Celeste, María Eugenia, Armando, Aura, Adela y Gabriela, gracias por sus invaluable consejos y apoyo durante toda mi vida.

**Mis primos y  
primas**

A cada uno por los momentos compartidos.

**Mis amigos y  
amigas**

Gracias a ustedes he aprendido a disfrutar los momentos más sencillos de la vida.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por demostrarme su amor infinito y misericordia en cada momento de mi vida.
<b>Mis padres</b>	Romeo y Marilú. Por su amor y su apoyo incondicional.
<b>Mi esposa e hijo</b>	Jennifer y Nicolás. Por darme la alegría en cada día de mi vida.
<b>Mis hermanas</b>	Ana Cecilia y Marylin Gabriela. Por el amor que nos une.
<b>Mis abuelos</b>	Leticia, Jesús Oswaldo, Olga Dolores y Romeo Salomón. Por ser un gran ejemplo a seguir, los llevaré por siempre en mi corazón.
<b>Mis tíos</b>	Gracias por sus consejos y su apoyo invaluable, jamás los olvidaré.
<b>Mis primos y primas</b>	Por ser cada uno especial conmigo.

**Mis amigos y  
amigas**

Juan José Cuellar, Mariano Palacios, Renato Madrid, Oscar Ayapán, Julio Fernandez, Raúl Ortiz, José Luis Sipaque, Promoción LV, Amílcar Ayala, Juan Diego Regalado, María Fernanda Peña, Romy Godinez y María José Páz.

**Inga. Claudia María  
Barrientos**

Gracias por todo su apoyo y paciencia.  
Mi respeto y agradecimiento con cariño

**Ingenio La Unión**

Gracias a cada una de las personas que compartieron conmigo en mis lugares de desempeño laboral.

**La Facultad de  
Ingeniería**

Gracias por formarme en mi carrera profesional.

**La Universidad de  
San Carlos de  
Guatemala**

La llevaré por siempre en el corazón.



2.3.1.3.	No azúcares coloreados obtenidos de los productos de descomposición del azúcar.....	17
2.4.	Efecto del pH en el color.....	18
2.5.	Cambios de color en la práctica.....	19
2.5.1.	Oscurecimiento del jugo de la caña .....	19
2.5.2.	Color en el azúcar.....	19
2.5.3.	Desarrollo del color en el procesamiento del azúcar de caña.....	19
2.5.4.	Desarrollo del color en el azúcar blanco .....	20
2.6.	Separación del color de los precipitados y adsorbentes .....	21
2.7.	Método más empleado para la eliminación de color en productos de la caña de azúcar .....	21
2.7.1.	Proceso de sulfitación.....	22
2.7.2.	Azufre .....	22
2.7.3.	Gas del quemador de azufre: dióxido de azufre .....	23
2.7.4.	Hornos de quemadores de azufre.....	23
2.7.5.	Torre de sulfitación .....	24
2.7.6.	Tipos de sulfitación .....	25
2.7.6.1.	Sulfitación en frío .....	25
2.7.6.2.	Sulfitación después de alcalinizar .....	26
2.7.6.3.	Sulfitación en caliente .....	26
2.7.6.4.	La sulfitación continua.....	26
2.7.6.5.	Procedimientos fraccionados .....	27
2.7.6.6.	La sulfitación de la meladura .....	27
2.7.7.	Aspectos positivos de la sulfitación.....	27
2.7.8.	Aspectos negativos de la sulfitación .....	29
2.8.	Sistemas de sulfitación de meladura por medio de eyectores de mezcla.....	30

2.8.1.	Especificaciones de los sistemas de sulfitación .....	31
2.8.2.	Parámetros operacionales de la sulfitación de jugo .....	32
2.8.3.	Parámetros operacionales de la sulfitación de meladura.....	34
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	37
3.1.	Variables .....	37
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	38
3.3.	Recursos humanos disponibles .....	38
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	38
3.4.1.	Equipo y cristalería.....	38
3.4.2.	Reactivos .....	39
3.5.	Técnica de investigación cualitativa y cuantitativa .....	40
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	46
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de datos.....	47
3.8.	Análisis estadístico.....	47
3.9.	Plan de análisis de resultados. ....	47
3.9.1.	Métodos y modelos de análisis .....	47
3.9.1.1.	Determinación de media para datos de muestreo .....	48
3.9.1.2.	Determinación de errores de muestreo .....	48
3.9.1.2.1.	Varianza .....	49
3.9.1.2.2.	Desviación estándar .....	49
4.	RESULTADOS.....	53
4.1.	Sulfitación del jugo .....	53
4.2.	Sulfitación de meladura.....	59

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	71
CONCLUSIONES.....	77
RECOMENDACIONES .....	79
BIBLIOGRAFÍA.....	81
APÉNDICES.....	83
ANEXOS.....	103

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Diagrama de operación del proceso de producción de azúcar en el Ingenio La Unión S.A .....	7
2.	Estructura molecular de la sacarosa .....	12
3.	Sistema de aireación por eyectores de mezcla – perfil de presión .....	31
4.	Sistema de sulfitación de jugo.....	33
5.	Sistema de sulfitación de meladura por eyectores de mezcla.....	36
6.	Comportamiento del diferencial de pH en la línea de jugo crudo .....	53
7.	Comportamiento del diferencial de pH y sulfitos en el jugo mezclado .	54
8.	Comportamiento de pH del jugo sulfitado contra el pH de jugo alcalizado .....	55
9.	Relación entre el flujo de jugo total contra el flujo de sacarato necesario para el control de pH en el proceso de sulfitación de jugo ..	56
10.	Evaluación de Pol, °Brix y pureza del jugo clarificado después de la sulfitación .....	57
11.	Comportamiento de la turbidez y pH del jugo clarificado .....	58
12.	Comportamiento del pH de meladura y el °Brix de meladura no tratada .....	59
13.	Evaluación de color y turbidez en meladura no tratada.....	60
14.	Evaluación de Pol y pureza de meladura no tratada .....	61
15.	Diferencial de pH de meladura.....	61
16.	Comportamiento del color de meladura con relación a la turbidez en la meladura clarificada .....	62

17.	Evaluación del porcentaje de remoción de turbidez.....	63
18.	Comportamiento del Pol y pureza de la meladura clarificada durante el proceso de sulfitación .....	64
19.	Análisis de color y turbidez entre la meladura sin clarificar y meladura clarificada.....	65
20.	Evaluación de la sulfitación contra el color de azúcar crudo al Proceso de disolución en refinería.....	66
21.	Evaluación de la cantidad de azufre (lb) contra la concentración de sulfitos (ppm), durante el proceso de sulfitación de jugo .....	67
22.	Evaluación de los procesos de sulfitación en relación con el color de azúcar crudo al proceso de disolución en refinería.....	68

## TABLAS

I.	Diferencias principales entre ambos procesos de producción de azúcar .....	1
II.	Parámetros de operación de la sulfitación de jugo .....	32
III.	Parámetros de operación de la sulfitación de meladura por eyectores de mezcla .....	35
IV.	Variables de operación .....	37
V.	Equipo y cristalería que se utilizó para la realización de la fase experimental .....	39
VI.	Reactivos que se utilizaron para la realización de la fase experimental .....	40
VII.	Media aritmética, varianza y desviación estándar para los parámetros de la sulfitación de meladura .....	50
VIII.	Media aritmética, varianza y desviación estándar para los parámetros de la sulfitación de jugo .....	51
IX.	Valores promedio de jugo alcalizado y jugo sulfitado .....	54

X.	Valores promedio de pH de jugo alcalizado y jugo sulfitado .....	55
XI.	Valores promedio de pH de jugo alcalizado y turbidez jugo claro .....	58
XII.	Valor promedio de color de meladura .....	60
XIII.	Promedio de color de meladura .....	62
XIV.	Promedio del porcentaje de remoción de turbidez .....	63
XV.	Valores promedio de color y turbidez de meladura (UI) .....	65
XVI.	Valores promedio de color de azúcar, producto de los métodos de sulfitación en cada etapa de inicio de operación .....	68
XVII.	Parámetros de evaluación de los procesos de sulfitación de jugo y meladura .....	69



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>Cm</b>	Centímetro
<b>Gpm</b>	Galones por minuto
<b>G</b>	Gramo
<b>°Brix</b>	Grado brix
<b>°C</b>	Grado centígrado
<b>Kg</b>	Kilogramo
<b>Lb</b>	Libra
<b>Lb/h</b>	Libra por hora
<b>Lb/Ton</b>	Libra por tonelada
<b>M</b>	Metro
<b>MI</b>	Mililitro
<b>Mm</b>	Milímetro

<b>M</b>	Molar (concentración)
<b>Nm</b>	Nanómetro
<b>N</b>	Normal (Concentración)
<b>%</b>	Porcentaje
<b>pH</b>	Potencial de Hidrógeno
<b>Rpm</b>	Revoluciones por minuto
<b>UI</b>	Unidades de color ICUMSA

## **GLOSARIO**

### **Azúcares**

Se denomina así a los cristales, incluyendo la miel adherida a ellos, obtenidos de la centrifugación de la masa cocida. Se elaboran diferentes tipos de azúcares, bien para consumo doméstico o para su posterior refinación.

### **Azúcares reductores**

Las sustancias reductoras en caña y sus productos. Los componentes del azúcar invertido se denominan dextrosa y levulosa.

### **Brix**

Es una forma de expresar la concentración de una solución, definida en este caso como el porcentaje de materias sólidas disueltas indicadas por un hidrómetro “Brix” u otro dispositivo densimétrico. En el sentido estricto de la definición, se expresa como sólidos disueltos en una solución de sacarosa pura.

### **Caña**

Es la materia prima que se trae al ingenio, normalmente en la definición del término se incluye la caña limpia, más las materias extrañas y el agua que la acompañan

<b>Cachaza</b>	La torta agotada con una humedad del orden del 74%, que contiene la totalidad de las impurezas presentes en el jugo y que fueron decantadas en el clarificador.
<b>Clarificación</b>	Procedimiento de eliminación de determinadas partículas que existen en el jugo de caña, tanto en solución como en suspensión y que lo afectan en la transparencia como en la limpidez.
<b>Coeficiente de azúcares reductores-Pol</b>	La relación expresada en porcentaje entre los azúcares reductores y la Pol.
<b>Disacárido</b>	Carbohidrato, formado por dos azúcares simples.
<b>Extracción de jugo</b>	Es el peso porcentual de jugo extraído de los molinos en caña.
<b>Extracción de Pol (sacarosa)</b>	Se refiere a la cantidad de Pol (sacarosa) extraído en el jugo mezclado de la caña.
<b>Jugo absoluto</b>	Se considera como todo el jugo presente en la caña, es decir el peso de la caña menos el de la fibra.

<b>Jugo clarificado</b>	Es el jugo claro que se obtiene después del proceso de clarificación y que se alimenta a los evaporadores.
<b>Jugo claro</b>	Es el jugo que se obtiene en la extracción de alto vacío en los filtros de cachaza.
<b>Jugo mezclado</b>	Es la mezcla del jugo secundario con el primario, que sale de los molinos.
<b>Meladura o siropes</b>	Es el jugo concentrado en los evaporadores, antes de que se haya realizado alguna operación de extracción de azúcar.
<b>Monosacáridos</b>	Compuesto químico derivado de la sacarosa que contiene una estructura sencilla, como la glucosa.
<b>Pol</b>	Término utilizado comúnmente en la industria azucarera para denotar la cantidad de azúcar que no se logra extraer de la caña y que queda en el bagazo.
<b>Pureza aparente</b>	La proporción del Pol en el Brix o sólidos por gravedad.
<b>Pureza por gravedad</b>	La proporción de sacarosa en el Brix o sólidos por gravedad.

<b>Pureza real</b>	Es la proporción de sacarosa en la materia seca.
<b>Sacarosa</b>	Disacárido compuesto por una molécula de glucosa y otra de fructosa. Es el disacárido conocido en química como sacarosa o azúcar de caña y cuya fórmula es: $C_{12}H_{22}O_{11}$ .
<b>Sulfitación</b>	Introducción de solución sulfurosa en un jugo, como parte del proceso de clarificación.
<b>Turbidez</b>	Se entiende por turbidez o turbiedad, por la falta de transparencia de un líquido debida a la presencia de partículas en suspensión. Cuantos más sólidos en suspensión haya en el líquido, más sucia parecerá esta y más alta será la turbidez. La turbidez es considerada una buena medida de la calidad, cuanto más turbia, menor será su calidad.

## RESUMEN

El presente trabajo de graduación presenta un estudio realizado en el Ingenio La Unión S.A. en donde la calidad del azúcar está asociada directamente a la eficiencia del proceso de clarificación de jugo y de meladura.

La falta de un tratamiento eficaz del jugo y de la meladura se traduce en un azúcar de menor calidad, con una incidencia alta de color, turbidez, impurezas y sólidos suspendidos. Por esta razón, para optimizar el proceso se implementaron dos sistemas: el primero es la sulfitación de jugo y el segundo es la sulfitación de meladura, con lo cual se logró el objetivo de reducir el color del azúcar de 1500 UI que posee inicialmente, a un valor cercano a 400 UI que es producto de dilución en el proceso de azúcar refinado y así se garantiza la calidad del azúcar producido.

El propósito de la investigación fue evaluar los efectos de los sistema de sulfitación de jugo y sulfitación de meladura en donde se hicieron las modificaciones adecuadas, la evaluación corresponde a mediciones específicas para cada etapa como la medición del pH del jugo y meladura, antes y después de la sulfitación; la remoción de color y turbidez en cada etapa para poder analizar el comportamiento de los parámetros durante el proceso de reducción de color, y los efectos en el proceso de fabricación de azúcar.



# OBJETIVOS

## General

Analizar la eficiencia de los procesos de sulfitación que tienen relación directa con la reducción de color del jugo, meladura y azúcar final de 400 UI, para el proceso de disolución en una refinería en Ingenio La Unión S.A.

## Específicos

1. Describir aspectos teóricos, operativos, equipos y materiales necesarios para ejecutar el proceso de sulfitación de jugo y en la sulfitación de meladura, en la disminución de color en el azúcar final.
2. Identificar las principales variables de proceso que generan color.
3. Definir un control del proceso para reducir los rangos de seguridad operativos, identificando las principales ventajas y desventajas en la adaptación de los dos sistemas en el proceso.
4. Determinar la viabilidad del empleo de los nuevos sistemas que se aplicarán en el acondicionamiento del proceso en la reducción del color del jugo.
5. Establecer los ajustes operacionales y técnicos que sean necesarios para un mejor proceso en la decoloración del azúcar.

6. Evaluar la influencia de la cantidad de azufre dosificado en la quema en hornos, pH y remoción de turbidez en el aumento del color en la sacarosa.
7. Proponer recomendaciones de mejora en el proceso, para lograr la reducción en el color del azúcar final.

## **HIPÓTESIS**

Es posible realizar un análisis de los efectos de operación en los procesos de sulfitación de jugo y de meladura en la clarificación de azúcar, para la proceso de disolución en una refinería.

## INTRODUCCIÓN

La cantidad de materia coloreada que se presenta en el jugo de la caña llega solo a ser el 17% del 1% de los no-azúcares orgánicos del jugo. Sin embargo, a causa de su intensidad tiene un efecto pronunciado en la apariencia del jugo o del azúcar. Su carácter depende, hasta cierto punto, del tipo de la caña, el suelo, de las condiciones de cultivo, el área geográfica y de los procesos de molienda y producción empleados.

Las sustancias responsables del color del azúcar se clasifican normalmente como impurezas diferentes del azúcar. En la producción de azúcar, se vuelve extremadamente importante separar estas impurezas coloreadas, particularmente en vista de la creciente demanda de azúcares blancos refinados de calidad alta.

Desde hace tiempo se han efectuado numerosas investigaciones sobre el color del azúcar de caña en lo que respecta a su naturaleza, su separación y su medición. Sin embargo, todavía es limitada la cantidad de información que se tiene sobre el color de los productos de la caña, aunque recientemente se ha puesto una atención en ese problema, debido a su importancia fundamental. Esta investigación se ha efectuado sobre la determinación de la reducción de color, dado que se ha encontrado la necesidad de una correcta medición por medio de los modernos métodos de análisis espectrofotométrico, antes de llevar a cabo investigaciones más exactas sobre las propiedades físicas de los no-azúcares coloreados.

A la vez, esto dará lugar a un mejor entendimiento de la naturaleza del color en los productos del azúcar y también de la mejor forma de eliminar el aumento de color. En particular se lograrán mejoras en los métodos de medición, los que beneficiarán en mucho la industria del azúcar.

La eliminación de color es el propósito principal de la refinación de azúcar. Un proceso no controlado en la etapa de sulfitación, tratamiento de jugo, clarificación de meladura y en la recuperación de sacarosa pueden afectar el el color elevado en el azúcar final. Debido a esto, en los ingenios se trabaja con amplios rangos de seguridad para poder controlar los puntos críticos en cada etapa de clarificación y tratamiento de jugo.

La sulfitación es la manera de mejor costo-beneficio para decolorar el azúcar. Funciona quebrando las estructuras moleculares colorantes para formar sustancias más simples e incoloras. Además, con la quiebra de las moléculas de polisacáridos, las mieles quedan menos viscosas. El sulfito forma una sal insoluble con la cal, que ayuda en el tratamiento del jugo y no presenta riesgos de inversión de sacarosa. Por esta razón se evaluó la capacidad de remoción de color de los sistemas empleados para el jugo y meladura, y al ser aplicados dichos sistemas de sulfitación se analizó si afectan otros parámetros que puedan incidir en la calidad del azúcar y/o en el color indirectamente como el pH en el jugo, porcentaje pol, pureza y concentración de sulfitos.

## 1. ANTECEDENTES

En el Ingenio La Unión S.A. el proceso de tratamiento de jugo se realiza en dos subprocesos paralelos que es el tratamiento de jugo para la línea de producción de azúcar blanco y el tratamiento de jugo para la línea de producción de azúcar crudo. Las diferencias se demuestran en la siguiente tabla:

Tabla I. **Diferencias principales entre ambos procesos de producción de azúcar**

Línea de crudo	Línea de blanco
Normalmente no se hay sulfitación	Existe sulfitación de jugo
Niveles de alcalización son más altos	La meladura se clarifica por flotación
Se procesa todo el jugo filtrado	No se realiza precalentamiento; el calentamiento puede hacerse mediante el calentador de placas y de vapor de 3° efecto, se realiza al jugo luego de ser sulfitado y alcalizado (sulfitación en frio)
No existe clarificación de meladura	

Fuente: elaboración propia.

El área de purificación del jugo tiene como función principal, eliminar impurezas presentes en el jugo de caña con el mínimo de pérdidas de azúcar. En esta área, el jugo de caña es sometido a procesos de alcalización y calentamiento con el objeto de desechar del jugo las sustancias indeseables

tales como: bagacillo, tierra y no azúcares en forma de cachaza, y así, poder entregar al área de evaporación un jugo claro. El desempeño en el proceso de clarificación afecta directamente la calidad del azúcar, por lo que la clarificación del jugo debe hacerse de tal forma que se garantice la calidad del jugo.

El color del azúcar está referido a todas aquellas sustancias presentes en el azúcar que absorben cierta cantidad de energía, cuando la solución de azúcar se ajusta a pH 7. “El mecanismo de cambio de color del azúcar producido empieza a cambiar desde el momento de su producción; este cambio puede ser casi cero o presentar cambios de color en un corto tiempo. La pendiente o cambio de color es variable y está en función de la calidad de azúcar. Este cambio de color avanza y a un límite máximo de color se estabiliza y ya no presenta cambios. El azúcar, en su estrato correspondiente, tiene cambios mínimos de color”<sup>1</sup>.

En la producción de azúcar cristalina a partir de jugo, el principal objetivo es la eliminación de colorantes. A menudo, las diferencias entre el azúcar con color aceptable y el azúcar fuera de especificación son poco visibles, realizando mediciones necesarias y frecuentes para controlar la producción.

La evaluación del proyecto de investigación se llevó a cabo para la alimentación de azúcar al proceso de disolución en la refinera, dado que para poder sostener dicho proceso se requiere que el azúcar de alimentación cumpla con la especificación de calidad en el color.

En la clarificación de los jugos de caña por medio del procedimiento de sulfitación se emplean cal y dióxido de azufre como agentes decolorantes. En

---

<sup>1</sup> MONZÓN, Luis. Comentarios y observaciones generales respecto a las causas del cambio de color en azúcar. p.1.

este procedimiento se añade al jugo, una cantidad de cal que la equivalente a su acidez natural, de ahí la necesidad de neutralizar el exceso de cal por medio de dióxido de azufre. Estos procesos de sulfitación van desde una mejora proceso en el tratamiento de jugo hasta la fabricación de azúcar final para consumo directo. El color normalmente aumenta en el proceso de clarificación. “El color oscuro de los jugos crudos es causado, en primer lugar, por varios derivados polifenólicos”.<sup>2</sup>

En el proceso de fabricación, el jugo está sujeto a la acción de calor, de la variación del pH, el contacto con los equipos, y la acción con los reactivos químicos añadidos, temperatura, turbidez, etc. Todos estos factores tienen un efecto diferente en lo que respecta al desarrollo de color. Algunos de los colores pueden ser producto por la acción química ejercida sobre los no azúcares de la caña, y pueden originarse también como resultado de la descomposición de los productos formados.

Debido a sus características físicas, químicas y calidad del jugo de caña, existen varias condiciones en las cuales puede afectar tanto en la clarificación del jugo como también en la recuperación de sacarosa, siendo los dos puntos como procesos críticos para llevar un control. Por lo que se requiere de un control de los procesos de tratamiento de jugo y una evaluación en la viabilidad de los sistemas empleados.

Durante la producción de azúcar se generan diferentes contaminantes y existen parámetros que se deben manejar para evitar el aumento de color en el proceso de tratamiento de jugo. Por esta razón, en Ingenio La Unión S.A., se implementaron varios sistemas en la clarificación, siendo los campos de

---

<sup>2</sup> HONIG, Peter. Principios de la tecnología azucarera. p. 208.

estudio, la sulfitación de jugo y de meladura para lograr una remoción de color considerable para la disolución de azúcar en el proceso de refinería.

Se realizó un análisis de eficiencia de los procesos varios que tienen relación directa con la disminución del color del jugo, meladura y azúcar final.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Proceso del azúcar**

El proceso del azúcar se describe a continuación:

#### **2.1.1. Extracción del jugo**

La extracción del jugo moliendo la caña entre pesados rodillos o mazas constituye la primera etapa del procesamiento del azúcar. Primero, la caña se prepara para la molienda mediante cuchillas giratorias que cortan los tallos en pedazos pequeños, mediante molinos de martillos que desmenuzan la caña pero no extraen el jugo, o bien, en forma más general, por una combinación de dos o tres de dichos métodos.

Para ayudar a la extracción del jugo (guarapo) se aplican aspersiones de agua o guarapo diluido sobre la capa de bagazo según lo que sale de cada unidad de molienda; lo anterior contribuye a extraer por lixiviación el azúcar. El proceso, conocido como imbibición (o, con menor frecuencia, saturación o maceración), puede presentar muchas modificaciones.

En las prácticas de molienda más eficientes, más del 95% del azúcar contenido en la caña pasa al guarapo; este porcentaje se conoce como la extracción de sacarosa (Pol de la extracción), o, más sencillamente, la extracción.

El bagazo final (*megass*) que sale del último molino contiene el azúcar no extraído, fibra leñosa y de un 45 a un 55% de agua. Este material pasa por lo general a las calderas como combustible, pero muchos ingenios compran combustible y utilizan el bagazo en la fabricación de tablas de bagazo prensado para paredes o papel, cama para el ganado, u otras utilización comercial de los productos secundarios.

