



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

EVALUACIÓN DEL EFECTO QUE GENERAN DOS PROCESOS
DE PRODUCCIÓN DE AZÚCAR BLANCO (PROCESO BLANCO
DIRECTO Y PROCESO BLANCO CRISTAL) SOBRE EL COLOR
DEL AZÚCAR PRODUCIDA EN UN INGENIO AZUCARERO
GUATEMALTECO

José Abel Lima Godínez
Asesorado por Oscar Benedicto Monzón Barrientos

Guatemala, junio de 2009.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL EFECTO QUE GENERAN DOS PROCESOS
DE PRODUCCIÓN DE AZÚCAR BLANCO (PROCESO BLANCO
DIRECTO Y PROCESO BLANCO CRISTAL) SOBRE EL COLOR
DEL AZÚCAR PRODUCIDA EN UN INGENIO AZUCARERO
GUATEMALTECO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

JOSÉ ABEL LIMA GODÍNEZ

ASESORADO POR EL LIC. OSCAR BENEDICTO MONZÓN BARRIENTOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, JUNIO DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de Lòpez
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

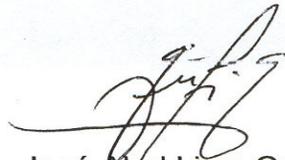
DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing. Julio Rivera Palacios
EXAMINADOR	Ing. Williams Alvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Osmar Rosal Higueros
SECRETARIO	Ing. Gilda Marina Castellanos de Illescas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

EVALUACIÓN DEL EFECTO QUE GENERAN DOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE AZÚCAR BLANCO (PROCESO BLANCO DIRECTO Y PROCESO BLANCO CRISTAL) SOBRE EL COLOR DEL AZÚCAR PRODUCIDA EN UN INGENIO AZUCARERO GUATEMALTECO,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, el 20 de mayo de 2008.



José Abel Lima Godínez

Guatemala, 9 de Noviembre de 2008.

Ingeniero Williams Álvarez
Director de Escuela de Ingeniería Química
Universidad de San Carlos de Guatemala

Mediante la presente me dirijo a Usted para informarle que como asesor de trabajo de graduación del estudiante de Ingeniería Química José Abel Lima Godínez con carné No. 1992 – 12236 en la realización del trabajo de graduación titulado "EVALUACIÓN DEL EFECTO QUE GENERAN DOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE AZUCAR BLANCO (PROCESO BLANCO DIRECTO Y PROCESO BLANCO CRISTAL) SOBRE EL COLOR DEL AZUCAR PRODUCIDA EN UN INGENIO AZUCARERO GUATEMALATECO", he aprobado el informe final del trabajo de graduación.

De manera que solicito proceder a la gestión de presentación para la autorización del caso.

Sin otro particular, se despide atentamente


Oscar Benedicto Monzón Barrientos
Licenciado en Química
Colegiado No. 614
Asesor de trabajo de graduación



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

Guatemala, 21 de Mayo de 2009
Ref. EI.Q.294.2009

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

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-026-09-B-IF le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de INGENIERO QUÍMICO al estudiante universitario **JOSÉ ABEL LIMA GODÍNEZ**, identificado con carné No. **1992-12236**, titulado: "EVALUACIÓN DEL EFECTO QUE GENERAN DOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE AZÚCAR BLANCO (PROCESO BLANCO DIRECTO Y PROCESO BLANCO CRISTAL) SOBRE EL COLOR DEL AZÚCAR PRODUCIDA EN UN INGENIO AZUCARERO GUATEMALTECO" el cual ha sido asesorado por el Licenciado Oscar Benedicto Monzón Barrientos, como consta en el Acta.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice al estudiante **Lima Godínez** proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAR A TODOS"

Inga. Teresa Lisely de León Arana, M.Sc.

COORDINADORA
Tribunal que revisó el informe final
Del trabajo de graduación



ESCUELA DE
INGENIERIA QUIMICA

C.c.: archivo



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

El Director de la Escuela de Ingeniería Química Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía, M.Sc. Después de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el trabajo de graduación del estudiante **José Abel Lima Godínez** titulado: **“EVALUACIÓN DEL EFECTO QUE GENERAN DOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE AZÚCAR BLANCO (PROCESO BLANCO DIRECTO Y PROCESO BLANCO CRISTAL) SOBRE EL COLOR DEL AZÚCAR PRODUCIDA EN UN INGENIO AZUCARERO GUATEMALTECO”**, procede a la autorización del mismo, ya que reúne rigor, coherencia y calidad requeridos.


Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía M.Sc.
DIRECTOR ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



Guatemala, junio de 2,009

C.c.: archivo

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.227.2009

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: **EVALUACIÓN DEL EFECTO QUE GENERAN DOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE AZÚCAR BLANCO (PROCESO BLANCO DIRECTO Y PROCESO BLANCO CRISTAL) SOBRE EL COLOR DEL AZÚCAR PRODUCIDA EN UN INGENIO AZUCARERO GUATEMALTECO**, presentado por el estudiante universitario **José Abel Lima Godínez**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A large, stylized handwritten signature in black ink, consisting of a large loop at the top and a vertical stroke at the bottom.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, junio de 2009

/cc

AGRADECIMIENTOS A:