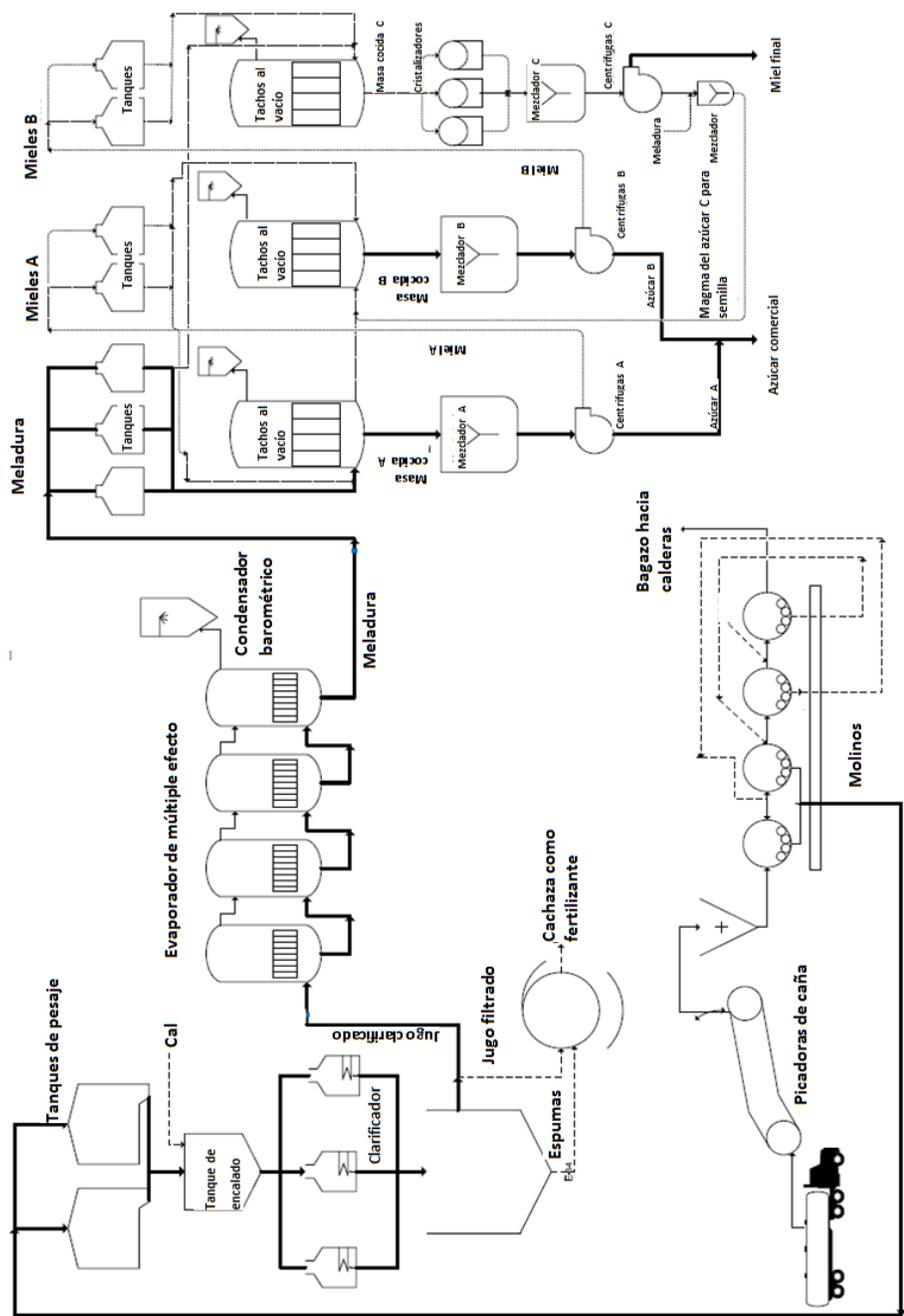
### **2.1.2. Purificación del guarapo: clarificación**

El jugo color verde oscuro procedente de los trapiches es ácido y turbio. El proceso de clarificación (o defecación), diseñado para remover las impurezas tanto solubles como insolubles, emplea en forma universal cal y calor como agentes clarificantes. La lechada de cal, alrededor de 1 lb (0.5 Kg) (CaO) por tonelada de caña, neutraliza la acidez natural del guarapo, formando sales insolubles de calcio, en su mayor parte fosfato de calcio.

El calentamiento del guarapo alcalizado hasta el punto de ebullición o ligeramente arriba, coagula la albúmina y algunas grasas, ceras y gomas; el precipitado así formado atrapa los sólidos en suspensión al igual que las partículas más finas. Los lodos se separan del jugo clarificado por sedimentación y se filtran en tambores rotativos de filtración.

El jugo filtrado regresa al proceso o pasa directamente al jugo clarificado y la tora de la prensa (cachaza) se desecha o se regresa a los campos como fertilizante. El jugo clarificado transparente y de un color parduzco pasa a los evaporadores sin tratamiento adicional. Asimismo, se ha desarrollado una amplia variedad de modificaciones del tratamiento con calor y cal.

Figura 1. Diagrama de operación del proceso de producción de azúcar en el Ingenio La Unión, S.A.



Fuente: CHEN, James C.P. Manual del azúcar de caña. p.74.

### **2.1.3. Evaporación**

El jugo clarificado, que tiene más o menos la misma composición que el jugo crudo extraído, excepto las impurezas precipitadas por el tratamiento con cal, contiene aproximadamente 85% de agua. Dos terceras partes de esta agua se evaporan en evaporadores al vacío de múltiple efecto, las cuales consisten en una sucesión (generalmente cuatro) de celdas de ebullición al vacío, o “cuerpos” dispuestos en serie, de manera que cada cuerpo subsiguiente tiene un grado más alto de vacío y, por consiguiente, hierve a una temperatura más baja. Los vapores de un cuerpo hacen hervir de esta manera el jugo contenido en el siguiente cuerpo. Mediante este sistema, el vapor introducido en el primer cuerpo efectúa una evaporación de múltiple efecto.

El vapor del cuerpo final pasa a un condensador. En la figura 1 se muestra un quíntuple efecto en el cual el vapor evapora cuatro veces su peso en agua. La meladura sale en forma continua del último cuerpo, con aproximadamente 65% de sólidos y 35% de agua.

### **2.1.4. Clarificación de la meladura**

En este caso, se añade a la meladura cal y ácido fosfórico, y luego se airea junto con la adición de un polímero floculante. A continuación la meladura tratada se pasa directamente a un clarificador.

### **2.1.5. Cristalización**

La cristalización tiene lugar en tachos al vacío de simple efecto, donde la meladura se evapora hasta quedar saturado de azúcar. En este momento se añaden semillas a fin de que sirvan de núcleos para los cristales de azúcar, y se

va añadiendo más meladura según se evapora el agua. El crecimiento de los cristales continúa hasta que se llena el tacho. Bajo la vigilancia de un tachero experto (o con instrumentos adecuados) los cristales originales crecen sin que se formen cristales adicionales, de manera, que cuando el tacho está totalmente lleno, todos los cristales tienen el tamaño deseado, y los cristales y la meladura forman una masa densa conocida como masa cocida (llamada también *fillmass* en algunas ramas de la industria).

La *templa* (el contenido del tacho) se descarga luego por medio de una válvula de pie a un mezclador o cristizador.

La ebullición de las masas cocidas y la reebullición de las mieles se llevan a cabo utilizando sistemas escogidos para ajustarse a muchas condiciones.

#### **2.1.6. Centrifugación o purga: reebullición de las mieles**

La masa cocida proveniente del mezclador o del cristizador se lleva a máquinas giratorias llamadas centrífugas. El tambor cilíndrico suspendido de un eje tiene paredes laterales perforadas forradas en el interior con tela metálica; entre esta y las paredes hay láminas metálicas que contienen de 400 a 600 perforaciones por pulgada cuadrada. El tambor gira a velocidades que oscilan entre 1000 y 1800 rpm. El revestimiento perforado retiene los cristales de azúcar que pueden lavarse con agua si se desea.

El licor madre, la miel, pasa a través del revestimiento debido a la fuerza centrífuga ejercida (de 500 hasta 1800 veces la fuerza de la gravedad), y después de que el azúcar es *purgado* se corta, dejando la centrífuga lista para recibir otra carga de masa cocida. Las máquinas modernas son exclusivamente

del tipo de alta velocidad (o de una alta fuerza de gravedad) provistas de control automático para todo el ciclo. Los azúcares de un grado pueden purgarse utilizando centrífugas continuas.

En el sistema de tres cristalizaciones, mostrado en la figura 1, la primera ebullición de la meladura crudo produce azúcar cruda y miel *A*, mismas que se regresan al tacho al vacío para que vuelvan a hervir sobre un *pie* de masa cocida de primer grado y se forme una segunda masa cocida (*B*), la que a su vez, produce una segunda carga de cristales.

El azúcar *B* se mezcla con el *A* para construir la producción comercial del ingenio. La miel *B*, o de segunda, tiene una pureza mucho más baja y a su vez se vuelve a hervir sobre un *pie* de cristales de meladura para formar una masa cocida de grado bajo o *C*; estas masas cocidas de bajo grado permanecen durante varios días en los cristalizadores, donde se enfrían y mantienen en movimiento por medio de brazos agitadores.

El azúcar *C* se mezcla con la meladura y se utiliza como semilla para las masas cocidas *A* y *B*. Las mieles o melazas finales o residuales, un material denso y viscoso que contiene aproximadamente una tercera parte de sacarosa, una quinta parte de azúcares reductores y el resto ceniza, compuestos orgánicos no azúcares y agua, sirve como base para la alimentación del ganado, fabricación de alcohol industrial, producción de levadura y para otros usos diversos.

### **2.1.7. Secado y enfriado**

El contenido de humedad del azúcar, al finalizar la separación centrífuga no mantiene un nivel apropiado para su manipulación y almacenamiento. La

función de secado busca entonces reducir el contenido de humedad del azúcar hasta un valor lo bastante bajo para impedir el desarrollo de microorganismos que puedan ocasionar el deterioro del producto o en el peor de los casos, su pérdida.

“La humedad del azúcar blanco producido debe de oscilar entre 0.026 y 0.037% a una temperatura de 35 °C y para el azúcar crudo entre 0.2 y 0.3% a una temperatura de 38.5 °C”.<sup>3</sup> El secado se realiza en secadores rotatorios y luego el azúcar pasa al enfriado. El enfriamiento del azúcar se realiza en un tambor metálico a través del cual pasa aire en flujo contracorriente succionado por un extractor. El aire que pasa por el secador arrastra consigo una pequeña cantidad de polvo de azúcar, siendo necesario la utilización de aspersores para la recuperación del azúcar arrastrada, retornándola posteriormente al proceso.

### **2.1.8. Envasado y almacenaje del azúcar**

De la enfriadora, el azúcar pasa a una faja transportadora que luego es introducida a un elevador y deposita el azúcar en las fajas que llenan unas tolvas, conectadas directamente con las envasadoras de sacos o jumbos. Máquinas de costura industriales realizan el cierre del saco, que está listo para el almacenaje. El azúcar blanco es almacenado en sacos de 50 kg o jumbos de 1 000-1 400 kg en lugares previamente determinados, facilitando el control de calidad. El azúcar crudo de exportación sale directamente de la enfriadora a las bodegas de almacenamiento. En las bodegas se carga a granel en camiones que la transportan al puerto de embarque.

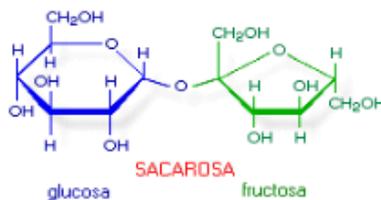
---

<sup>3</sup> INGENIO LA UNIÓN S.A. Producción de edulcorantes: procedimientos e instructivos. p.4.

## 2.2. El azúcar

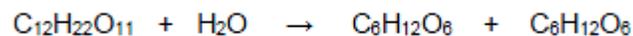
El azúcar (sacarosa), es un carbohidrato de fórmula general  $C_{12}H_{22}O_{11}$ ; un disacárido que consiste en dos compuestos monosacáridos: D-glucosa y D-fructuosa.

Figura 2. Estructura molecular de la sacarosa



Fuente: centro documental Ingenio La Unión S.A.

Cuando se invierte la sacarosa, por la acción de un ácido o de una enzima, la molécula se divide dando glucosa y fructuosa:



Esta reacción, a la que se llama hidrólisis o inversión, tiene efecto a diversas velocidades, que dependen de condiciones tales como la temperatura, el tiempo y el pH. Estos dos azúcares reductores desarrollan color cuando se les sujeta a condiciones de calor y pH alcalino. Si estas son extremas se destruirán los azúcares reductores formándose en la reacción varios productos, los que a su vez se unen fácilmente con otros compuestos que ya antes estaban presentes o que también se originan en el proceso, y las sustancias resultantes son a menudo la fuente del color de los productos del jugo de la caña o del azúcar crudo.

En las fábricas de azúcar se hace un extenso uso de los agentes químicos con objeto de conseguir ciertos cambios deseables en la naturaleza de los materiales procesados.

El propósito de varios procedimientos de purificación de jugos es convertir los jugos mezclados que son lodosos y de color verde oscuro, en jugos clarificados brillantes de color amarillo claro.

Para conseguir dicho resultado se utiliza el color como algunas sustancias químicas cuya acción es precipitar aquellos no-azúcares que si no se eliminan del jugo, podrían interferir en contra de una eficiente separación de los cristales de sacarosa del licor madre. Podría pensarse que la elección de las sustancias químicas que se usan en la clarificación del jugo ha sido hecha con un completo conocimiento de la naturaleza química de los no-azúcares que uno desea eliminar, pero esto no es así. La cal fue prácticamente el único agente purificador en uso mucho antes de emplearse los actuales.

### **2.3. Desarrollo del color**

Los colores de los constituyentes de la caña de azúcar, se derivan de pequeñas cantidades de pigmentos naturales tales como clorofilas, carotenoides y antocianinas, que se encuentran generalmente en la planta. En gran parte el color también resulta del material coloreado formado por degradación de los azúcares y los aminoácidos, por reacciones de polifenol hierro y entre los azúcares reductores, y por otras reacciones similares que tienen lugar durante el proceso de fabricación.

Dichos componentes coloreados se encuentran formando parte de muchas combinaciones, desde un punto de vista práctico; estos constituyentes no pueden ser separados, debiéndose considerar que el color es una propiedad particular del azúcar.

En el proceso de elaboración de azúcar, al clarificar el jugo crudo de la caña, el calor y la cal incrementan el color debido a que descomponen los azúcares reductores. La presencia del hierro proveniente del equipo tiende también a incrementar el color obtenido debido a su reacción con los polifenoles. En las operaciones de evaporación y de cristalización puede desarrollarse color, debido a la caramelización y a los productos de la descomposición causada por el sobrecalentamiento. En las operaciones de refinación la solución se debe mantener con un pH lo más cercano a 7.0, evitándose a la vez las temperaturas excesivas.

### **2.3.1. Materiales coloreados provenientes de la caña**

- Las sustancias de la caña que ya tenían color en su forma original.
- Las sustancias de la caña que son normalmente incoloras en su forma original pero que pueden desarrollar un color después de su extracción de la caña.
- Los compuestos coloreados que se forman durante el proceso por descomposición de algunos productos y por otras reacciones químicas.

### 2.3.1.1. No azúcares coloreados, existentes originalmente en la caña

- Clorofilas: la clorofila es la cromoproteína que forma la materia colorante verde de las plantas. Se conforma de dos pigmentos: la clorofila *a* y la clorofila *b*. La clorofila *a* tiene la fórmula empírica  $C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$  y la clorofila *b* tiene la fórmula empírica  $C_{55}H_{70}O_6N_4Mg$ . La clorofila forma una masa suave, insoluble en agua y en soluciones de azúcar pero solubles en alcohol, éter, álcalis y en otras sustancias; es de naturaleza coloidal. En el jugo de caña la clorofila está presente en suspensión, lo que facilita la separación durante el proceso, asegurando su ausencia en las melazas. Aparentemente se forman compuestos incoloros con los iones férricos.
- Xantofila: constituye el pigmento amarillo presente en las plantas. Su fórmula es  $C_{40}H_{56}O_2$ . Es insoluble en agua y en soluciones de azúcar, lo que no influye en el proceso de fabricación.
- Caroteno: son pigmentos amarillos. Su fórmula es  $C_{40}H_{56}$ , tanto para  $\alpha$ -caroteno como para  $\beta$ -caroteno. Son insolubles en agua y en solución de azúcar, por lo tanto no influye en el jugo de caña.
- Antocianina: término general para sustancias rojas, azules y violetas que se encuentran en las plantas. Son solubles en agua, perteneciendo al grupo de compuestos orgánicos clasificados como glucósidos. Con ácido clorhídrico concentrado toman color rojo, y con hidróxido de sodio al 10% se vuelve de color violeta rojizo.

La antocianina está ausente en variedades de caña blanca o amarilla, pero es muy evidente en las de color oscuro. Al molerse la caña, las antocianinas entran en el jugo y al añadirse cal este toma un color

verde oscuro, pero no se precipita, excepto en solución fuertemente alcalina. Esta sustancia pertenece al grupo de los poli-fenoles que se oscurecen al combinarse con las sales de hierro. La sulfatación separa parcialmente la antocianina y su cantidad varía dependiendo del tipo de caña.

### **2.3.1.2. No azúcares en la caña que pueden desarrollar un color**

Existe gran cantidad de no-azúcares incoloros en la caña de azúcar que al combinarse o reaccionar con otras sustancias pueden formar materias colorantes. Se pueden clasificar en:

- Polifenoles: los polifenoles de la caña de azúcar reaccionan con el hierro y el oxígeno para dar compuestos de color oscuro, especialmente en soluciones alcalinas. Entre ellos están incluidos el tanino, derivado del ácido protocaténico, los hidroxilos fenólicos de la antocianina en la corteza, y de la “sacaretina” en la fibra de la caña. Además, las huminas y melanoidinas de la caña también contienen hidroxilos fenólicos. Todos estos polifenoles se oscurecen en contacto con el aire y en soluciones alcalinas, y forman compuestos de color muy oscuro con los iones férricos.

La sacaretina, se encuentra en la fibra; en soluciones alcalinas toman un color amarillo y en soluciones neutras o ácidas es incolora. En las yemas y puntas de la caña reaccionan con el hierro y producen sustancias oscuras. Aunque el tanino, puede reaccionar más fácilmente, debido a su solubilidad en agua.

- Aminocompuestos: el nitrógeno en el jugo de la caña está representado por pocas centésimas del total que posee la caña de azúcar (1%). La mitad está representada en amoníaco, aminoácidos y amidas. Estos compuestos incluyen asparraguina y glutamina, con sus correspondientes ácidos aspártico y glutámico. Otros compuestos menos significantes son tirosina, lisina, guanina, xantina y 5-metil-citosina.

La flicina, alanina, valina y leucina reaccionan con pequeñas cantidades de azúcares reductores formando compuestos coloreados.

#### **2.3.1.3. No azúcares coloreados obtenidos de los productos de descomposición del azúcar**

- Caramelo: cuando el azúcar es calentado a más o menos 200°C se forma un material de color oscuro llamado caramelo, debido a reacciones de deshidratación y condensación. El caramelo se puede formar tanto de la sacarosa como de la glucosa y de la fructosa y la composición depende de las condiciones de tiempo, temperatura y pH.
- Productos de la descomposición del azúcar: cuando el azúcar de una solución queda sujeto a altas temperaturas y a condiciones ácidas se hidroliza formando los azúcares reductores D-glucosa y D-fructosa. Estas hexosas se descomponen por calentamiento prolongado y bajo condiciones fuertemente alcalinas. Los productos resultantes, de color café, muchas veces son ácidos, lo que causa una posterior inversión de la sacarosa.

- Productos de reacción entre azúcares reductores y aminocompuestos: se debe a una reacción entre las hexosas y los relativamente débiles aminoácidos o aminoácidos complejos, donde influyen temperatura, humedad, pH y tiempo.

Basándose en lo anterior se tiene en cuenta:

- Las clorofilas, xantofilas y el caroteno son insolubles en agua, su importancia es pequeña, ya que se eliminan junto con otras impurezas insolubles, en el proceso de clarificación.
- Las antocianinas tienen importancia debido a su color oscuro y a que reaccionan con el hierro, para dar compuestos coloreados.
- Las melanoidinas pueden llegar a tener importancia cuando exista la suficiente cantidad de nitrógeno para permitir la reacción entre los aminocompuestos y los azúcares reductores; aunque por otra parte pueden ser eliminadas en una variable proporción durante el procesamiento del jugo.

#### **2.4. Efecto del pH en el color**

Es un hecho que el color del azúcar depende de gran parte del pH de la solución. Esto se debe al diferente color que tienen algunas sustancias a diversas acideces y alcalinidades, siendo la materia colorante, en este caso, un indicador natural del pH. En general, “el color es más claro en las soluciones ácidas que en las alcalinas; esto fue observado en diversas investigaciones y procesos de decoloración.”<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> REIN, Pieter. Sugar cane engineering. p.532.

## **2.5. Cambios de color en la práctica**

Existen varios parámetros que pueden afectar el color del azúcar en el proceso, los mismos que se describirán a continuación:

### **2.5.1. Oscurecimiento del jugo de la caña**

- Los estabilizadores del pH tienen un importante efecto sobre los cambios de color.
- Las sustancias húmicas café rojizas pueden quedar ocluidas en los cristales de azúcar, particularmente a valores bajos de pH.

### **2.5.2. Color en el azúcar**

Casi todo el azúcar crudo como los productos intermedios del azúcar están coloreados, ya sea de amarillo, ámbar o café rojizo oscuro. La cantidad y naturaleza de estos colores dependen del tipo de la materia colorante original y de las reacciones que ocurren durante el proceso. Los diversos factores que intervienen se originan en los crudos, las condiciones de la operación (pH, temperatura, etc.), los adsorbentes que se usan en el proceso, y en otras variables semejantes.

### **2.5.3. Desarrollo del color en el procesamiento del azúcar de caña**

Cierto número de los mismos factores están involucrados en el oscurecimiento del jugo de la caña y del azúcar crudo. Se aplican en las operaciones de refinación. En este proceso se lava el azúcar crudo y se funde;

esto es denominado licor afinado, se alcaliza, filtra y decolora; el último proceso es la cristalización y en esta etapa puede formarse color durante la concentración por ebullición. Parte de este color puede estar contenida en la película líquida que rodea el cristal, ya que, el cristal de sacarosa puede absorber ciertas impurezas coloridas tales como el caramelo coloidal y la melanoidina.

En soluciones ácidas de pH 5, el cristal adsorbe más materia colorante que en soluciones alcalinas de pH 9.

Sin perder de vista que uno de los principales objetivos del proceso de refinación es la eliminación del color, se puede decir que la eliminación de este no es siempre práctica. Por otra parte, como durante el proceso hay una formación de color, las condiciones deben ser cuidadosamente controladas para evitar un desarrollo excesivo del color.

El licor almacenado presenta un aumento de color hasta de un 200% a medida que disminuye la temperatura.

#### **2.5.4. Desarrollo del color en el azúcar blanco**

El desarrollo del color en el azúcar blanco es muy lento cuando se almacena en un lugar fresco, ya que la presencia de no-azúcares coloreados es muy pequeña. Según estudios en un azúcar almacenado durante aproximadamente 160 horas a 55°C -68°C, el incremento del color es del 14%, aproximadamente.

## **2.6. Separación del color de los precipitados y adsorbentes**

Los no-azúcares coloreados que están presentes en el jugo de caña pueden separarse por medio de varios procesos físicos y químicos, los más empleados son:

- Cal y ácido fosfórico: agentes precipitantes en clarificación
- Carbón de huesos o carbón activado: purificación.
- Dióxido de azufre: decolorante.

En ciertos casos la separación de color se lleva a cabo por medio de la formación de compuestos insolubles que acarrean con ellos el color, directamente o en forma coloidal.

Se debe resaltar que aunque se usen dichos agentes precipitantes o adsorbentes, existe el peligro de que se forme más color si los agentes no se usan bajo las condiciones apropiadas; por lo tanto, es esencial mantener hasta donde sea posible, las condiciones en las que no se formen ni se destruyan los azúcares reductores.

## **2.7. Método más empleado para eliminación de color en productos de la caña de azúcar**

Realizando un enfoque principalmente en el proceso de eliminación de color mediante el empleo de dióxido de azufre, se tendrá en cuenta aspectos desde su producción hasta el efecto directo en el producto extraído de la caña de azúcar.

### **2.7.1. Proceso de sulfitación**

El proceso de sulfitación ha sido empleado durante muchos años para la producción de azúcares blancos de consumo directo.

El uso del SO<sub>2</sub> unido al de la cal en la fabricación de azúcar crudo no es procedimiento general, “en la actualidad en Estados de Norteamérica y Sudáfrica se empleaba el método de la sulfitación desde los años 20, aproximadamente; aunque el costo adicional de la sulfitación, el aumento de incrustaciones en calentadores y evaporadores y el mayor contenido de ceniza en los azúcares crudos que se logran por este proceso, son los motivos por los cuales se ha interrumpido la sulfitación en la producción de crudos.”<sup>5</sup>

### **2.7.2. Azufre**

Es uno de los agentes químicos más importantes de la industria azucarera. Se emplean los grados conocidos como azufre en piedra y azufre en rodillos.

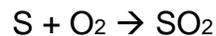
Cuando el azufre se quema en un quemador tipo cerrado, la presencia de impurezas (sustancias bituminosas) puede interferir con la combustión debido a la formación de la película en la superficie estacionaria del azufre fundido, la que previene el acceso del aire necesario para el proceso de combustión.

---

<sup>5</sup> SPENCER-Meade. Manual del azúcar de caña. p. 343.

### **2.7.3. Gas del quemador de azufre: dióxido de azufre**

El proceso de combustión: el azufre calentado en el aire a 250°C se inflama y se quema con una llama de color azul púrpura, formando dióxido de azufre y produciendo 2217 Kcal/Kg de azufre.



El calor desprendido es más que suficiente para fundir todo el azufre presente en el aparato, utilizando para producir dióxido de azufre y para calentar el azufre fundido, hasta una temperatura final que depende de la velocidad de combustión y del efecto sobre el dispositivo externo de enfriamiento que usualmente se tiene.

El azufre fundido se evapora (la presión de vapor depende de la temperatura del líquido) y los vapores calientes de azufre se queman al entrar en contacto con el aire. La combustión ocurrirá al entrar en contacto con el aire. La combustión será completa si se hace llegar el suficiente oxígeno por un periodo de tiempo suficientemente grande a una alta temperatura suficiente.

### **2.7.4. Hornos quemadores de azufre**

En la industria azucarera se utilizan dos tipos de quemadores: el tipo cerrado y el tipo abierto.

Los hornos empleados en el Ingenio La Unión S.A. son hornos rotatorios compuestos de un cilindro horizontal, de acero, con extremos en forma de cono, de hierro colado, diseñado de tal manera que se le pueda impartir un lento movimiento de rotación alrededor de su eje horizontal. El azufre alimenta

manualmente a la tolva dosificadora que se mueve a una velocidad constante, regulando el paso hacia los hornos rotatorios, fundiéndose al caer, por lo que gotea al interior del aparato. El aire necesario para esta combustión entra por el extremo anterior del aparato.

Como el azufre fundido está en constante movimiento, no deja que se forme la película de sustancias bituminosas, permite así que se pueda quemar una calidad de azufre mayor que en otro tipo de quemador.

Los gases de  $\text{SO}_2$  ascienden por la tubería que consta de una camisa de enfriamiento por la cual circula agua para disminuir la temperatura de los gases. La adición de azufre se realiza sin interrupción del proceso de combustión.

En cualquier tipo de quemador de azufre, el aire que se suministre al horno debe estar seco, ya que la humedad de este permitirá la formación de ácido sulfúrico, cuyo efecto es claramente perjudicial para las tuberías, accesorios, etc.; y es especialmente grave si llega al guarapo.

### **2.7.5. Torre de sulfitación**

Los aparatos de sulfitación pueden tener muchas formas dependiendo si esta se hace por batch, continua y de acuerdo con la temperatura.

Este proceso se desarrolla así: el jugo mezclado frío penetra en forma de ducha en tanques altos, verticales y cilíndricos, de 1.20 m o más de diámetro y de 4.5 m de alto, cuyas dos terceras partes superiores están dotadas de una serie de parrillas de madera dura, construidas en tablas de 2x4 pies, puestas de canto. El jugo entra por la parte superior de la torre, en forma de ducha, y atraviesa el emparrillado de madera, en el cual encuentra la corriente gaseosa ascendente de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ). Estas torres funcionan en

contracorriente al vacío; el cual puede ser generado por medio de un eyector (entendiendo que funcionan con el mismo principio), los cuales trabajan como un sistema venturi generando vacío por el cambio de velocidades, debido a las restricciones en la tubería.

El flujo de azufre aproximado de 1500- 3000 Lb/h se controla por medio de la medición de la acidez (pH) de la mezcla resultante.

### **2.7.6. Tipos de sulfitación**

Los procesos de sulfitación pueden darse los siguientes cambios:

- Modificar la secuencia en la cual se aplica la cal y el SO<sub>2</sub>: alcalinizar y sulfitar primero, aplicar la cal y el gas simultáneamente; estos son procedimientos fraccionados.
- Modificaciones de la temperatura: sulfitar en caliente o en frío, calentar escalonadamente.
- Aplicación de los reactivos: en etapas o tandas, de manera continua, con control manual o automático.

#### **2.7.6.1. Sulfitación en frío**

Consiste en bombear el guarapo crudo frío a través de una torre o caja de sulfitación, en contracorriente con el SO<sub>2</sub>, para que absorba todo el gas que sea posible (acidez 3.0 a 4.0 ml, álcali 0.1 N por 10 ml de jugo, pH 4.0 o inferior). La alcalinización hasta acidez débil (pH aproximado 6.5) es seguida por la calefacción, sedimentación y decantación, igual que en el proceso de

defecación. Después se evapora hasta formar una meladura ligera, que se deja decantar de 6 a 24 horas antes de cocer. A la primera templa, que rinde un azúcar casi blanco que se lava bien en la centrifuga, sigue frecuentemente una segunda que rinde azúcar crudo de calidad inferior.

#### **2.7.6.2. Sulfitación después de alcalinizar**

Al jugo se le adiciona una cantidad considerable de lechada de cal. Entonces se hace la sulfitación hasta un pH de aproximadamente 7.5, produciéndose un precipitado denso que puede ser eliminado por sedimentación y decantación. Después de la evaporación, la meladura se enfría y sulfita a punto ligeramente ácido (pH 6.5).

#### **2.7.6.3. Sulfitación en caliente**

El propósito de esta técnica es el de disminuir la solubilidad del sulfito de calcio, que es más soluble a baja temperatura y alcanza su solubilidad mínima a unos 75°C. El jugo se calienta primero a esta temperatura, después se sulfita y alcaliniza (pH aproximado 7.2), se hierve y se deja sedimentar.

#### **2.7.6.4. La sulfitación continua**

El jugo y el gas pasan continua y simultáneamente en contracorriente a través de una torre, después se alcaliniza el jugo ácido según un procedimiento por tandas o etapas.

#### **2.7.6.5. Procedimientos fraccionados**

Consiste en aplicar la cal en dos etapas: se prealcaliniza el guarapo a pH 11.0 durante un corto tiempo, y después mantienen el pH entre 7.5 y 8.0, alcalinizando y sulfitando simultáneamente.

#### **2.7.6.6. La sulfitación de meladura**

Se emplea meladura que sale de los evaporadores, y se obtiene un azúcar de calidad mejor y más uniforme que la que se obtiene por sulfitación del guarapo solo. La meladura sulfitada se suele mantener a pH definitivamente ácido (pH 6.1 a 6.5).

#### **2.7.7. Aspectos positivos de la sulfitación**

Es múltiple el efecto del dióxido de azufre en la fabricación de azúcar, pudiendo esto representarse brevemente de la siguiente manera:

- En la acidificación de los jugos mezclados, se agrega dióxido de azufre hasta un pH menos de 6.0, reaccionando este compuesto con el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , para formar el complejo insoluble  $\text{R}_2\text{O}_3 (\text{SiO}_2)_n$ . Esta misma reacción ocurre en la sulfitación de meladuras y melazas.
- El dióxido de azufre se combina con el  $\text{CaO}$  en el proceso de sulfitación produciendo  $\text{CaSO}_3$  en forma de gruesos cristales, que funcionan como auxiliares de la operación de filtración.

- En la sulfitación de meladura y melazas, el dióxido de azufre reacciona con los organatos de calcio formando  $\text{CaSO}_3$  insoluble y ácidos orgánicos libres.
- En los jugos, el dióxido de azufre retarda la reacción entre los azúcares reductores y, en particular, inhibe la formación de compuestos de oxidación de color oscuro, productos de la condensación de aminoácidos y azúcares reductores.
- Está demostrado que los sulfitos no se oxidan rápidamente a sulfatos si las soluciones de azúcar están en contacto con el aire. El exceso de dióxido de azufre presente en las soluciones ácidas (pH menor de 6.0), se separa parcialmente por evaporación.
- El exceso de dióxido de azufre libre que existe en las soluciones de azúcar se separa parcialmente en los tachos por efecto del vacío.
- Es evidente que la intensiva sulfitación de meladuras y melazas tiene un efecto muy especial, aunque el análisis de los líquidos que están en proceso de cristalización muestra que una gran parte del  $\text{SO}_2$  no está ya presente por haberse eliminado por evaporación durante la operación de concentración.
- La cantidad de sulfitos que, de hecho, se transforma en sulfato (desde la meladura hasta las mieles finales y el azúcar elaborado), comprende no más del 10% del azufre que como  $\text{SO}_2$  se añade a la meladura.
- Según estudios realizados, se indica que el efecto blanqueador es probablemente el resultado de la combinación con los azúcares reductores, obteniéndose así un bloqueo de la función carbonilo, que es esencial para la formación de caramelo y melanoidina.

- Si el jugo se alcaliza antes de la sulfitación se forma un precipitado pesado que absorbe una gran cantidad de sustancias colorantes.

### **2.7.8. Aspectos negativos de la sulfitación**

Al sulfitar meladuras y melazas debe hacerse una distinción entre las reacciones siguientes, causadas por un exceso de azufre como agente precipitante:

- A valores bajos de pH (pH 6.0) el dióxido de silicio reacciona con los sesquióxidos para formar compuestos insolubles ligeramente hidratados, los que disminuyen la viscosidad que poseen las soluciones de azúcar.
- El dióxido de azufre reacciona con los organatos de calcio produciendo un precipitado de  $\text{CaSO}_3$  y ácidos orgánicos libres, disminuyendo también la viscosidad de las soluciones.
- En la práctica se ha encontrado que si las meladuras blanqueadas se exponen al aire durante algún tiempo, entonces se oscurecen otra vez debido a la oxidación.
- La temperatura y la alcalinización son muy importantes desde el punto de vista del color final que se trata de obtener. Las temperaturas arriba de  $70^\circ\text{C}$  son altamente perjudiciales para aclaración del color, así como también las alcalinizaciones arriba de un pH de 8.5. Se ha dicho que los mejores azúcares sulfitados se obtienen evitando una sobre alcalización localizada (no sobre un pH de 8.0) y una alta temperatura (no sobre  $70^\circ\text{C}$ ).

## **2.8. Sistemas de sulfitación de meladura por medio de eyectores de mezcla**

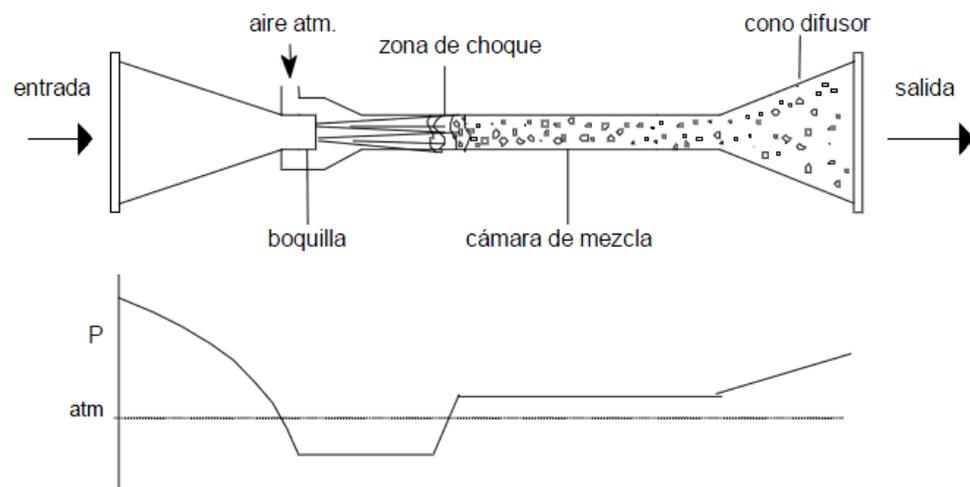
Una interesante forma de aireación, combina ventajas de los dos procesos anteriores, sin embargo, sin incorporar sus respectivas desventajas, consiste en la aireación con eyectores de mezcla. En el interior de esos sistemas (figura 3), el líquido es acelerado en un venturi, cambiando la presión estática por velocidad de escurrimiento. Con eso, se genera vacío a la salida de la boquilla del eyector, succionando aire atmosférico que fluye paralelamente con el líquido en dirección a la cámara de mezcla del equipo. En esa cámara ocurre la desaceleración de medio y el consecuente cambio de velocidad de escurrimiento por energía de incisión y presión estática.

En determinado punto de esa cámara (zona de choque), ocurre un choque del aire con el líquido, promoviendo un íntimo contacto entre las fases. En la zona de choque, la presión estática se eleva inmediatamente, al mismo tiempo en el que el atrito y la incisión causados, provocan la dispersión del aire en el líquido en la forma de microburbujas. La mezcla líquido-aire pasa entonces por un área del equipo donde es concluido el cambio de velocidad-presión estática.

Con el aumento de la presión estática se tiene la disolución de una parte del aire disperso en el medio, originando un medio prácticamente saturado con aire disuelto, al igual que una gran cantidad de microburbujas de aire, finalmente dividido y disperso. De esa forma, en la aireación con eyectores de mezcla, las burbujas son producidas tanto por proceso de aire disuelto como disperso, sin limitaciones prácticas de la cantidad de aire que puede ser agregada y sin la necesidad de compresores de aire, garantizando una óptima

eficiencia con bajo costo de inversión y reducido consumo energético, mismo cuando se opera con “Brix” alto y temperatura de meladura elevada.

Figura 3. **Sistema de aireación por eyector de mezcla – perfil de presión**



Fuente: Engheno Novo. Eyectores de mezcla. Diapositiva 11.

### 2.8.1. Especificaciones de los sistemas de sulfitación

Se desarrolló una tecnología sencilla y eficiente para la sulfitación de jugo de caña y meladura utilizando eyectores de reacción, lo cual puede operar automáticamente y con total recuperación de los gases no absorbidos en ocasiones de paros de molinos, siempre presentando la más alta eficiencia de dosificación y los menores costos operacionales. El sistema presenta una serie de ventajas para la industria a comparación con los sistemas tradicionales, como por ejemplo:

- Es extremadamente compacto
- Presenta menor consumo de azufre para una dada dosificación
- Mejor clarificación del jugo de caña y meladura
- Mayor eficiencia de absorción de los gases de azufre
- Bajo costo de mantenimiento
- Mejor control ambiental
- Mejor reacción gas-líquido
- No requiere equipos adicionales (ventiladores o eyectores de vapor) o energía para el tiraje de los gases
- No presenta riesgos de inversión de sacarosa

### 2.8.2. Parámetros operacionales de la sulfitación de jugo

Parámetros de operación para el sistema de sulfitación de jugo en la línea de jugo crudo:

Tabla II. Parámetros de operación de la sulfitación de jugo

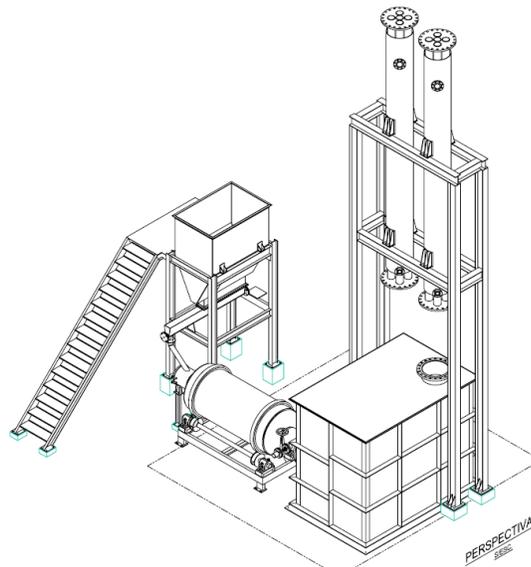
Dosificación de sulfitos en el jugo sulfitado	500	Ppm SO <sub>2</sub>
Caudal de jugo alimentado a la sulfitación	450	m <sup>3</sup> /h
Eficiencia de la sulfitación respecto del aprovechamiento del azufre	90	% Aprovechamiento de azufre
Exceso de aire alimentado para combustión de azufre	120	%
Temperatura del aire en la atmósfera	30	°C
Relación de área de combustión de azufre en el horno	28	Kg S/m <sup>2</sup> .h

Continuación de la tabla II.

Relación de volumen en la cámara de sublimación	2,0	m <sup>3</sup> /Ton. S-día
Temperatura del agua de enfriamiento en la entrada de la columna	28,0	°C
Temperatura del agua de enfriamiento en la salida de la columna	45,0	°C
Temperatura del gas después del enfriamiento	180	°C
Coefficiente de intercambio de calor en la columna de enfriamiento (U)	12,0	Cal/°C-m <sup>2</sup> -s

Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Sistema de sulfitación de jugo



Fuente: elaboración propia.

### **2.8.3. Parámetros operacionales de la sulfitación de meladura**

El equipo de gasificación del sistema de sulfitación de meladura para operación posee una capacidad máxima de 80m<sup>3</sup>/h de meladura, conforme a la tecnología de eyectores de mezcla, los cuales cuentan con especificaciones tales como:

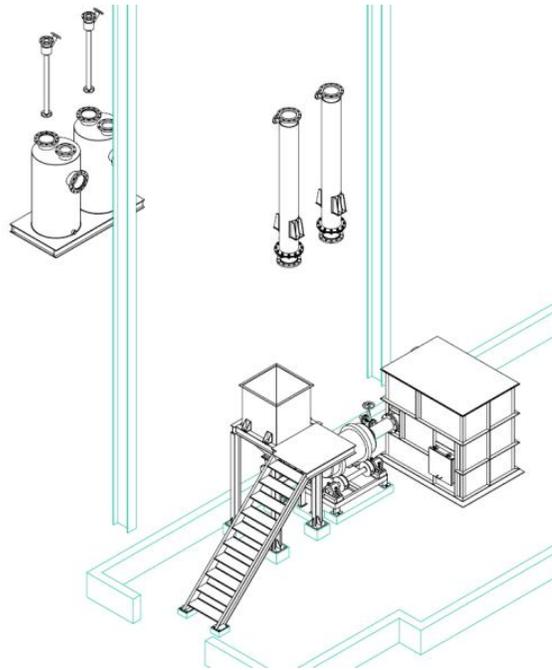
- Tipo: eyector liquido-gas, con cámara de mezcla y boquilla eyectora
- Capacidad 40 m<sup>3</sup>/h (176 gpm) de meladura por equipo
- Montaje: sistema modular, montado en paralelo, permitiendo cualquier aumento de capacidad de producción
- Materiales:
  - Cámara principal: acero inoxidable
  - Cámara de mezcla: acero inoxidable
  - Entrada de gases: acero inoxidable
  - Conexiones: mel.- bridas-acero carbono; gas.- bridas acero carbono
  - Boquilla eyectora: acero inoxidable

Tabla III. **Parámetros de operación de la sulfitación de meladura por eyectores de mezcla**

Dosificación de sulfitos en el jugo sulfitado	400	ppm SO <sub>2</sub>
Caudal de jugo alimentado a la sulfitación	80	m <sup>3</sup> /h
Eficiencia de la sulfitación en respecto al aprovechamiento del azufre	90	% aprovechamiento de azufre
Exceso de aire alimentado para combustión de azufre	120	%
Temperatura del aire en la atmósfera	30	°C
Relación de área de combustión de azufre en el horno	28	Kg S/m <sup>2</sup> .h
Relación de volumen en la cámara de sublimación	2,0	m <sup>3</sup> /Ton. S-día
Temperatura del agua de enfriamiento en la entrada de la columna	28,0	°C
Temperatura del agua de enfriamiento en la salida de la columna	45,0	°C
Temperatura del gas después del enfriamiento	180	°C
Coeficiente de intercambio de calor en la columna de enfriamiento (U)	12,0	Cal/°C-m <sup>2</sup> -s

Fuente: elaboración propia.

Figura 5. **Sistema de sulfitación de meladura por eyectores de mezcla**



Fuente: elaboración propia.

### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

Para la realización de la investigación en donde se evaluó el proceso de clarificación de jugo y reducción de color final, se tomaron en consideraciones las variables que se presentan en la tabla IV.

Tabla IV. Variables en la operación

No.	Variable	Dimensión	Factor perturbador		Tipo de variable	
			Controlable	No controlable	Dependiente	Independiente
1	Flujo de jugo	gpm	X			X
2	Cantidad de azufre	Lb/ton	X			X
3	Cal hidratada	Lb/ton	X			X
4	Polarización (Pol)	%		X	X	
5	Brix	°Bx	X		X	
6	Potencial de Hidrógeno	pH	X		X	
7	Color	UI		X	X	
8	Turbidez	UI		X	x	

Fuente: elaboración propia.

### **3.2. Delimitación del campo de estudio**

El estudio se realizó únicamente para el proceso de clarificación de jugo de azúcar y de meladura, debido a que en esta etapa del proceso se hicieron las instalaciones de los equipos de sulfitación.

La investigación se realizó en el área de tratamiento de jugo del Ingenio La Unión S.A., específicamente en la sulfitación de jugo y meladura; evaluando la eficiencia de los sistemas empleados y analizando parámetros de operación como pH y remoción de color y turbidez en ambos sistemas.

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

- Investigador: Br. Danilo Romeo Castillo Mauricio
- Asesor: Inga. Qca. Claudia María Barrientos
- Operadores y encargados del área de tratamiento de jugo
- Analista de laboratorio

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

- Ingenio La Unión S.A.
- Laboratorio de Ingenio La Unión, S.A.

#### **3.4.1. Equipo y cristalería**

En la siguiente tabla se presentan los equipos y la cristalería utilizados en el desarrollo de la investigación:

Tabla V. **Equipo y cristalería que se utilizó para realización de fase experimental**

<b>EQUIPO</b>	<b>CRISTALERIA</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Descripción</b>	<b>Características</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Polarímetro</li> <li>▪ Refractómetro</li> <li>▪ Centrífuga</li> <li>▪ Potenciómetro</li> <li>▪ Agitador magnético</li> <li>▪ Balanza analítica</li> <li>▪ Cronómetro</li> <li>▪ Jar-Test</li> <li>▪ Mufla</li> <li>▪ Espectrofotómetro</li> <li>▪ Bomba de vacío</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Termómetro</li> <li>▪ <i>Beackers</i></li> <li>▪ Pipeta volumétrica</li> <li>▪ Balón <i>Kohlraush</i></li> <li>▪ Probetas</li> <li>▪ Tubos para centrifugas</li> <li>▪ <i>Earlenmeyer</i></li> <li>▪ Varillas de agitación</li> <li>▪ Picetas</li> <li>▪ Frasco de muestra</li> <li>▪ Embudo <i>Buschner</i></li> <li>▪ Kitasato</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>De -10°C a 140°C</li> <li>100 ml, 250 ml</li> <li>1, 5, 10, 25, 100ml</li> <li>250 ml</li> <li>100, 1 000 ml</li> <li>15 ml</li> <li>250 ml</li> <li>Plástico</li> <li>Plástico</li> <li>Plástico</li> <li>Porcelana</li> <li>250 ml</li> </ul>

Fuente: elaboración propia.

### **3.4.2. Reactivos**

En la siguiente tabla se describen los reactivos necesarios para la realización de las pruebas analíticas.

Tabla VI. **Reactivos que se utilizaron para realización de la fase experimental**

REACTIVO	ESPECIFICACIONES
Hidróxido de sodio (NaOH)	Concentración 0,1 N
Ácido clorhídrico (HCl)	Concentración 0,1 N
Ayuda filtrante	Tierra silíceo

Fuente: elaboración propia.

### 3.5. **Técnica de investigación cualitativa y cuantitativa**

La técnica de investigación es cuantitativa de tipo analítica ya que permite examinar los datos de forma numérica, y establece comparación de las variables al tratar de probar o negar una hipótesis.

- Determinación de pH en meladura (método 7):
  - Tomar 100 ml de meladura en beacker de 150 ml
  - Introducir el electrodo medidor de pH en la muestra
  - Reportar la lectura de pH que registra el equipo
  
- Determinación de grados Brix (Método 1123): se determinan grados Brix en la meladura, por el método refracto métrico, con el fin de conocer el estado del material en proceso.

- Método refractométrico: consiste en la variación del índice de refracción de un haz de luz, al atravesar una solución de azúcar, a la longitud de onda del sodio.
  - Pesar 150 g de muestra;
  - Disolver completamente en 450 g de agua (Dilución 1:3);
  - Preparar un embudo de filtración con aproximadamente 2 g de ayuda filtrante;
  - Adicionar aproximadamente 100 cm<sup>3</sup> de la solución a analizar;
  - Filtrar la solución y descartar los primeros cm<sup>3</sup> del filtrado;
  - Colocar en la unidad óptica del refractómetro, el jugo filtrado requerido para hacer la determinación;
  - Registrar el porcentaje de Brix que indica el refractómetro;
  - Multiplicar el valor por el factor de dilución;
  
- Determinación de sacarosa:
  - Preparar embudo de filtración;
  - Tomar aproximadamente 150 ml de la dilución preparada para la determinación de Brix, en un envase con tapa;
  - Adicionar 0,5 g de cal 1,5 g de sulfato de Mg y 2,0 g de ayuda filtrante;
  - Agitar vigorosamente;
  - Colectar aproximadamente 100 ml de material filtrado claro;
  - Calibrar a cero el polarímetro, utilizando agua destilada;
  - Purgar el tubo de polarizar con aproximadamente 40 ml de material filtrado;
  - Adicionar el resto de material filtrado en el tubo para efectuar la lectura;

- Registrar el valor obtenido;
- Ensayo para determinar el color (método ICUMSA)

Este análisis es empleado para controlar a nivel de proceso en planta las variables que influyen directamente en el color del producto final, ya que entre mejor sea el manejo de la meladura en proceso, mejor serán los resultados y se tendrá un azúcar más blanca.

- Pesar 30 +/- 0.1 g de azúcar crudo y agregarles 70 +/- 0.1 g de agua destilada, si ocurre problemas con el filtrado se puede preparar la solución con 10 +/- 0.1 g de azúcar y 90 +/- 0.1 g de agua destilada;
- Colocar la solución en una plancha de agitación magnética hasta disolver el azúcar A la solución ajustar el pH a  $7.0 \pm 0.1$  con NaOH o HCl 0.1 N;
- Filtrar la solución con un filtro millipore; usando la bomba de vacío; si es necesario, agregar a la solución 1 gramo de ayuda filtrante,
- Ajustar el pH a  $7.0 \pm 0.1$  agregando solución de ácido clorhídrico 0.1 M o hidróxido de sodio 0.1 M. Agitar la solución continuamente hasta 6.95 luego dejar en reposo por aproximadamente 2 minutos;
- Colocar la solución en un baño ultrasónico por 3 minutos;
- Leer en el refractómetro la cantidad de sólidos solubles, Brix, anotar el dato;

- Encender el espectrofotómetro y seleccionar el modo de absorbancia, cambiar la longitud de onda a 420 nm;
- Llenar una celda de 10 mm con agua destilada filtrada (la cual debe colocarse en el baño ultrasónico al igual que la muestra) y colocar en cero el equipo. Llenar nuevamente la celda con la solución y leer la absorbancia;

Se obtiene el color de la muestra mediante la siguiente fórmula

$$\text{Color ICUMSA (UI)} = \frac{\text{Absorbancia} * 100000}{\text{Brix} * 1 * \text{densidad}}$$

Nota: las características de receptibilidad para análisis de azúcares crudos de 500 a 2000 unidades de color, no deben exceder una diferencia de 110 unidades, y en condiciones de reproducibilidad; la diferencia para una misma muestra no debe ser mayor de 380 unidades.

- Ensayo para determinar la turbiedad de la meladura:
  - Se obtiene la turbiedad de la muestra mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Turbiedad} = \frac{(A_1 - A_2) * 1000}{b * c}$$

Donde:

- $A_1$  = Absorbancia de la muestra sin filtrar
- $A_2$  = Absorbancia de la muestra filtrada
- $b$  = Longitud de la celda en cm
- $c$  = Concentración de la solución en g/cc

- Pol (sacarosa aparente, método GS1/2/3/9-1 (2009)):
  - Pesar en una cápsula  $26.9 \pm 0,002$  g de azúcar y agregarlos a un balón, realizar tres lavados con agua destilada;
  - Añadir al balón agua destilada hasta un volumen de 65 – 70 ml y disolver manual o mecánicamente. Verificar que se disuelva el azúcar completamente;
  - Agregar a la solución de 3 a 5 espátulas de tierra filtrante u octapol activado, aproximadamente 1 a 2 g para azúcar de polarización menor de  $99.3^{\circ}\text{Z}$  y para polarización arriba de  $99.3^{\circ}\text{Z}$ , mezclar con agitación leve;
  - Luego completar el volumen del bulbo del balón, con agua destilada, mezclar con agitación leve y permitir que la solución se enfríe (dejar aproximadamente 2 minutos de reposo);
  - Aforar, asegurarse de que todo el cuello esté lavado, cuidar que ninguna burbuja de aire esté atrapada;
  - Sellar el balón con un tapón limpio, seco y agitar vigorosamente;
  - Dejar la solución por lo menos 2 minutos en reposo para asentar el precipitado. Filtrar la solución utilizando un único papel filtro, descartar los primeros ml de filtrado, luego recolectar un volumen aproximado de 50 a 60 ml;

- Enjuagar el tubo con la solución y descartar. Llenar el tubo de polarizar nuevamente (evitar la formación de burbujas), colocarlo en el polarímetro y esperar que se estabilice la lectura y anotar.
- Determinación de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en miel virgen:

Este método fue empleado únicamente en la meladura sometida a sulfitación y fue tratada bajo las mismas condiciones que la miel virgen, puesto que el material daba esa posibilidad por su naturaleza.

- Homogeneizar la muestra mediante agitación;
- Pesar 20 g en un beacker de 100 ml;
- Adicionar 50 ml de agua destilada;
- Agitar hasta homogenizar la muestra;
- Transvasar la solución a un balón volumétrico de 100 ml, con la ayuda de un embudo de vidrio;
- Enjuagar el *beacker* de 100 ml con agua destilada, y transferir los lavados al balón volumétrico;
- Llevar hasta la marca de 100 ml el balón volumétrico, adicionando agua destilada y agitando periódicamente;
- Pipetear 10 ml de la solución anterior, a una cápsula de porcelana de 50 ml;
- Adicionar 2,5 ml de Ácido clorhídrico 1:1;
- Adicionar 5 ml de solución indicadora de almidón 1%;
- Titular con solución de yoduro yodato de potasio 0,0125 N, hasta aparición de un color azul permanente;
- Registrar los ml de solución de yoduro yodato de potasio 0,0125 N, consumidos en la titulación;

Calcular el porcentaje de SO<sub>2</sub> de la siguiente manera:

$$\% \text{SO}_2 = \frac{V * N * 32}{40}$$

Donde:

V = Volumen en mililitros de solución de yoduro yodato de potasio 0,0125 N, consumidos en la titulación

N = Normalidad del yoduro yodato de potasio

Constantes = 32 y 40

### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

Antes de iniciar el proceso de análisis, se tomarán las muestras a las cuales se les aplicará el método para obtener el resultado deseado. Esto se lleva a cabo en cada subproceso definido con una toma directa de las mismas.

En la sulfitación de jugo, se tomarán muestras en la línea de entrada de jugo y de salida del jugo sulfitado. Para el subproceso de tratamiento de meladura se realizará un análisis de pH, antes de ser sulfitado y después de la clarificación de meladura.

A partir de este paso se dará inicio al análisis de las muestra dentro de las instalaciones del ingenio, tomando en cuenta las temperaturas y tiempos. Una vez obtenidos los datos se recolectarán en tablas para establecer el comportamiento del color en el azúcar final según las condiciones en las que se esté trabajando en el proceso; asimismo, se tendrá la información necesaria obtenida con mediciones paralelas recolectadas por el área de laboratorio y

comparadas con los datos que reflejen los instrumentos de medición respectivos en la manipulación dentro del proceso.

### **3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de datos**

Una vez obtenidos los datos implicados en la sulfitación de ambos procesos se graficaron los valores para los rangos establecidos en el tiempo de muestreo y de esta manera poder establecer un comportamiento; así se mejora el análisis de los resultados.

### **3.8. Análisis estadístico**

El análisis estadístico para esta etapa se basa en el análisis de varianza y desviación estándar. El diseño de investigación busca probar una hipótesis a través de una comparación simple.

### **3.9. Plan de análisis de resultados**

El plan de análisis de resultados que mejor se adecua a la investigación es:

#### **3.9.1. Métodos y modelos de análisis**

Para el análisis de los datos recolectados, se utilizarán métodos y modelos estadísticos:

### **3.9.1.1. Determinación de media para datos de muestreo**

Para mejorar el análisis de datos se utilizó la media para determinar el valor de pH, color y Brix; a partir de estos valores se hizo el análisis completo de los resultados.

La media aritmética, también conocida como promedio, de un conjunto finito de números, es igual a la suma de todos sus valores, dividida entre el número de sumandos.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} = \frac{a_1 + \dots + a_n}{n}$$

Expresada de forma más intuitiva, se puede decir que la media es la cantidad total de la variable, distribuida en partes iguales entre cada observación.

En la tabla VI y VII se presentan los valores de las medias calculadas para las variables en la sulfitación de jugo y meladura, estos valores fueron los utilizados para figuras y análisis de resultados.

### **3.9.1.2. Determinación de errores de muestreo**

Para un mejor análisis de resultados se utilizó el análisis de dispersión de datos ya que las medidas de dispersión permiten retractar la distancia de los valores de la variable a un cierto valor central, o que permiten identificar la concentración de los datos en un cierto sector del recorrido de la variable.

El término precisión se utiliza para describir qué tan reproducibles son las mediciones; es decir, qué tan semejantes son los resultados con los otros obtenidos exactamente en la misma forma y en las mismas condiciones. Para describir la precisión de un conjunto de datos repetidos se utilizan tres términos muy conocidos: la desviación estándar, la varianza y el coeficiente de variación.

#### **3.9.1.2.1. Varianza**

Permite identificar la diferencia promedio que hay entre cada uno de los valores respecto de su punto central (media). Este promedio es calculado, elevando cada una de las diferencias al cuadrado, y calculando su promedio o media; y dividiendo este resultado por el número de observaciones que se tengan.

A continuación su forma de cálculo para una muestra:

$$s^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{X})^2}{n - 1}$$

En este caso, se determinó varianza para valores de color, al ser estos las variables de análisis que permiten identificar el comportamiento de la reducción de color en el proceso de sulfitación. Como lo demuestra la tabla X.

#### **3.9.1.2.2. Desviación estándar**

Esta medida permite determinar el promedio aritmético de fluctuación de los datos respecto de la media. La desviación estándar da como resultado un valor numérico que representa el promedio de diferencia que hay entre los

datos y la media. Para calcular la desviación estándar basta con hallar la raíz cuadrada de la varianza, por lo tanto la ecuación es:

$$s = \frac{\sum(x_i - \bar{X})^2}{n - 1} = \sqrt{S^2}$$

De la misma manera que para la varianza, el análisis de desviación se realizó únicamente para valores de color, que se encuentran en la tabla VII.

Tabla VII. **Media aritmética, varianza y desviación estándar para los parámetros de la sulfitación de meladura**

<b>Variable</b>	<b>Media aritmética (<math>\bar{x}</math>)</b>	<b>Varianza (<math>\sigma^2</math>)</b>	<b>Desviación estándar (<math>\sigma</math>)</b>
Color meladura sin clarificar	15 747,91	2 732 493,75	1 653,03
Turbidez meladura sin clarificar	6 999,68	2 048 546,21	1 431,27
Color meladura clarificada	15 495,15	3 045 357,83	1 745,10
Turbidez meladura clarificada	2 853,72	474 773,09	689,04
Color azúcar final	1 103,67	60 491,66	245,95

Fuente: elaboración propia, datos calculados.

Tabla VIII. **Media aritmética, varianza y desviación estándar para los parámetros de la sulfitación de jugo**

<b>Variable</b>	<b>Media Aritmética (<math>\bar{x}</math>)</b>	<b>Varianza (<math>\sigma^2</math>)</b>	<b>Desviación estándar (<math>\sigma</math>)</b>
Pol jugo claro	11,53 %	1,39	1,18
Pureza jugo claro	84,95 %	0,35	0,59
pH jugo sulfitado	4,53	0,03	0,16
pH jugo alcalizado	7,53	0,05	0,23
pH jugo claro	6,91	0,02	0,12
Diferencial de pH jugo línea de blanco	0,62	0,01	0,10
Diferencial de pH jugo línea de crudo	0,61	0,03	0,19
Brix jugo claro línea de crudo	13,57 °Brix	1,88	1,37
Sulfitos jugo sulfitado	457,52 ppm	17 462,33	132,15
Turbidez jugo claro	16,83 UI	14,89	3,86

Fuente: elaboración propia, datos calculados.

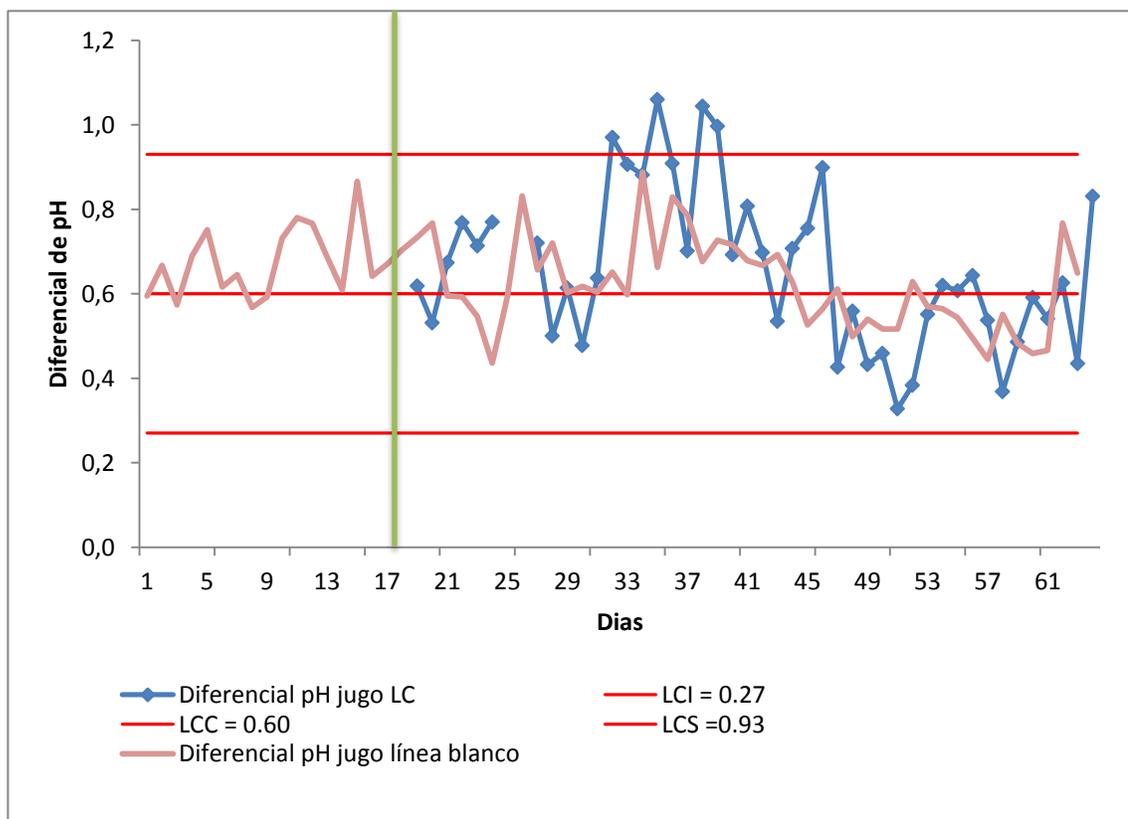


## 4. RESULTADOS

### 4.1. Sulfitación de jugo

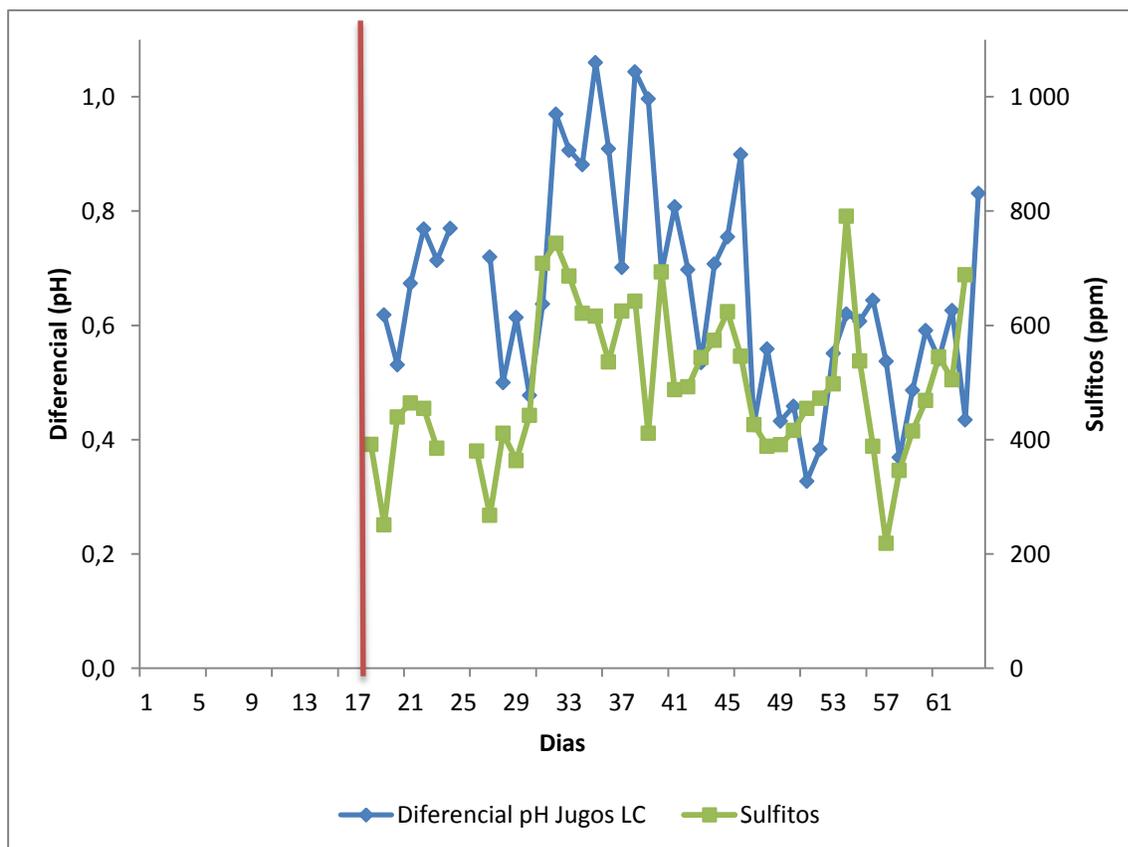
A continuación se presentan los resultados para la sulfitación de jugo.

Figura 6. **Comportamiento del diferencial de pH en la línea de jugo crudo**



Fuente: elaboración propia, datos calculados.

Figura 7. **Comportamiento del diferencial de pH y sulfitos en el jugo mezclado**



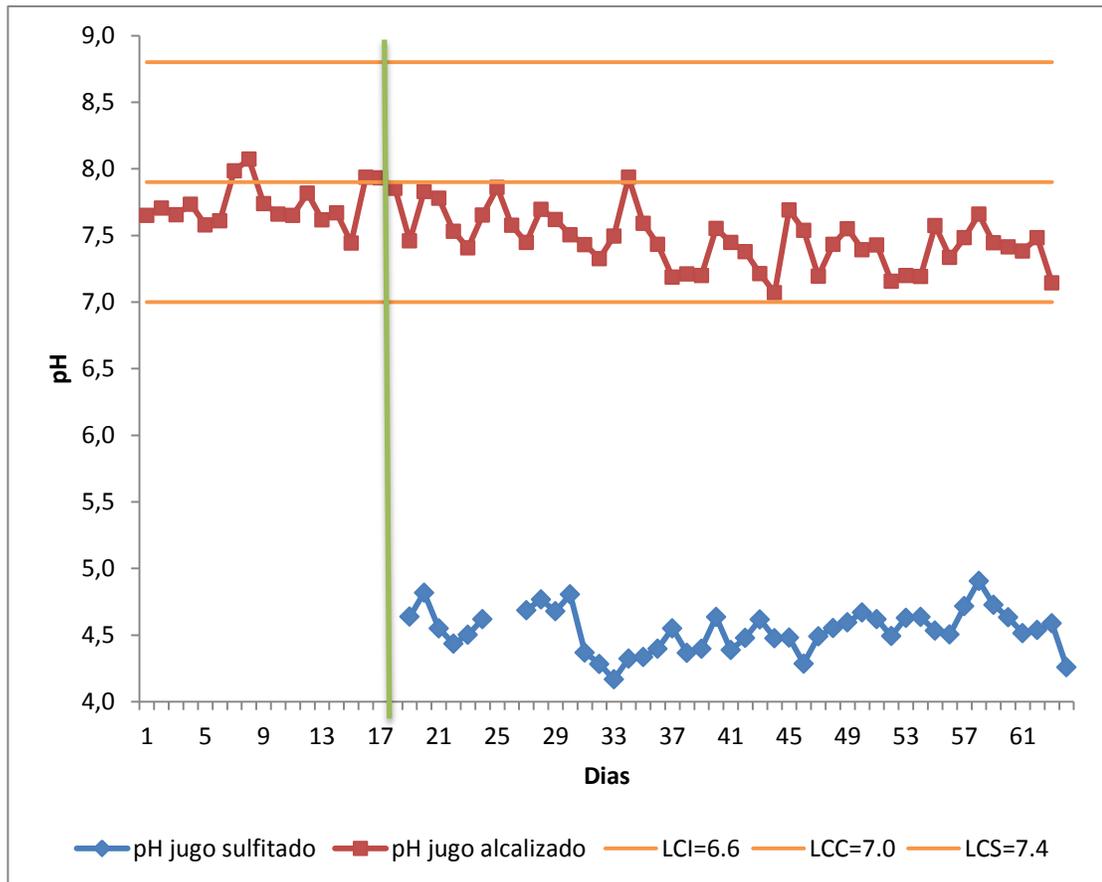
Fuente: elaboración propia, datos calculados.

Tabla IX. **Valores promedio de jugo alcalizado y jugo sulfitado**

Diferencial de pH	Sulfitos (ppm)
0,66	494,48

Fuente: elaboración propia, datos calculados.

Figura 8. Comportamiento de pH del jugo sulfitado contra el pH de jugo alcalizado



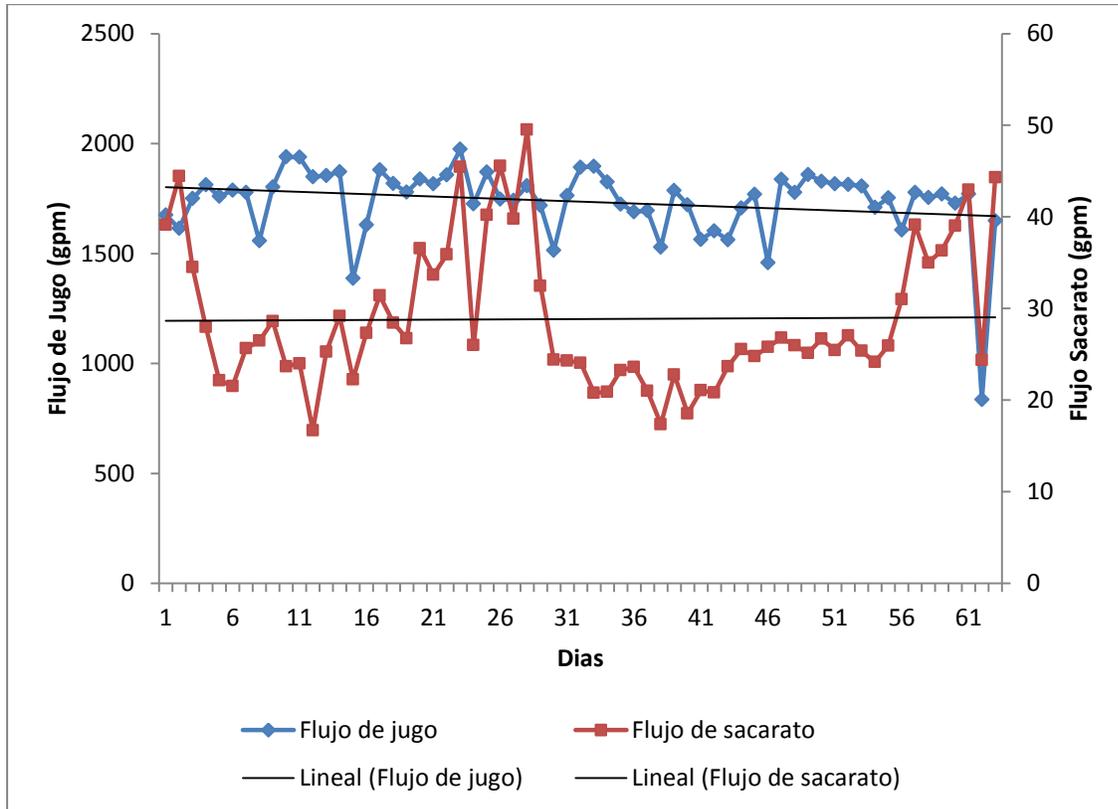
Fuente: elaboración propia., datos calculados.

Tabla X. Valores promedio de pH de jugo alcalizado y jugo sulfitado

Jugo alcalizado	Jugo sulfitado
7,54	4,54

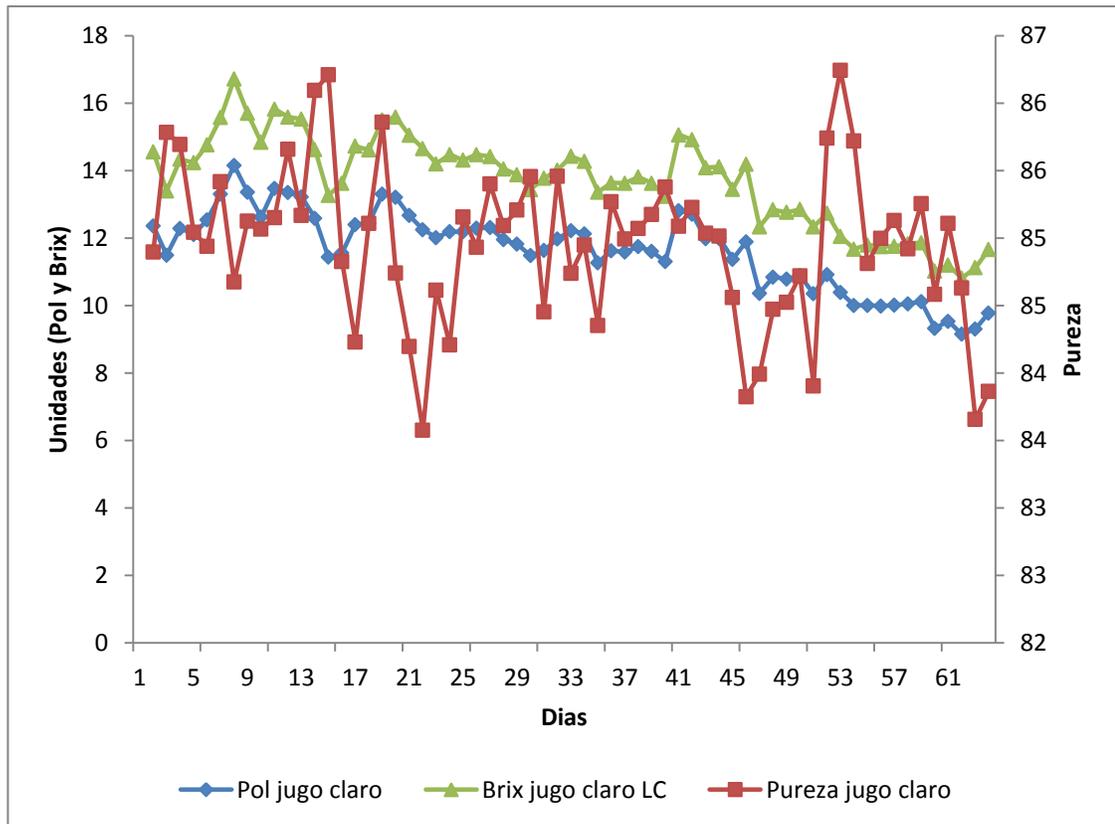
Fuente: elaboración propia, datos calculados.

Figura 9. **Relación entre el flujo de jugo total contra el flujo de sacarato necesario para el control de pH en el proceso de sulfitación de jugo**



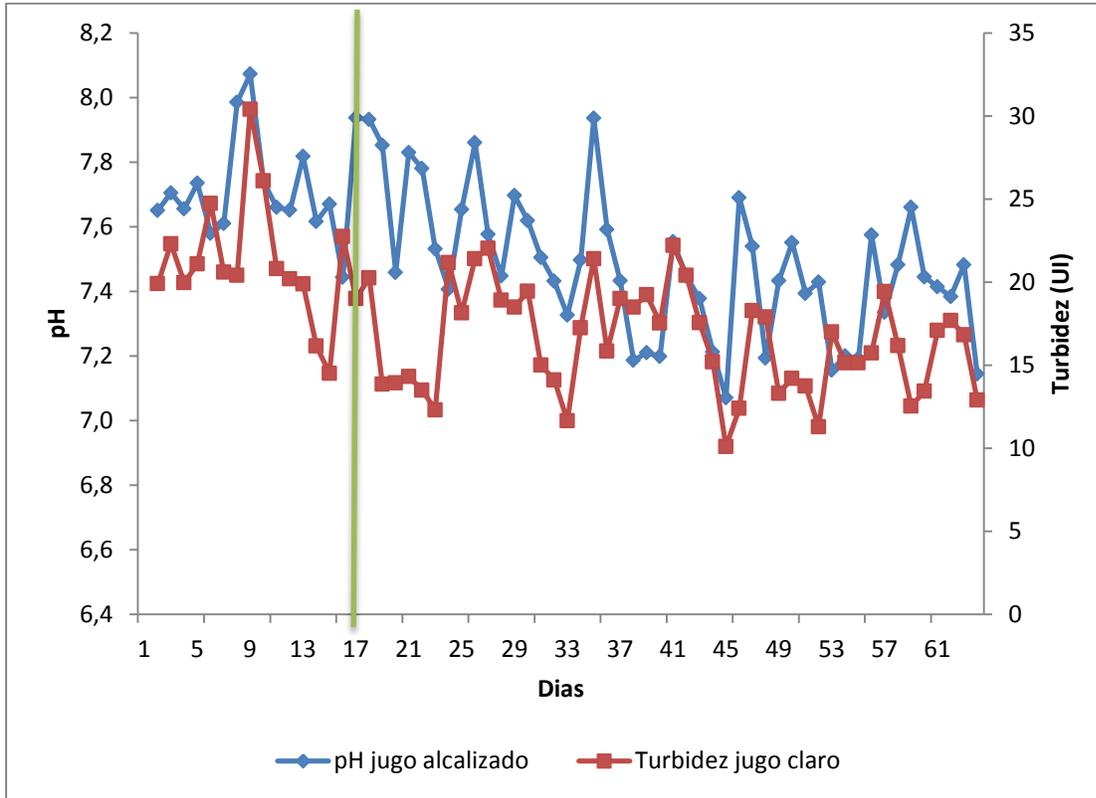
Fuente: elaboración propia, datos calculados.

Figura 10. Evaluación de Pol, °Brix y pureza del jugo clarificado después de la sulfitación



Fuente: elaboración propia, datos calculados.

Figura 11. Comportamiento de la turbidez y pH del jugo clarificado



Fuente: elaboración propia, datos calculados.

Tabla XI. Valores promedio de pH de jugo alcalizado y turbidez jugo claro

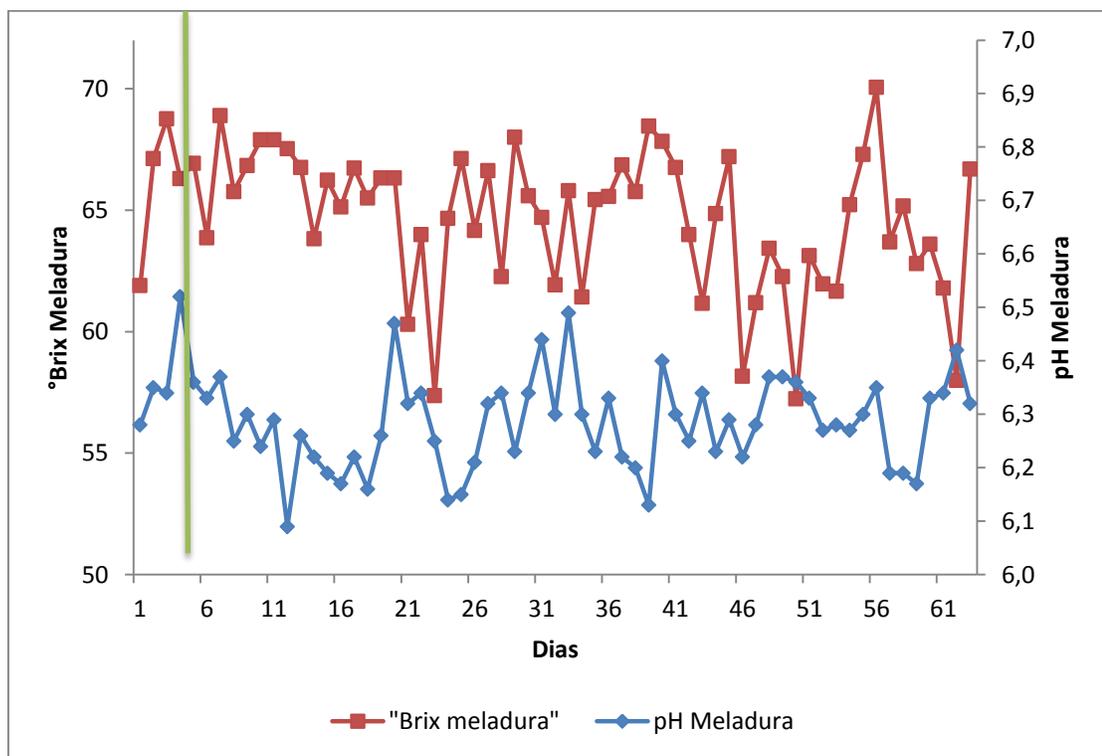
pH jugo alcalizado	Turbidez jugo claro
7,54	17,65

Fuente: elaboración propia, datos calculados.

## 4.2. Sulfitación de meladura

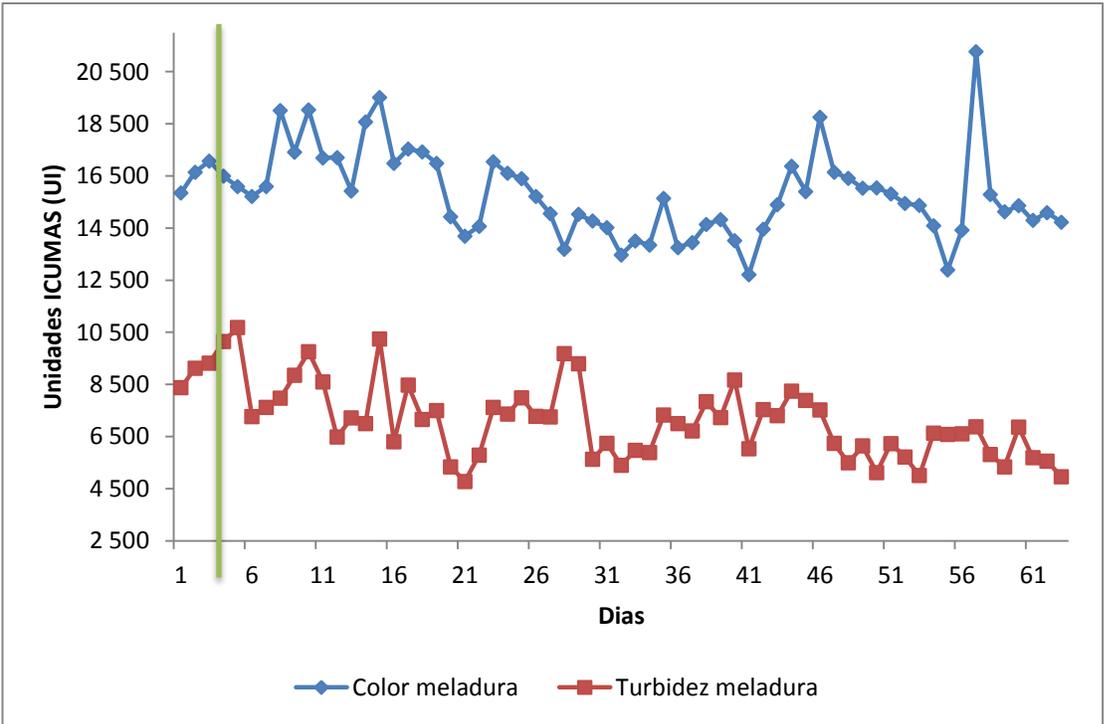
Los resultados de la sulfitación de meladura se presentan a continuación:

Figura 12. Comportamiento del pH de meladura y el °Brix de meladura no tratada



Fuente: elaboración propia, datos calculados.

Figura 13. Evaluación de color y turbidez en meladura no tratada



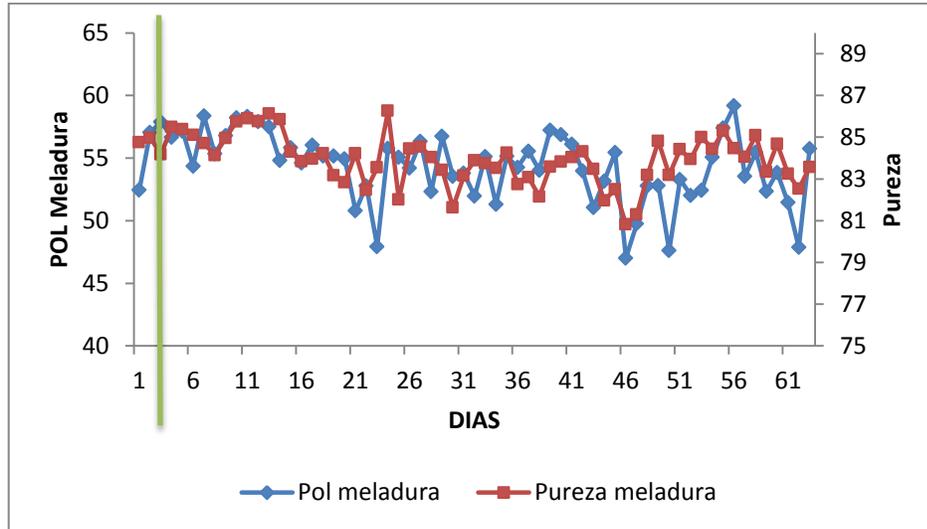
Fuente: elaboración propia, datos calculados.

Tabla XII. Valor promedio de color de meladura

Color meladura no tratada (UI)
15 829,73

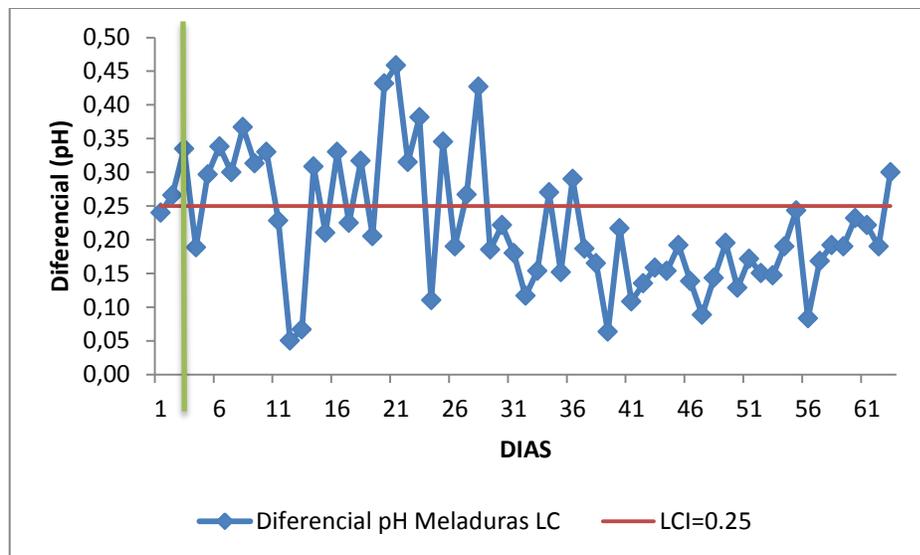
Fuente: elaboración propia, datos calculados.

Figura 14. Evaluación de Pol y pureza de meladura no tratada



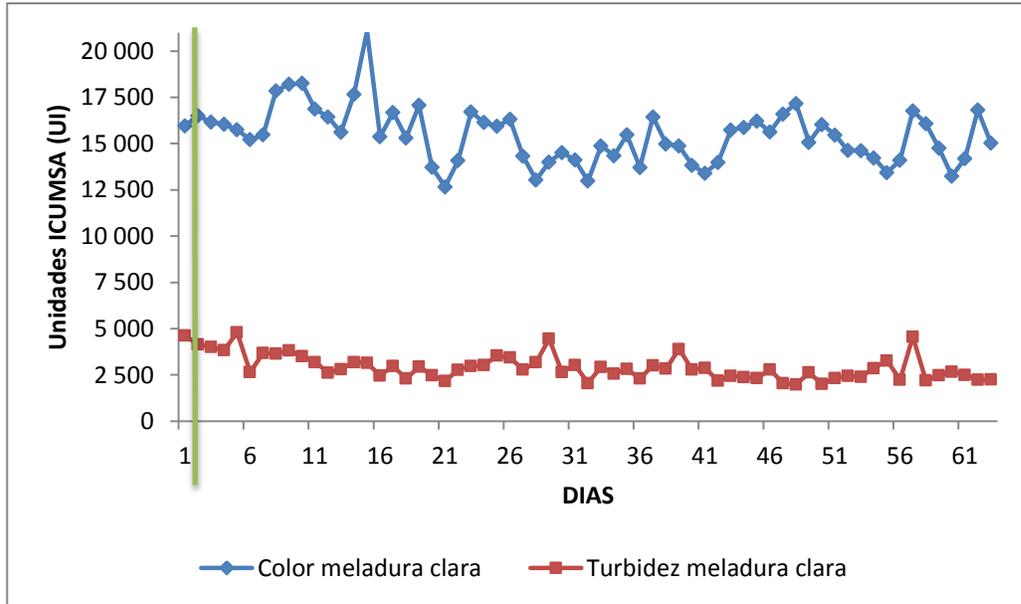
Fuente: elaboración propia, datos calculados.

Figura 15. Diferencial de pH de meladura



Fuente: elaboración propia, datos calculados.

Figura 16. **Comportamiento del color de meladura con relación a la turbidez en la meladura clarificada**



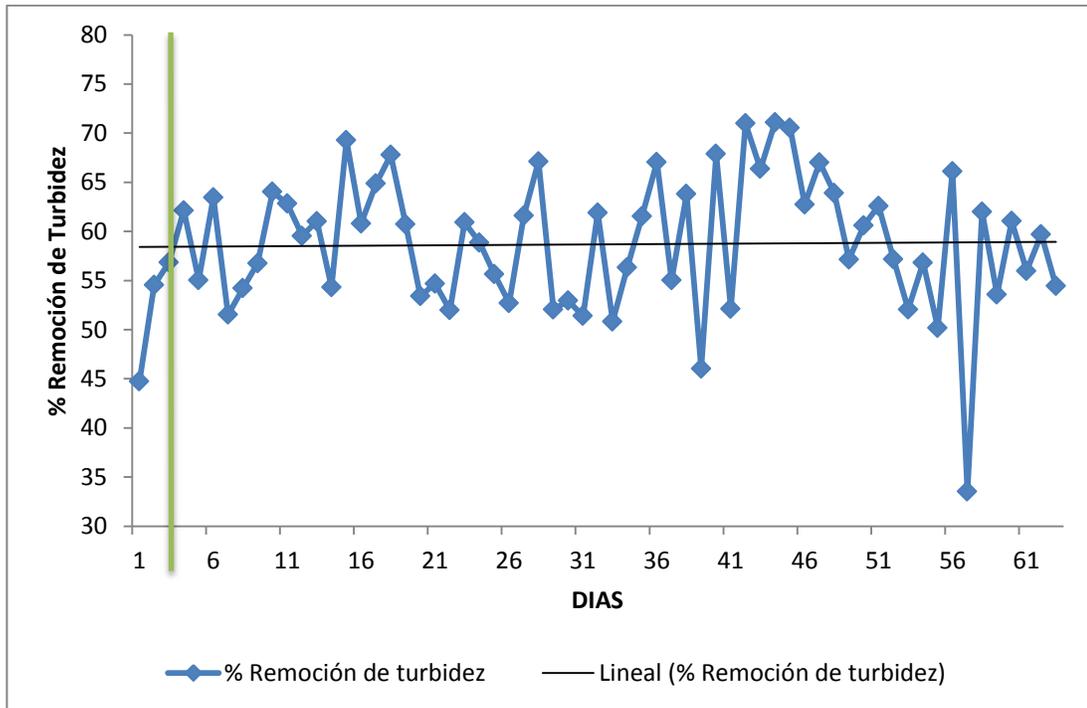
Fuente: elaboración propia, datos calculados.

Tabla XIII. **Promedio de color de meladura**

Promedio color meladura antes de sulfitación	Promedio color meladura después de la sulfitación
16 171,81	15 410,26

Fuente: elaboración propia, datos calculados.

Figura 17. Evaluación del % de remoción de turbidez



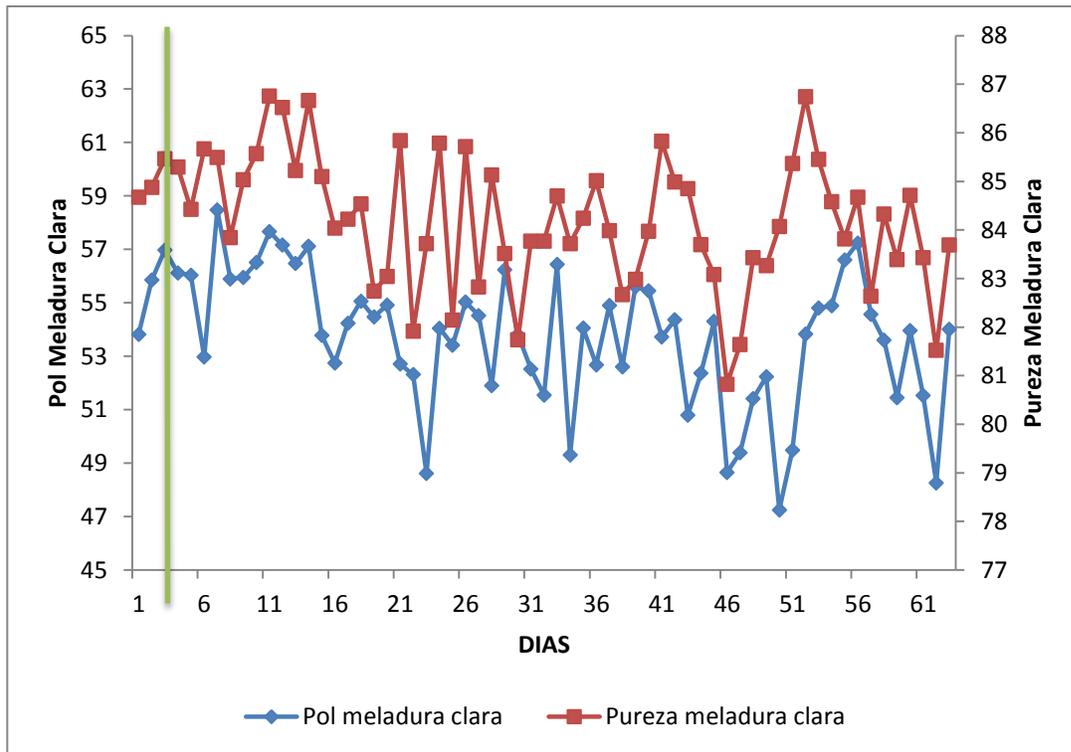
Fuente: elaboración propia, datos calculados.

Tabla XIV. Promedio del porcentaje de remoción de turbidez

<b>Promedio del porcentaje de remoción de turbidez</b>
58,67 %

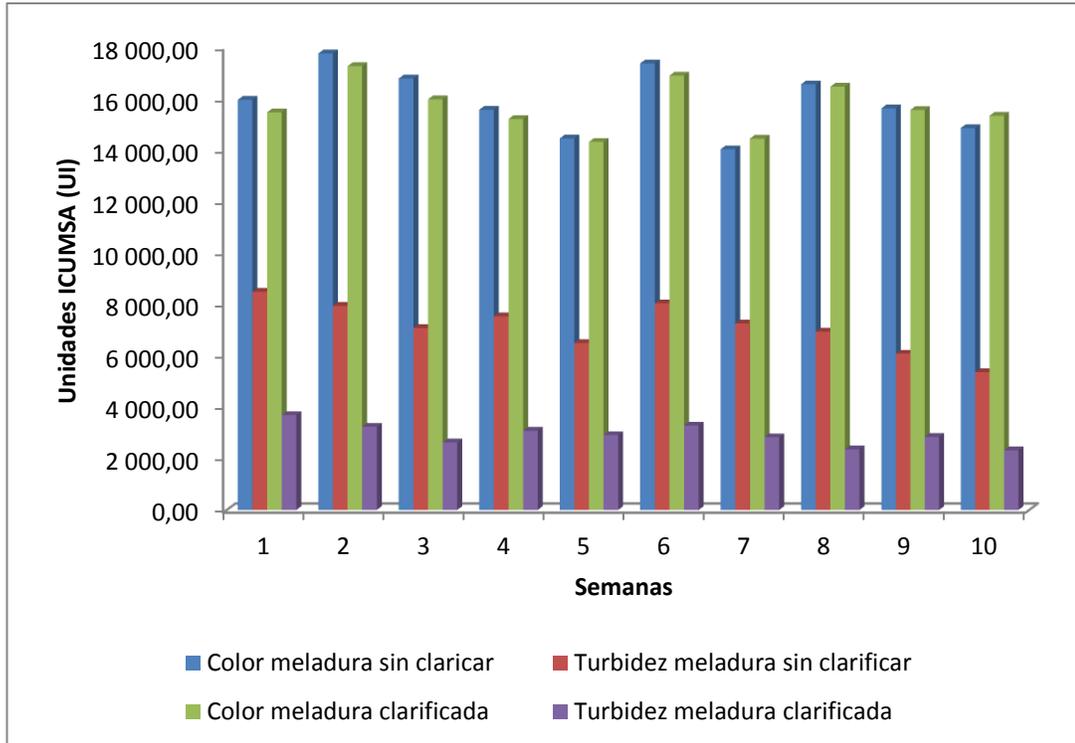
Fuente: elaboración propia, datos calculados.

Figura 18. **Comportamiento del Pol y pureza de la meladura clarificada durante el proceso de sulfitación**



Fuente: elaboración propia, datos calculados.

Figura 19. **Análisis de color y turbidez entre la meladura sin clarificar y la meladura clarificada**



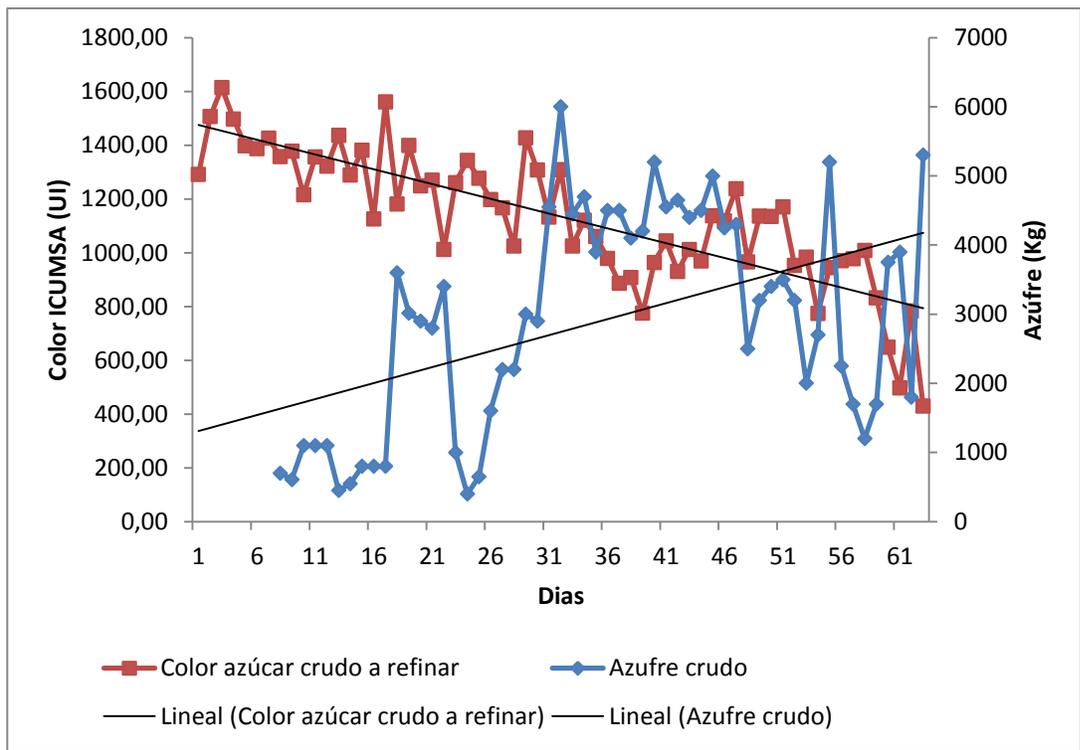
Fuente: elaboración propia, datos calculados.

Tabla XV. **Valores promedio de color y turbidez de meladura (UI)**

Color meladura sin clarificar	Color meladura clarificada	Diferencia	Turbidez meladura sin clarificar	Turbidez meladura clarificada	Diferencia
15 908,16	15 706,72	<b>201,44</b>	7 155,77	2 936,88	<b>4 218,89</b>

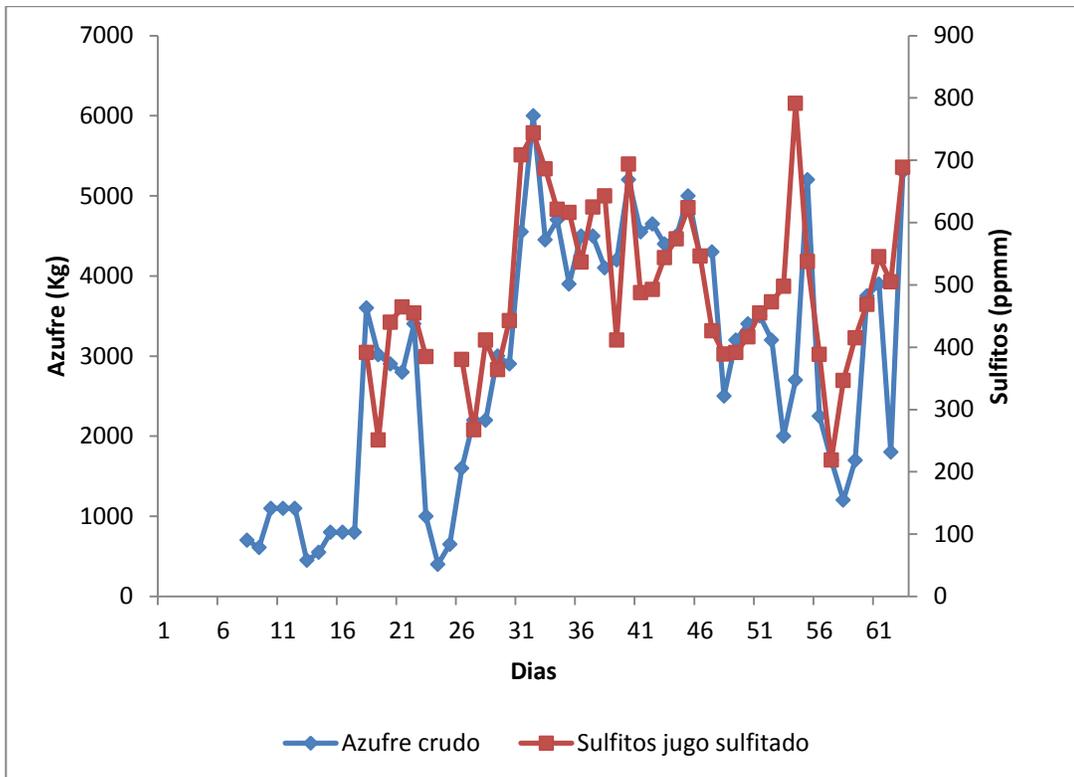
Fuente: elaboración propia, datos calculados.

Figura 20. **Evaluación de la sulfitación contra el color de azúcar crudo al proceso de disolución en refinería**



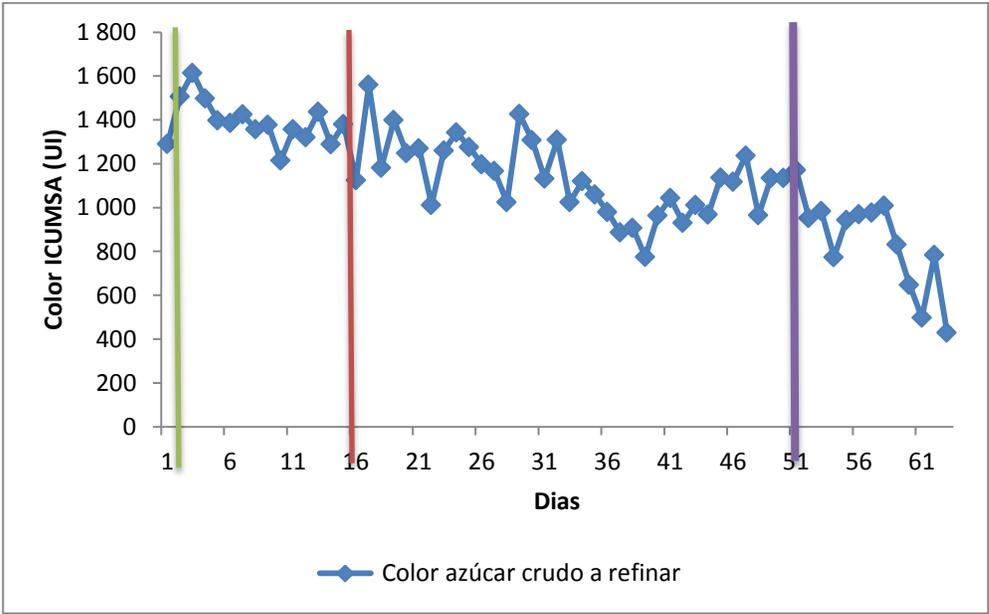
Fuente: elaboración propia, datos calculados.

Figura 21. Evaluación de la cantidad de azufre (lb) contra la concentración de sulfitos (ppm), durante el proceso de sulfitación de jugo



Fuente: elaboración propia, datos calculados.

Figura 22. **Evaluación de los procesos de sulfitación en relación con el color de azúcar crudo al proceso de disolución en refinería**



Fuente: elaboración propia, catos calculados.

Tabla XVI. **Valores promedio de color de azúcar, producto de los métodos de sulfitación en cada etapa de inicio de operación**

Color de azúcar en sulfitación de meladura (UI)	Color de azúcar en sulfitación de jugo (UI)	Color de azúcar enviada al proceso de disolución en refinería (UI)
1 445,6	1 166,75	816,83

Fuente: elaboración propia, datos calculados.

Tabla XVII. **Parámetros de evaluación de los procesos de sulfitación de jugo y meladura**

<b>Parámetros de Evaluación</b>	<b>Proceso de sulfitación de jugo</b>	<b>Proceso de sulfitación de meladura</b>
<b>Toxicidad</b>	SO <sub>2</sub> Irritante en concentraciones > 3 ppm	SO <sub>2</sub> Irritante en concentraciones > 3 ppm
<b>Seguridad</b>	Debe ser cuidadosamente manejado. Los vapores son irritantes y el calor del horno es muy alto	Debe ser cuidadosamente manejado. Los vapores son irritantes y el calor del horno es muy alto
<b>Estabilidad</b>	Gas estable. Al contacto con humedad permite la formación de ácido sulfúrico.	Gas estable. Al contacto con humedad permite la formación de ácido sulfúrico.
<b>Contaminación</b>	El equipo no es totalmente aislado generando vapores, una cantidad pequeña es liberada a la atmósfera como residuo	El equipo no es totalmente aislado generando vapores, una cantidad pequeña es liberada a la atmósfera como residuo
<b>Aplicación</b>	El jugo es bombeado en contracorriente dentro de una torre de sulfitación	La meladura es bombeada dentro de un sistema de eyectores a presión.
<b>Tipo de montaje</b>	Tolva de azufre, horno rotatorio, cámara de sublimación, columnas de enfriamiento, torre de sulfitación.	Tolva de azufre, horno rotatorio, cámara de sublimación, columnas de enfriamiento, eyectores de mezcla a presión.

Fuente: elaboración propia.



## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El objetivo principal de la prueba realizada en la planta de elaboración de azúcar del Ingenio La Unión S.A., fue determinar la efectividad de los procesos de sulfitación que se relacionan directamente con la reducción de color en el jugo y meladura contra el color de azúcar final.

Para tal fin se realizó, a lo largo de 2 meses, un análisis para determinar la cantidad de color removido mediante los métodos de sulfitación de jugo y de meladura. La sulfitación de meladura fue la primera etapa en entrar a operación al día 8 de muestreo, mientras que la sulfitación de jugo empezó el día 18; ambas se denotan por líneas verticales en cada figura.

De esta manera se obtuvieron valores a lo largo del tiempo que demostraron las variaciones que se pueden presentar en los resultados, ya que el material, el jugo y la meladura, no presentan características exactamente iguales diariamente. El proceso se ve afectado desde la calidad de la tierra donde crece la caña, el clima de la zona y posteriormente el proceso de corte, levante y transporte, y se refleja en los parámetros el jugo de la caña como rendimiento de sacarosa, acidez y contenido de sustancias coloreadas.

En la figura 6 se presenta el gráfico del comportamiento del diferencial de pH en la línea de jugo crudo sulfitado con base en los parámetros de referencia que se manejan para el diferencial de pH en la línea de blanco; se puede observar el parecido entre los dos comportamientos; el diferencial de pH es una medida indirecta de la concentración de sulfitos en ppm en el jugo, los parámetros en que se controla el diferencial de pH es 0,027 el límite inferior y

0.93 el límite superior, con un valor ideal de 0.6. Para el proceso estudiado, la tendencia del diferencial tiende a disminuir presentando varios valores altos, los cuales son de esperarse para un sistema nuevo, evaluando el comportamiento del mismo en todo el proceso.

En la figura 7 se presenta el comportamiento del diferencial de pH y la concentración de sulfitos presentes en el jugo mezclado (crudo) en el proceso de sulfitación, el dióxido de azufre es un gas tóxico y existen trazas residuales de azufre en los productos alimenticios en los que está sujeto el tratamiento de sulfitación durante la fabricación de los mismos y que pueden ser dañinos para la salud humana; por lo tanto el  $\text{SO}_2$  está restringido para la industria alimenticia.

En el proceso de sulfitación, el uso del quemador de azufre es difícil ya que causa  $\text{SO}_2$  tóxico que es liberado a la atmósfera, dando lugar a una grave contaminación al medio ambiente, debido a que este gas de efecto invernadero, también puede crear problemas para el estado sanitario de los trabajadores que manipulan los quemadores de azufre.

El dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), se utiliza por primera vez en el tratamiento de jugo ayudando en el proceso de clarificación; después se utiliza en el tratamiento de meladura; este último tratamiento se aplica para reducir la viscosidad del jarabe/masa cocida y mejorar el agotamiento de melaza; también reduce el pH a valores de 5.5 o menos, dependiendo de la cantidad de  $\text{SO}_2$  que se utilice; por lo tanto, el proceso de cristalización se lleva a cabo en un ambiente ácido, que a la vez, favorece la inversión de sacarosa, afectando en la recuperación de la misma.

La cantidad de azufre en el azúcar producido en los ingenios es de 15 ppm (el nivel más alto permitido), pero puede ser superior a 25 ppm en el azúcar producido. Este comportamiento se comprueba a través de las figuras 8, 12 y 15, donde se grafica el comportamiento del pH del jugo sulfitado; en la figura 12 el pH de meladura y el Brix de meladura sulfitada, denotando una disminución del pH conforme el transcurso del proceso de sulfitación y en la figura 15 demuestra el comportamiento del diferencial de pH de la meladura sulfitada, ya descrito anteriormente; posee relación muy aproximada con la concentración de sulfitos presentes en la meladura.

En la figura 8, se presenta el gráfico del pH del sulfitado y alcalizado, también el límite inferior, óptimo y superior en los que se maneja el parámetro para el jugo alcalizado; al sulfitar el jugo crudo con promedio de pH 4,54 de jugo alcalizado decrece, llegando a un valor promedio de 7,54 debido a que en la sulfitación se acidifica el jugo; como consecuencia, se necesitaría más cal para llevar el pH a 7,0, parámetro ideal en el jugo alcalizado. El color de las sustancias presentes en el azúcar son afectadas en forma considerable por el pH, debido a que las estructuras resonantes de las sustancias absorben energía a 420 nm. y cambian según el valor de pH de la solución de azúcar.

La sulfitación de jugo disminuye levemente los parámetros de Pol, Brix y pureza en el jugo claro, dada la tendencia inicial, esto se demuestra en la figura 10. En la figura 11 se presenta la tendencia que posee el pH respecto de la turbidez del jugo claro; esto demuestra que la sulfitación de jugo reduce considerablemente la turbidez y por ende productos formadores de color.

En el análisis de sulfitación de meladura que se presenta en las figuras 13 y 16, se grafica la evaluación de color y turbidez en la meladura no clarificada y clarificada después de la sulfitación; en datos promedio, la

clarificación de meladura sin sulfitar es de 16 515,44 UI mientras que en promedio durante los días de muestreo posee un valor de 15 783,24 UI de color, reduciendo en aproximadamente 732,2 UI de color presente en meladura; además, se demuestra la tendencia a disminuir la turbidez en la meladura sulfitada. En la figura 12, se puede observar que la sulfitación de meladura no afecta en nada en los parámetros de Brix de meladura, ya que la sulfitación solo afecta al color de la misma y no a características de concentración de la sacarosa.

En el método de sulfitación de meladura, se puede observar que existe una disminución considerable en el color del material y turbidez del mismo, dando un valor promedio de color de 15 410 UI después de la sulfitación. El porcentaje de remoción de turbidez se mantuvo constante durante la aplicación del método con valor promedio de 59% aproximadamente, como se demuestra en las figura 13, 15 y 17. Al igual que en la sulfitación de jugo, en el proceso de sulfitación de meladura tampoco existe una variación considerable en los parámetros de Pol y pureza que puedan afectar en la producción de azúcar al aplicar la sulfitación continua, graficado en las figuras 14 y 18.

En la figura 19, se presenta un comparativo entre el color y turbidez antes de la clarificación con la sulfitación de meladura, contra el color y turbidez de la meladura después de la sulfitación, existiendo una leve disminución de remoción de color en el proceso, mientras que con la turbidez se remueve en promedio aproximadamente un 40% después del proceso de sulfitación.

Una mejor comparación de la reducción de color en el azúcar crudo a refinar y el azufre utilizado para los dos procesos de sulfitación, se presenta en la figura 20. En ella se incluyen los valores de la cantidad de libras de azufre utilizada en la línea de crudo y su relación directa con el color en el azúcar

aumentando la dosificación en el día 27 de operación; también se evaluó la concentración de sulfitos en el jugo con base en la cantidad de azufre, llegando a valores entre 400 y 800 ppm durante dicho aumento. Este comportamiento se comprueba en la figura 21 en donde se grafica la cantidad de azufre y la concentración de sulfitos en jugo sulfitado.

Dado que el objetivo de estudio radica en la evaluación de los procesos de sulfitación de jugo y de meladura, en la disminución de color en el azúcar crudo que alimenta a la disolución en la producción de azúcar refino, se analizó esta variable y su disminución en los días en que los tres procesos empezaron a operar, la sulfitación de meladura empezó el día 8 de prueba con valores manejados en el rango de 1 100 UI a 1 400 UI, mientras que la sulfitación de jugo dio inicio el día 18, disminuyendo considerablemente el color hasta valores de entre 1 200 UI máximos a valores de 800 UI mínimos. El proceso de refinación de azúcar empezó el día 53, para poder lograr la reducción de color a 400 UI, que es el valor estándar.

Para hacer eficiente la refinación de azúcar se necesitó otro método en la reducción de dicho color, como el aumento de lavados en centrifugas para la purga de azúcar final. Con ello se logró disminuir el color en valores considerables y mantenerse en un rango de entre 400 UI y 800 UI, a la vez implicó el aumento en jarabe para mieles de tercera. Este comportamiento se demuestra en la figura 22. Por lo tanto, el aumento de lavados en centrifugación se atribuye a otra variable fuera del campo de estudio.

La tabla XVII específica a grandes rasgos los parámetros de evaluación de cada uno de los dos procesos de sulfitación, tanto para la sulfitación de jugo como para la de meladura.



## CONCLUSIONES

1. Para la disminución de color de 400 UI en el azúcar crudo, no fue suficiente la aplicación de los sistemas de sulfitación para jugo y meladura ya que se necesitó de otros métodos como el aumento de lavados en la operación de centrifugas; esto permitió llegar a valores óptimos en el color de azúcar final.
2. La aplicación de los sistemas de sulfitación de jugo y de meladura solo afecta el parámetro del color sin tener algún efecto secundario en las demás características de calidad del material a trabajar como el porcentaje de Pol y el porcentaje de pureza de las mismas; azúcares de mayor pureza como el azúcar refinado tienen menor cambio en valor absoluto de unidades de color que azúcares de menor pureza, como el azúcar crudo.
3. El parámetro más afectado para el proceso de sulfitación de meladura fue el de turbidez, teniendo una remoción de casi el 60% en comparación con la turbidez de la meladura sin tratar.
4. En el Ingenio La Unión S.A. la mayor ventaja de la sulfitación continua es el buen resultado que ha dado el método a lo largo de los años. Aunque las desventajas continúen afectando, como incrustaciones en tuberías y calentadores, riesgo de exposición a vapores de azufre y emisiones de gases de  $\text{SO}_2$  a la atmósfera, el sistema ha sido parcialmente efectivo en el objetivo de remoción de color.

5. Debido a que la sulfitación de meladura por eyectores se realiza instantáneamente siendo el sistema muy compacto, esto aumenta la mezcla de  $\text{SO}_2$ /meladura, lo que proporciona una máxima reducción de color al mínimo consumo de azufre, y la eliminación de gases a la atmósfera.
6. La sulfitación de jugo y meladura maneja valores de pH relativamente bajos y no presenta riesgos de inversión de sacarosa y a su vez presentan menor color, ya que es directamente proporcional, pues a mayor valor de pH de la solución de sacarosa, mayor absorbancia y por ende mayor color.
7. Los métodos de sulfitación redujeron en gran medida la turbidez en la meladura.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar un estudio complementario para determinar otros factores que puedan ser afectados en la aplicación de los métodos de sulfitación que no se trataron en esta investigación, como un análisis de pH en agua condensada, ya que no se hace un análisis específico para dicha medición.
2. Se recomienda efectuar un análisis costo-beneficio respecto de los dos sistemas empleados en la sulfitación de jugo y meladura.
3. Al encontrarse una considerable reducción de color final en el azúcar crudo, se recomienda realizar una evaluación comparativa con el método actual en la sulfitación de la línea de blanco contra los sistemas empleados en la línea de crudo.
4. Al realizar análisis sobre muestras de jugo debe verificarse la temperatura de la muestra y ajustar según lo requiera el método a utilizar; esto permitirá una mayor confiabilidad y exactitud en los resultados.
5. Un análisis del contenido de cenizas en azúcar puede ser una ayuda al estudio del color del azúcar, ya que es un indicativo de presencia de miel en el cristal de azúcar y se tendrá más posibilidad de deterioro de color; un exceso de miel en el grano de azúcar facilita el desarrollo del color con el transcurso del tiempo.



## BIBLIOGRAFÍA

1. BIENAIMÉ, L; NIELSEN, B.C. *White sugar color in solution, comparison of laboratory and in-line methods*. Belgica: Proc. CITS Conference, Antwerp, 1985. 660 p.
2. CHEN, James C. P. *Manual del azúcar de caña*. 4a. ed. México: Noriega, 1994. 1,200 p.
3. DA SILVA, José O. *Sulfitación de jugo y meladura*. Brasil: Presentación Engenho Novo, 2010. 15 p.
2. EXPOGRANEL. *Método de análisis de laboratorio para azúcar*. Guatemala. EXPOGRANEL, 2004.
5. HONIG, Pieter. *Principios de tecnología azucarera*. Tomo 1. México: Continental, 1969. 1,595 p.
6. ICONTEC. *Norma técnica colombiana NTC 607*. Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2009. 16 p.
7. JOHNSON, Robert. *Estadística elemental*. México: Trillas, 1984, 515 p.
8. REIN, Peter. *Cane sugar engineering*. Berlín: Verlag Albert Bartens KG, 2007. 768 p.

9. SPENCER, Meade. *Manual del azúcar de caña*. 9a. ed. España: Limusa 1967. 530 p.
10. VERLAG, Albert KG. *ICUMSA Methods book*. Berlín: Bartens, 2005. 388 p.

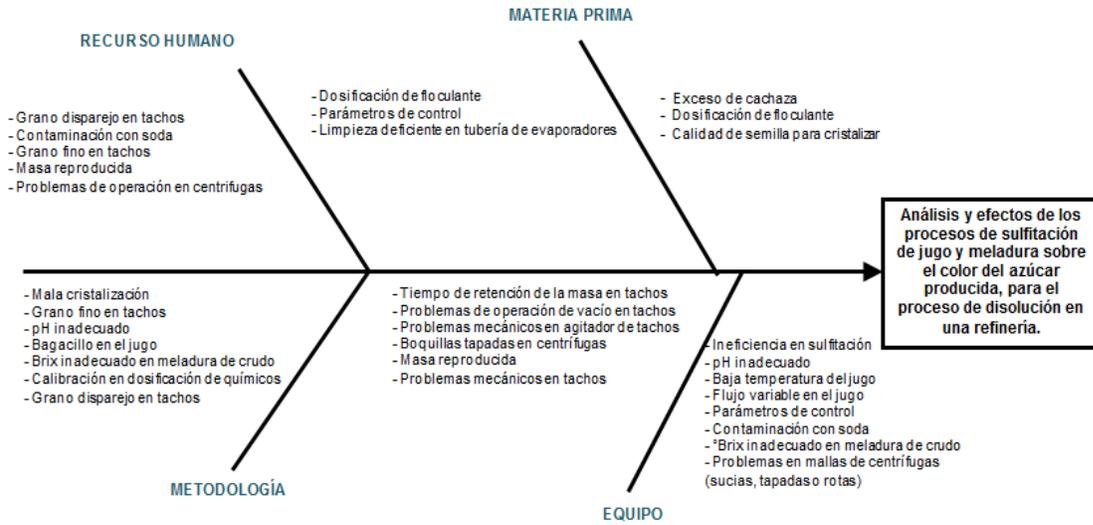
# APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**

PASO 1	PASO 2	PASO 3	PASO 4	PASO 5	PASO 6	PASO 7	
Carrera	Área	Tema genérico	Tema específico	Especificación	Problema a resolver	Temas tentativos	
<b>Licenciatura en Ingeniería Química</b>	QUIMICA	Análisis instrumental	Métodos analíticos clásicos y volumétricos	Análisis de laboratorio	<b>Análisis y efectos de los procesos de sulfitación de jugo y de meladura sobre el color del azúcar producida para el proceso de disolución en una refinería.</b>	INDICE DE ILUSTRACIONES LISTA DE SIMBOLOS GLOSARIO RESUMEN INTRODUCCION 1. MARCO CONCEPTUAL 2. MARCO TEORICO 2.1 Proceso del Azúcar 2.2 El Azúcar 2.3 Desarrollo del color 2.4 Efecto del pH en el color 2.5 Cambios de color en la práctica 2.6 Separación del color de los precipitados y adsorbentes 2.7 Método más empleado para la eliminación de color en productos de la caña de azúcar 2.8 Sistema de sulfitación de meladura por medio de eyectores de mezcla 3. OBJETIVOS Y/O HIPOTESIS 4. METODOLOGIA 5. RESULTADOS 6. INTERPRETACION DE RESULTADOS CONCLUSIONES RECOMENDACIONES REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS ANEXOS Y/O APENDICES	
	OPERACIONES UNITARIAS	Flujo de fluidos	Dinámica de Fluidos	Flujo de fluidos no comprensibles			Transporte de fluidos
			Agitación y Mezcla de líquidos	Aparatos para la agitación y mezcla de líquidos miscibles y no miscibles			Extracción
			Transferencia de masa en unidades continuas	Contacto interfacial liquido-liquido			Adsorción y desadsorción
				Contacto interfacial liquido-gas			
	FISICOQUIMICA	Fisicoquímica 2	Fenómenos de transporte	Viscosidad			
	CIENCIAS BÁSICAS Y COMPLEMENTARIAS						
	Especialización						

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **pH obtenido en el jugo mezclado y consumo de azufre por hora para sesenta y tres corridas obtenidas durante la etapa de muestreo para la sulfitación de jugo**

Día	Fecha	Flujo de jugo (gpm)	pH jugo claro (pH)	pH jugo sulfitado (pH)	Diferencial pH jugos	Azufre crudo ( Lb)	Azufre por hora ( Lb/h)	Sulfitos jugo sulfitado (SO3)
1	19/12/2011	1 675,75	6,74	--		--	--	--
2	20/12/2011	1 614,20	6,91	--	--	--	--	--
3	21/12/2011	1 749,99	6,94	--	--	--	--	--
4	22/12/2011	1 812,77	6,99	--	--	--	--	--
5	23/12/2011	1 760,51	6,94	--	--	--	--	--
6	24/12/2011	1 787,84	6,81	--	--	--	--	--
7	25/12/2011	1 778,34	6,83	--	--	--	--	--
8	26/12/2011	1 557,56	6,57	--	--	700,00	29,17	--
9	27/12/2011	1 802,79	6,94	--	--	610,00	25,42	--
10	28/12/2011	1 939,46	6,94	--	--	1 100,00	45,83	--
11	29/12/2011	1 938,03	6,80	--	--	1 100,00	45,83	--
12	30/12/2011	1 848,71	6,75	--	--	1 100,00	45,83	--
13	31/12/2011	1 855,06	6,84	--	--	450,00	18,75	--
14	01/01/2012	1 871,88	7,02	--	--	550,00	22,92	--
15	02/01/2012	1 386,67	6,86	--	--	800,00	33,33	--
16	03/01/2012	1 629,76	6,72	--	--	800,00	33,33	--
17	04/01/2012	1 881,14	6,98	--	--	800,00	33,33	--
18	05/01/2012	1 818,49	7,10	4,64	0,62	3 600,00	150,00	391,67
19	06/01/2012	1 778,94	7,02	4,82	0,53	3 015,00	125,63	251,25
20	07/01/2012	1 838,82	7,08	4,55	0,67	2 900,00	120,83	440,00
21	08/01/2012	1 817,24	7,12	4,44	0,77	2 800,00	116,67	464,38
22	09/01/2012	1 857,83	6,98	4,50	0,71	3 400,00	141,67	455,00
23	10/01/2012	1 974,20	6,78	4,62	0,77	1 000,00	41,67	385,00
24	11/01/2012	1 726,35	6,84	--	--	400,00	16,67	--
25	12/01/2012	1 870,52	6,80	--	--	650,00	27,08	--

Continuación del apéndice 3.

26	13/01/2012	1 747,68	7.00	4,69	0,72	1 600,00	66,67	380,00
27	14/01/2012	1 742,18	6.92	4,77	0,50	2 200,00	91,67	267,50
28	15/01/2012	1 808,08	6.96	4,68	0,61	2 200,00	91,67	411,25
29	16/01/2012	1 718,41	6.81	4,81	0,48	3 000,00	125,00	363,75
30	17/01/2012	1 514,64	6.91	4,37	0,64	2 900,00	120,83	442,50
31	18/01/2012	1 764,08	6.99	4,28	0,97	4 550,00	189,58	708,75
32	19/01/2012	1 891,79	6.95	4,17	0,91	6 000,00	250,00	743,75
33	20/01/2012	1 896,70	7.10	4,32	0,88	4 450,00	185,42	686,25
34	21/01/2012	1 825,88	7.20	4,34	1,06	4 700,00	195,83	621,25
35	22/01/2012	1 725,15	7.17	4,40	0,91	3 900,00	162,50	616,25
36	23/01/2012	1 689,79	7.15	4,55	0,70	4 500,00	187,50	536,25
37	24/01/2012	1 695,23	6.97	4,37	1,04	4 500,00	187,50	625,00
38	25/01/2012	1 529,30	6.84	4,40	1,00	4 100,00	170,83	642,50
39	26/01/2012	1 787,30	6.81	4,64	0,69	4 200,00	175,00	411,25
40	27/01/2012	1 721,94	6.92	4,39	0,81	5 200,00	216,67	693,75
41	28/01/2012	1 564,28	6.82	4,48	0,70	4 550,00	189,58	487,50
42	29/01/2012	1 602,99	6.80	4,62	0,54	4 650,00	193,75	492,50
43	30/01/2012	1 562,09	6.92	4,48	0,71	4 400,00	183,33	543,75
44	31/01/2012	1 707,47	6.91	4,48	0,76	4 500,00	187,50	573,75
45	01/02/2012	1 769,23	6.99	4,29	0,90	5 000,00	208,33	623,75
46	02/02/2012	1 458,64	6.95	4,49	0,43	4 250,00	177,08	546,25
47	03/02/2012	1 837,61	6.95	4,55	0,56	4 300,00	179,17	426,25
48	04/02/2012	1 778,66	6.97	4,60	0,43	2 500,00	104,17	388,75
49	05/02/2012	1 859,35	6.89	4,67	0,46	3 200,00	133,33	391,25
50	06/02/2012	1 828,75	6.95	4,62	0,33	3 400,00	141,67	416,25
51	07/02/2012	1 817,29	7.02	4,49	0,38	3 500,00	145,83	455,00
52	08/02/2012	1 813,72	6.76	4,63	0,55	3 200,00	133,33	472,50
53	09/02/2012	1 806,94	6.81	4,64	0,62	2 000,00	83,33	497,50
54	10/02/2012	1 709,42	6.79	4,53	0,61	2 700,00	112,50	791,50
55	11/02/2012	1 753,37	6.91	4,50	0,64	5 200,00	216,67	537,50
56	12/02/2012	1 606,91	6.93	4,72	0,54	2 250,00	93,75	388,57

Continuación del apéndice 3.

57	13/02/2012	1 778,40	6.82	4,91	0,37	1 700,00	70,83	218,75
58	14/02/2012	1 754,79	6.88	4,73	0,49	1 200,00	50,00	346,25
59	15/02/2012	1 770,30	6.69	4,63	0,59	1 700,00	70,83	415,00
60	16/02/2012	1 728,70	6,86	4,52	0,54	3 750,00	156,25	468,75
61	17/02/2012	1 770,08	6,85	4,54	0,63	3 900,00	162,50	545,00
62	18/02/2012	835,78	7,14	4,59	0,44	1 800,00	75,00	505,00
63	19/02/2012	1 649,54	6,78	4,26	0,83	5 300,00	220,83	688,75

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Brix, Pol y pureza del jugo sulfitado para sesenta y tres corridas obtenidas durante la etapa de muestreo para la sulfitación de jugo**

Día	Fecha	Flujo de Jugo (gpm)	Brix Jugo Claro (°Brix)	Pol Jugo Claro (% Pol)	Pureza Jugo Claro (%)
1	19/12/2011	1 675,75	14,56	12,36	84,90
2	20/12/2011	1 614,20	13,40	11,50	85,78
3	21/12/2011	1 749,99	14,34	12,29	85,69
4	22/12/2011	1 812,77	14,24	12,11	85,04
5	23/12/2011	1 760,51	14,76	12,54	84,94
6	24/12/2011	1 787,84	15,58	13,30	85,42
7	25/12/2011	1 778,34	16,71	14,15	84,67
8	26/12/2011	1 557,56	15,70	13,36	85,13
9	27/12/2011	1 802,79	14,84	12,62	85,07
10	28/12/2011	1 939,46	15,83	13,48	85,15
11	29/12/2011	1 938,03	15,59	13,35	85,66
12	30/12/2011	1 848,71	15,53	13,22	85,17
13	31/12/2011	1 855,06	14,63	12,59	86,10
14	01/01/2012	1 871,88	13,26	11,43	86,21

Continuación de apéndice 4.

15	02/01/2012	1 386,67	13,63	11,56	84,83
16	03/01/2012	1 629,76	14,73	12,40	84,23
17	04/01/2012	1 881,14	14,61	12,44	85,11
18	05/01/2012	1 818,49	15,50	13,31	85,86
19	06/01/2012	1 778,94	15,59	13,21	84,74
20	07/01/2012	1 838,82	15,05	12,67	84,20
21	08/01/2012	1 817,24	14,66	12,25	83,58
22	09/01/2012	1 857,83	14,20	12,02	84,61
23	10/01/2012	1 974,20	14,48	12,19	84,21
24	11/01/2012	1 726,35	14,31	12,19	85,16
25	12/01/2012	1 870,52	14,48	12,29	84,93
26	13/01/2012	1 747,68	14,41	12,31	85,40
27	14/01/2012	1 742,18	14,05	11,96	85,09
28	15/01/2012	1 808,08	13,88	11,82	85,21
29	16/01/2012	1 718,41	13,44	11,48	85,46
30	17/01/2012	1 514,64	13,78	11,63	84,45
31	18/01/2012	1 764,08	14,01	11,97	85,46
32	19/01/2012	1 891,79	14,43	12,22	84,74
33	20/01/2012	1 896,70	14,28	12,13	84,95
34	21/01/2012	1 825,88	13,36	11,27	84,35
35	22/01/2012	1 725,15	13,64	11,63	85,27
36	23/01/2012	1 689,79	13,63	11,58	84,99
37	24/01/2012	1 695,23	13,81	11,75	85,07
38	25/01/2012	1 529,30	13,63	11,61	85,18
39	26/01/2012	1 787,30	13,24	11,30	85,38
40	27/01/2012	1 721,94	15,06	12,82	85,09
41	28/01/2012	1 564,28	14,91	12,71	85,23
42	29/01/2012	1 602,99	14,09	11,98	85,04
43	30/01/2012	1 562,09	14,11	12,00	85,01
44	31/01/2012	1 707,47	13,45	11,37	84,56
45	01/02/2012	1 769,23	14,19	11,89	83,83

Continuación de apéndice 4.

46	02/02/2012	1 458,64	12,34	10,36	83,99
47	03/02/2012	1 837,61	12,84	10,84	84,47
48	04/02/2012	1 778,66	12,76	10,79	84,52
49	05/02/2012	1 859,35	12,85	10,89	84,72
50	06/02/2012	1 828,75	12,34	10,35	83,91
51	07/02/2012	1 817,29	12,74	10,92	85,74
52	08/02/2012	1 813,72	12,05	10,39	86,24
53	09/02/2012	1 806,94	11,68	10,01	85,72
54	10/02/2012	1 709,42	11,80	10,01	84,81
55	11/02/2012	1 753,37	11,75	9,99	85,00
56	12/02/2012	1 606,91	11,76	10,01	85,13
57	13/02/2012	1 778,40	11,84	10,05	84,92
58	14/02/2012	1 754,79	11,86	10,11	85,26
59	15/02/2012	1 770,30	11,03	9,33	84,58
60	16/02/2012	1 728,70	11,20	9,53	85,11
61	17/02/2012	1 770,08	10,81	9,15	84,63
62	18/02/2012	835,78	11,13	9,31	83,66
63	19/02/2012	1 649,54	11,66	9,78	83,86

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 5. pH obtenido en el tratamiento de jugo para sesenta y tres corridas obtenidas durante la etapa de muestreo para la sulfitación de jugo**

Día	Fecha	pH jugo claro (pH)	pH jugo sulfitado (pH)	pH jugo alcalizado (pH)	Turbidez jugo claro
1	19/12/2011	6,74	--	7,65	19,90
2	20/12/2011	6,91	--	7,71	22,31
3	21/12/2011	6,94	--	7,66	19,96

Continuación de apéndice 5.

4	22/12/2011	6,99	--	7,74	21,10
5	23/12/2011	6,94	--	7,58	24,74
6	24/12/2011	6,81	--	7,61	20,59
7	25/12/2011	6,83	--	7,99	20,41
8	26/12/2011	6,57	--	8,07	30,41
9	27/12/2011	6,94	--	7,74	26,10
10	28/12/2011	6,94	--	7,66	20,81
11	29/12/2011	6,80	--	7,65	20,20
12	30/12/2011	6,75	--	7,82	19,89
13	31/12/2011	6,84	--	7,62	16,15
14	01/01/2012	7,02	--	7,67	14,51
15	02/01/2012	6,86	--	7,44	22,75
16	03/01/2012	6,72	--	7,94	19,00
17	04/01/2012	6,98	--	7,93	20,26
18	05/01/2012	7,10	4,64	7,85	13,85
19	06/01/2012	7,02	4,82	7,46	13,93
20	07/01/2012	7,08	4,55	7,83	14,31
21	08/01/2012	7,12	4,44	7,78	13,50
22	09/01/2012	6,98	4,50	7,53	12,31
23	10/01/2012	6,78	4,62	7,41	21,18
24	11/01/2012	6,84	--	7,65	18,14
25	12/01/2012	6,80	--	7,86	21,41
26	13/01/2012	7,00	4,69	7,58	22,03
27	14/01/2012	6,92	4,77	7,45	18,91
28	15/01/2012	6,96	4,68	7,70	18,49
29	16/01/2012	6,81	4,81	7,62	19,45
30	17/01/2012	6,91	4,37	7,51	15,00
31	18/01/2012	6,99	4,28	7,43	14,11
32	19/01/2012	6,95	4,17	7,33	11,65
33	20/01/2012	7,10	4,32	7,50	17,25

Continuación de apéndice 5.

34	21/01/2012	7,20	4,34	7,94	21,41
35	22/01/2012	7,17	4,40	7,59	15,84
36	23/01/2012	7,15	4,55	7,43	21,06
37	24/01/2012	6,97	4,37	7,19	23,15
38	25/01/2012	6,84	4,40	7,21	25,20
39	26/01/2012	6,81	4,64	7,20	27,44
40	27/01/2012	6,92	4,39	7,55	25,21
41	28/01/2012	6,82	4,48	7,45	20,40
42	29/01/2012	6,80	4,62	7,38	24,15
43	30/01/2012	6,92	4,48	7,21	28,31
44	31/01/2012	6,91	4,48	7,07	25,06
45	01/02/2012	6,99	4,29	7,69	22,26
46	02/02/2012	6,95	4,49	7,54	18,29
47	03/02/2012	6,95	4,55	7,19	17,90
48	04/02/2012	6,97	4,60	7,43	13,31
49	05/02/2012	6,89	4,67	7,55	14,21
50	06/02/2012	6,95	4,62	7,39	13,74
51	07/02/2012	7,02	4,49	7,43	11,30
52	08/02/2012	6,76	4,63	7,16	16,99
53	09/02/2012	6,81	4,64	7,20	15,15
54	10/02/2012	6,79	4,53	7,19	15,14
55	11/02/2012	6,91	4,50	7,58	15,73
56	12/02/2012	6,93	4,72	7,34	19,44
57	13/02/2012	6,82	4,91	7,48	16,18
58	14/02/2012	6,88	4,73	7,66	12,53
59	15/02/2012	6,69	4,63	7,45	13,43
60	16/02/2012	6,86	4,52	7,41	17,09
61	17/02/2012	6,85	4,54	7,38	17,68

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Análisis de meladura no tratada para sesenta y tres corridas obtenidas durante la etapa de muestreo para la sulfitación de meladura**

Día	Fecha	Brix meladura (°Brix)	pH meladura (pH)	Turbidez meladura	Color meladura (UI)	Pol meladura (%Pol)	Pureza meladura (%pureza)
1	19/12/2011	61,90	6,28	8 373,58	15 851,98	52,46	84,75
2	20/12/2011	67,13	6,35	9 121,52	16 642,62	57,05	84,98
3	21/12/2011	68,77	6,34	9 320,53	17 073,82	57,89	84,18
4	22/12/2011	66,30	6,52	10 141,47	16 493,36	56,67	85,48
5	23/12/2011	66,93	6,36	10 680,47	16 095,33	57,15	85,38
6	24/12/2011	63,87	6,29	7 264,04	15 713,88	54,35	85,10
7	25/12/2011	68,90	6,37	7 612,32	16 095,33	58,37	84,71
8	26/12/2011	65,77	6,09	7 968,89	19 014,21	55,33	84,14
9	27/12/2011	66,83	6,30	8 847,87	17 405,51	56,78	84,96
10	28/12/2011	67,90	6,24	9 751,73	19 039,09	58,23	85,75
11	29/12/2011	67,90	6,24	8 590,81	17 189,91	58,33	85,91
12	30/12/2011	67,53	6,09	6 476,28	17 206,49	57,91	85,76
13	31/12/2011	66,77	6,26	7 214,29	15 921,19	57,50	86,12
14	01/01/2012	63,83	6,22	6 990,40	18 574,72	54,80	85,85
15	02/01/2012	66,23	6,19	10 240,97	19 511,75	55,83	84,29
16	03/01/2012	65,13	6,17	6 304,86	16 977,38	54,60	83,83
17	04/01/2012	66,73	6,22	8 474,72	17 529,89	56,03	83,97
18	05/01/2012	65,50	6,16	7 156,24	17 422,09	55,17	84,23
19	06/01/2012	66,33	6,26	7 496,23	16 982,60	55,17	83,18
20	07/01/2012	66,33	6,47	5 340,23	14 934,41	54,95	82,83
21	08/01/2012	60,30	6,32	4 776,36	14 188,10	50,79	84,22
22	09/01/2012	64,00	6,34	5 781,38	14 569,55	52,78	82,47
23	10/01/2012	57,37	6,25	7 616,69	17 045,21	47,93	83,54
24	11/01/2012	64,67	6,14	7 357,69	16 598,27	55,78	86,26
25	12/01/2012	67,13	6,15	7 985,47	16 402,14	55,06	82,01
26	13/01/2012	64,17	6,21	7 280,63	15 713,88	54,19	84,46
27	14/01/2012	66,63	6,32	7 255,75	15 058,79	56,33	84,54
28	15/01/2012	62,27	6,34	9 685,39	13 690,57	52,33	84,04

Continuación de apéndice 6.

29	16/01/2012	68,00	6,23	9 287,36	15 025,62	56,74	83,44
30	17/01/2012	65,60	6,34	5 622,17	14 768,56	53,55	81,63
31	18/01/2012	64,70	6,44	6 244,09	14 519,79	53,80	83,15
32	19/01/2012	61,93	6,57	5 398,28	13 466,67	51,95	83,89
33	20/01/2012	65,80	6,49	5 970,45	14 005,67	55,11	83,75
34	21/01/2012	61,43	6,47	5 887,52	13 848,12	51,31	83,52
35	22/01/2012	65,43	6,55	7 330,38	15 639,25	55,13	84,26
36	23/01/2012	65,57	6,72	6 998,69	13 748,61	54,25	82,75
37	24/01/2012	66,87	6,22	6 716,75	13 947,63	55,55	83,08
38	25/01/2012	65,77	6,20	7 836,21	14 644,18	54,03	82,15
39	26/01/2012	68,47	6,13	7 222,58	14 826,61	57,23	83,59
40	27/01/2012	67,83	6,44	8 673,73	14 013,96	56,86	83,83
41	28/01/2012	66,76	6,30	6 028,49	12 703,78	56,10	84,03
42	29/01/2012	64,00	6,25	7 529,40	14 453,46	53,96	84,32
43	30/01/2012	61,17	6,34	7 297,21	15 390,48	51,06	83,48
44	31/01/2012	64,87	6,23	8 242,53	16 866,51	53,16	81,96
45	01/02/2012	67,20	6,29	7 885,96	15 896,31	55,44	82,50
46	02/02/2012	58,17	6,22	7 515,94	18 748,10	47,01	80,83
47	03/02/2012	61,20	6,28	6 235,80	16 634,33	49,75	81,29
48	04/02/2012	63,43	6,37	5 489,49	16 410,44	52,77	83,19
49	05/02/2012	62,27	6,37	6 135,23	16 030,99	52,81	84,81
50	06/02/2012	57,23	6,36	5 116,34	16 045,57	47,61	83,19
51	07/02/2012	63,13	6,33	6 227,51	15 813,39	53,29	84,41
52	08/02/2012	61,97	6,27	5 713,39	15 440,24	52,02	83,95
53	09/02/2012	61,67	6,28	5 000,25	15 373,90	52,42	85,00
54	10/02/2012	65,23	6,27	6 625,54	14 594,42	55,08	84,43
55	11/02/2012	67,30	6,30	6 575,78	12 894,51	57,41	85,30
56	12/02/2012	70,07	6,35	6 608,95	14 420,29	59,18	84,46
57	13/02/2012	63,70	6,55	6 874,31	21 269,71	53,55	84,06
58	14/02/2012	65,18	6,19	5 805,41	15 790,67	55,46	85,09
59	15/02/2012	62,80	6,17	5 340,23	15 125,13	52,33	83,33
60	16/02/2012	63,60	6,43	6 856,27	15 361,59	53,86	84,68
61	17/02/2012	61,80	6,34	5 688,51	14 793,44	51,45	83,25

Continuación de apéndice 6.

62	18/02/2012	58,00	6,42	5 555,83	15 091,96	47,87	82,53
63	19/02/2012	66,70	6,32	4 950,50	14 727,10	55,74	83,57

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 7. Análisis de meladura clarificada para sesenta y tres corridas obtenidas durante la etapa de muestreo para la sulfitación de meladura**

Día	Fecha	Brix Meladura Clara (°Brix)	pH Meladura Clara (pH)	Turbidez Meladura Clara	Color Meladura Clara (UI)	Pol Meladura clara (%Pol)	Pureza meladura clara (%Pureza)	% Remoción de Turbidez
1	19/12/2011	63,57	6,04	4 627,10	15 962,65	53,82	84,67	44,74
2	20/12/2011	65,80	6,09	4 146,14	16 518,23	55,85	84,88	54,55
3	21/12/2011	66,67	6,10	4 020,55	16 160,76	56,98	85,47	56,86
4	22/12/2011	65,80	6,12	3 839,33	16 045,57	56,12	85,29	62,14
5	23/12/2011	66,37	6,05	4 801,23	15 755,34	56,03	84,42	55,05
6	24/12/2011	61,83	6,00	2 653,53	15 216,35	52,97	85,67	63,47
7	25/12/2011	68,40	6,35	3 690,07	15 473,41	58,48	85,49	51,53
8	26/12/2011	66,67	5,95	3 648,61	17 861,59	55,89	83,84	54,21
9	27/12/2011	65,80	6,04	3 826,10	18 207,40	55,95	85,04	56,76
10	28/12/2011	66,03	6,07	3 507,64	18 259,61	56,51	85,57	64,03
11	29/12/2011	66,47	6,15	3 192,53	16 866,51	57,66	86,76	62,84
12	30/12/2011	66,07	6,13	2 620,36	16 435,31	57,16	86,52	59,54
13	31/12/2011	66,27	6,24	2 811,09	15 614,38	56,47	85,22	61,03
14	01/01/2012	65,90	6,08	3 192,53	17 670,86	57,11	86,67	54,33
15	02/01/2012	63,20	5,90	3 144,44	21 075,68	53,78	85,10	69,30
16	03/01/2012	62,77	6,02	2 471,10	15 373,90	52,75	84,04	60,81
17	04/01/2012	64,40	5,97	2 976,93	16 692,37	54,24	84,22	64,87
18	05/01/2012	65,13	5,97	2 305,26	15 315,85	55,06	84,53	67,79
19	06/01/2012	65,83	6,07	2 943,76	17 073,82	54,47	82,74	60,73
20	07/01/2012	66,13	6,04	2 487,69	13 723,73	54,92	83,04	53,42

Continuación de apéndice 7.

21	08/01/2012	61,40	5,97	2 164,29	12 662,32	52,71	85,84	54,69
22	09/01/2012	63,87	6,06	2 776,26	14 080,30	52,32	81,92	51,98
23	10/01/2012	58,07	5,84	2 976,93	16 725,54	48,61	83,72	60,92
24	11/01/2012	63,00	5,95	3 026,68	16 145,08	54,05	85,79	58,86
25	12/01/2012	65,03	5,91	3 540,81	15 937,77	53,42	82,14	55,66
26	13/01/2012	64,20	6,14	3 442,96	16 319,22	55,03	85,72	52,71
27	14/01/2012	65,83	6,15	2 786,21	14 320,78	54,53	82,83	61,60
28	15/01/2012	60,97	6,27	3 184,24	13 035,47	51,90	85,13	67,12
29	16/01/2012	67,33	6,13	4 452,96	14 005,67	56,23	83,51	52,05
30	17/01/2012	65,83	5,97	2 645,24	14 519,79	53,81	81,74	52,95
31	18/01/2012	62,70	6,32	3 034,98	14 121,76	52,52	83,77	51,39
32	19/01/2012	61,53	6,39	2 056,49	12 985,72	51,55	83,77	61,90
33	20/01/2012	66,63	6,44	2 935,47	14 884,65	56,44	84,70	50,83
34	21/01/2012	58,90	6,19	2 570,61	14 353,95	49,31	83,72	56,34
35	22/01/2012	64,17	6,38	2 819,38	15 473,41	54,05	84,24	61,54
36	23/01/2012	61,97	6,42	2 305,26	13 715,44	52,68	85,01	67,06
37	24/01/2012	65,37	6,05	3 020,94	16 444,90	54,90	83,99	55,02
38	25/01/2012	63,63	6,09	2 835,96	14 984,16	52,60	82,67	63,81
39	26/01/2012	67,00	6,04	3 897,37	14 876,36	55,60	82,99	46,04
40	27/01/2012	66,03	6,25	2 786,21	13 831,53	55,45	83,97	67,88
41	28/01/2012	62,60	6,19	2 885,72	13 408,63	53,73	85,83	52,13
42	29/01/2012	63,97	6,13	2 184,41	13 979,12	54,36	84,99	70,99
43	30/01/2012	59,87	6,18	2 454,52	15 747,05	50,80	84,85	66,36
44	31/01/2012	62,57	6,08	2 381,55	15 884,07	52,37	83,70	71,11
45	01/02/2012	65,37	6,10	2 321,84	16 228,00	54,31	83,08	70,56
46	02/02/2012	60,20	6,14	2 799,81	18 630,15	48,66	80,83	62,75
47	03/02/2012	60,50	6,15	2 056,49	16 592,87	49,39	81,64	67,02
48	04/02/2012	61,63	6,12	1 981,86	17 173,33	51,42	83,43	63,90
49	05/02/2012	62,73	6,18	2 628,65	15 075,38	52,23	83,26	57,15
50	06/02/2012	56,20	6,28	2 015,03	16 037,28	47,25	84,07	60,62
51	07/02/2012	57,97	6,16	2 330,13	15 465,11	49,48	85,37	62,58
52	08/02/2012	62,07	6,10	2 446,22	14 635,89	53,84	86,74	57,18
53	09/02/2012	64,13	6,14	2 396,47	14 627,59	54,80	85,45	52,07
54	10/02/2012	64,90	6,08	2 860,84	14 221,27	54,89	84,58	56,82

Continuación de apéndice 7.

55	11/02/2012	67,53	6,05	3 275,45	13 441,80	56,60	83,82	50,19
56	12/02/2012	67,60	6,18	2 238,92	14 096,89	57,24	84,67	66,12
57	13/02/2012	66,03	6,30	4 569,05	21 775,54	54,57	82,64	33,53
58	14/02/2012	63,57	5,95	2 205,75	16 087,04	53,60	84,33	62,01
59	15/02/2012	61,70	5,93	2 479,39	14 751,98	51,45	83,39	53,57
60	16/02/2012	63,70	6,23	2 670,12	13 251,07	53,96	84,71	61,06
61	17/02/2012	61,77	6,08	2 504,27	14 196,39	51,53	83,43	55,98
62	18/02/2012	59,20	6,18	2 238,92	16 816,76	48,26	81,52	59,70
63	19/02/2012	64,53	5,98	2 255,50	15 042,21	54,01	83,69	54,44

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 8. Análisis de meladura clarificada por eyectores para sesenta y tres corridas obtenidas durante la etapa de muestreo para la sulfitación de meladura**

Día	Fecha	pH Meladura (pH)	pH Meladura Clara (pH)	Diferencial pH Meladuras
1	19/12/2011	6,28	6,04	0,2400
2	20/12/2011	6,35	6,09	0,2660
3	21/12/2011	6,34	6,10	0,3350
4	22/12/2011	6,52	6,12	0,1883
5	23/12/2011	6,36	6,05	0,2967
6	24/12/2011	6,29	6,00	0,3383
7	25/12/2011	6,37	6,35	0,3000
8	26/12/2011	6,09	5,95	0,3667
9	27/12/2011	6,30	6,04	0,3133
10	28/12/2011	6,24	6,07	0,3300
11	29/12/2011	6,24	6,15	0,2283
12	30/12/2011	6,09	6,13	0,0500
13	31/12/2011	6,26	6,24	0,0667
14	01/01/2012	6,22	6,08	0,3083
15	02/01/2012	6,19	5,90	0,2100

Continuación de apéndice 8.

16	03/01/2012	6,17	6,02	0,3300
17	04/01/2012	6,22	5,97	0,2250
18	05/01/2012	6,16	5,97	0,3167
19	06/01/2012	6,26	6,07	0,2050
20	07/01/2012	6,47	6,04	0,4317
21	08/01/2012	6,32	5,97	0,4583
22	09/01/2012	6,34	6,06	0,3150
23	10/01/2012	6,25	5,84	0,3817
24	11/01/2012	6,14	5,95	0,1100
25	12/01/2012	6,15	5,91	0,3450
26	13/01/2012	6,21	6,14	0,1900
27	14/01/2012	6,32	6,15	0,2667
28	15/01/2012	6,34	6,27	0,4267
29	16/01/2012	6,23	6,13	0,1850
30	17/01/2012	6,34	5,97	0,2217
31	18/01/2012	6,44	6,32	0,1800
32	19/01/2012	6,57	6,39	0,1167
33	20/01/2012	6,49	6,44	0,1533
34	21/01/2012	6,47	6,19	0,2700
35	22/01/2012	6,55	6,38	0,1517
36	23/01/2012	6,72	6,42	0,2900
37	24/01/2012	6,22	6,05	0,1867
38	25/01/2012	6,20	6,09	0,1650
39	26/01/2012	6,13	6,04	0,0633
40	27/01/2012	6,44	6,25	0,2167
41	28/01/2012	6,30	6,19	0,1083
42	29/01/2012	6,25	6,13	0,1350
43	30/01/2012	6,34	6,18	0,1583
44	31/01/2012	6,23	6,08	0,1533
45	01/02/2012	6,29	6,10	0,1917
46	02/02/2012	6,22	6,14	0,1383
47	03/02/2012	6,28	6,15	0,0883
48	04/02/2012	6,37	6,12	0,1433
49	05/02/2012	6,37	6,18	0,1950
50	06/02/2012	6,36	6,28	0,1283

Continuación de apéndice 8.

51	07/02/2012	6,33	6,16	0,1717
52	08/02/2012	6,27	6,10	0,1500
53	09/02/2012	6,28	6,14	0,1467
54	10/02/2012	6,27	6,08	0,1900
55	11/02/2012	6,30	6,05	0,2433
56	12/02/2012	6,35	6,18	0,0833
57	13/02/2012	6,55	6,30	0,1683
58	14/02/2012	6,19	5,95	0,1917
59	15/02/2012	6,17	5,93	0,1900
60	16/02/2012	6,43	6,23	0,2317
61	17/02/2012	6,34	6,08	0,2217
62	18/02/2012	6,42	6,18	0,1900
63	19/02/2012	6,32	5,98	0,3000

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 9. Color meladura, turbidez meladura, color meladura clara, turbidez meladura clara para sesenta y tres corridas obtenidas durante la etapa de muestreo para la sulfitación de meladura**

<b>DIA</b>	<b>Fecha</b>	<b>Color Meladura (UI)</b>	<b>Turbidez Meladura</b>	<b>Color Meladura Clara (UI)</b>	<b>Turbidez Meladura Clara</b>
1	19/12/2011	15 851,98	8 373,58	15 962,65	4 62710
2	20/12/2011	16 642,62	9 121,52	16 518,23	4 146,14
3	21/12/2011	17 073,82	9 320,53	16 160,76	4 020,55
4	22/12/2011	16 493,36	10 141,47	16 045,,57	3 839,33
5	23/12/2011	16 095,33	10 680,47	15 755,34	4 801,23
6	24/12/2011	15 713,88	7 264,04	15 216,35	2 653,53
7	25/12/2011	16 095,33	7 612,32	15 473,41	3 690,07
8	26/12/2011	19 014,21	7 968.,89	17 861,59	3 648,61
9	27/12/2011	17 405,51	8 847,87	18 207,40	3 826,10

Continuación de apéndice 9.

10	28/12/2011	19 039,09	9 751,73	18 259,61	3 507,64
11	29/12/2011	17 189,91	8 590,81	16 866,51	3 192,53
12	30/12/2011	17 206,49	6 476,28	16 435,31	2 620,36
13	31/12/2011	15 921,19	7 214,29	15 614,38	2 811,09
14	01/01/2012	18 574,72	6 990,40	17 670,86	3 192,53
15	02/01/2012	19 511,75	10 240,97	21 075,68	3 144,44
16	03/01/2012	16 977,38	6 304,86	15 373,90	2 471,10
17	04/01/2012	17 529,89	8 474,72	16 692,37	2 976,93
18	05/01/2012	17 422,09	7 156,24	15 315,85	2 305,26
19	06/01/2012	16 982,60	7 496,23	17 073,82	2 943,76
20	07/01/2012	14 934,41	5 340,23	13 723,73	2 487,69
21	08/01/2012	14 188,10	4 776,36	12 662,32	2 164,29
22	09/01/2012	14 569,55	5 781,38	14 080,30	2 776,26
23	10/01/2012	17 045,21	7 616,69	16 725,54	2 976,93
24	11/01/2012	16 598,27	7 357,69	16 145,08	3 026,68
25	12/01/2012	16 402,14	7 985,47	15 937,77	3 540,81
26	13/01/2012	15 713,88	7 280,63	16 319,22	3 442,96
27	14/01/2012	15 058,79	7 255,75	14 320,78	2 786,21
28	15/01/2012	13 690,57	9 685,39	13 035,47	3 184,24
29	16/01/2012	15 025,62	9 287,36	14 005,67	4 452,96
30	17/01/2012	14 768,56	5 622,17	14 519,79	2 645,24
31	18/01/2012	14 519,79	6 244,09	14 121,76	3 034,98
32	19/01/2012	13 466,67	5 398,28	12 985,72	2 056,49
33	20/01/2012	14 005,67	5 970,45	14 884,65	2 935,47
34	21/01/2012	13 848,12	5 887,52	14 353,95	2 570,61
35	22/01/2012	15 639,25	7 330,38	15 473,41	2 819,38
36	23/01/2012	13 748,61	6 998,69	13 715,44	2 305,26
37	24/01/2012	13 947,63	6 716,75	16 444,90	3 020,94
38	25/01/2012	14 644,18	7 836,21	14 984,16	2 835,96
39	26/01/2012	14 826,61	7 222,58	14 876,36	3 897,37
40	27/01/2012	14 013,96	8 673,73	13 831,53	2 786,21
41	28/01/2012	12 703,78	6 028,49	13 408,63	2 885,72
42	29/01/2012	14 453,46	7 529,40	13 979,12	2 184,41
43	30/01/2012	15 390,48	7 297,21	15 747,05	2 454,52
44	31/01/2012	16 866,51	8 242,53	15 884,07	2 381,55

Continuación de apéndice 9.

45	01/02/2012	15 896,31	7 885,96	16 228,00	2 321,84
46	02/02/2012	18 748,10	7 515,94	18 630,15	2 799,81
47	03/02/2012	16 634,33	6 235,80	16 592,87	2 056,49
48	04/02/2012	16 410,44	5 489,49	17 173,33	1 981,86
49	05/02/2012	16 030,99	6 135,23	15 075,38	2 628,65
50	06/02/2012	16 045,57	5 116,34	16 037,28	2 015,03
51	07/02/2012	15 813,39	6 227,51	15 465,11	2 330,13
52	08/02/2012	15 440,24	5 713,39	14 635,89	2 446,22
53	09/02/2012	15 373,90	5 000,25	14 627,59	2 396,47
54	10/02/2012	14 594,42	6 625,54	14 221,27	2 860,84
55	11/02/2012	12 894,51	6 575,78	13 441,80	3 275,45
56	12/02/2012	14 420,29	6 608,95	14 096,89	2 238,92
57	13/02/2012	21 269,71	6 874,31	21 775,54	4 569,05
58	14/02/2012	15 790,67	5 805,41	16 087,04	2 205,75
59	15/02/2012	15 125,13	5 340,23	14 751,98	2 479,39
60	16/02/2012	15 361,59	6 856,27	13 251,07	2 670,12
61	17/02/2012	14 793,44	5 688,51	14 196,39	2 504,27
62	18/02/2012	15 091,96	5 555,83	16 816,76	2 238,92
63	19/02/2012	14 727,10	4 950,50	15 042,21	2 255,50

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 10. Análisis de color de azúcar crudo a refinar con relación al flujo de jugo y flujo de sacarato para sesenta y dos corridas obtenidas durante la etapa de muestreo para la sulfitación de jugo y de meladura**

<b>DIA</b>	<b>Fecha</b>	<b>Color Azúcar Crudo a Refinar (UI)</b>	<b>Flujo de Jugo (gpm)</b>	<b>Flujo de Sacarato (gpm)</b>
1	19/12/2011	1 290,85	1 67575	39,14
2	20/12/2011	1 506,14	1 61420	44,45
3	21/12/2011	1 614,47	1 74999	34,52

Continuación de apéndice 10.

4	22/12/2011	1 497,57	1 812,77	27,97
5	23/12/2011	1 397,63	1 760,51	22,16
6	24/12/2011	1 387,05	1 787,84	21,54
7	25/12/2011	1 425,48	1 778,34	25,65
8	26/12/2011	1 356,95	1 557,56	26,49
9	27/12/2011	1 377,27	1 802,79	28,62
10	28/12/2011	1 215,00	1 939,46	23,68
11	29/12/2011	1 356,63	1 938,03	24,00
12	30/12/2011	1 321,55	1 848,71	16,70
13	31/12/2011	1 437,28	1 855,06	25,27
14	01/01/2012	1 288,52	1 871,88	29,17
15	02/01/2012	1 381,07	1 386,67	22,27
16	03/01/2012	1 125,20	1 629,76	27,31
17	04/01/2012	1 560,66	1 881,14	31,41
18	05/01/2012	1 181,60	1 818,49	28,44
19	06/01/2012	1 399,12	1 778,94	26,73
20	07/01/2012	1 248,92	1 838,82	36,56
21	08/01/2012	1 270,29	1 817,24	33,68
22	09/01/2012	1 011,90	1 857,83	35,92
23	10/01/2012	1 260,59	1 974,20	45,47
24	11/01/2012	1 342,65	1 726,35	25,99
25	12/01/2012	1 276,57	1 870,52	40,19
26	13/01/2012	1 198,00	1 747,68	45,55
27	14/01/2012	1 167,47	1 742,18	39,78
28	15/01/2012	1 024,36	1 808,08	49,51
29	16/01/2012	1 426,87	1 718,41	32,47
30	17/01/2012	1 307,74	1 514,64	24,40
31	18/01/2012	1 132,58	1 764,08	24,32
32	19/01/2012	1 309,33	1 891,79	24,06
33	20/01/2012	1 024,68	1 896,70	20,79
34	21/01/2012	1 121,14	1 825,88	20,89
35	22/01/2012	1 060,06	1 725,15	23,28
36	23/01/2012	979,23	1 689,79	23,59
37	24/01/2012	887,02	1 695,23	20,99
38	25/01/2012	907,85	1 529,30	17,37
39	26/01/2012	774,77	1 787,30	22,79

Continuación de apéndice 10.

40	27/01/2012	963,27	1 721,94	18,54
41	28/01/2012	1 043,42	1 564,28	21,07
42	29/01/2012	930,50	1 602,99	2081
43	30/01/2012	1 012,37	1 562,09	23,67
44	31/01/2012	968,99	1 707,47	25,53
45	01/02/2012	1 136,94	1 769,23	24,80
46	02/02/2012	1 118,42	1 458,64	25,78
47	03/02/2012	1 237,46	1 837,61	26,79
48	04/02/2012	965,37	1 778,66	25,97
49	05/02/2012	1 135,56	1 859,35	25,13
50	06/02/2012	1 134,98	1 828,75	26,69
51	07/02/2012	1 170,91	1 817,29	25,46
52	08/02/2012	952,52	1 813,72	27,04
53	09/02/2012	983,89	1 806,94	25,36
54	10/02/2012	774,19	1 709,42	24,15
55	11/02/2012	944,30	1 753,37	25,94
56	12/02/2012	970,34	1 606,91	31,00
57	13/02/2012	977,40	1 778,40	39,13
58	14/02/2012	1 008,57	1 754,79	35,00
59	15/02/2012	831,85	1 770,30	36,33
60	16/02/2012	648,03	1 728,70	39,04
61	17/02/2012	497,67	1 770,08	42,95
62	18/02/2012	783,60	835,78	24,38

Fuente: elaboración propia.

## ANEXOS

### Anexo 1. Requisitos en los parámetros del azúcar crudo

Requisitos	Límite
Polarización °S a 20°C,mínimo	96,0
Humedad, %m/m, máximo	1,0
Factor de Seguridad, máximo	0,30

Fuente: Norma Técnica Colombiana (ICONTEC).

### Anexo 2. Requisitos del azúcar blanco

Requisitos	Límite
Polarización °S a 20°C,mínimo	99,4
Color, UI a 420 nm máximo	400
Turbiedad, uma a 420 nm, máximo	400
Humedad granulado, %m/m, máximo	0,075
Humedad moldeado, %m/m, máximo	0,10
Cenizas, %m/m, máximo	0.15

Fuente: Norma Técnica Colombiana (ICONTEC).

### Anexo 3. Requisitos en los parámetros del azúcar refinado

Requisitos	Límite
Polarización °S a 20°C, mínimo	99,4
Color, UI a 420 nm máximo	60
Azúcares reductores, % m/m, máximo	0,05
Humedad granulado, %m/m, máximo	0,05
Humedad moldeado, %m/m, máximo	0,10
Cenizas, %m/m, máximo	0,04

Fuente: Norma Técnica Colombiana (ICONTEC).

### Anexo 4. Requisitos de los azúcares en Colombia

Requisitos/calidad de azúcar	Crudo	Blanco	Especial	Refinado
<i>Norma ICONTEC</i>	607	611	2085	778
Polarización °S a 20°C, mínimo	96,0	99,4	99,6	99,8
Color, UI a 420 nm máximo	Nd	400	180	60
Turbiedad, uma a 420 nm, máximo	Nd	400	80	Nd
Humedad granulado, %m/m, máximo	1,0	0,075	0,07	0,05
Humedad moldeado, %m/m, máximo	Nd	0,10	0,10	0,10
Cenizas, %m/m, máximo	Nd	0,15	0,095	0,04
Azúcares reductores, %m/m, máx.	Nd	Nd	Nd	0,05
Arsénico, expresado como As, mg/Kg, máx,	1,0	Nd	Nd	1
Cobre, expresado como Cu, mg/kg, máx.	2,0	Nd	Nd	2
Plomo, expresado como Pb, mg/Kg, máx.	2,0	Nd	Nd	2

Fuente: Norma Técnica Colombiana (ICONTEC).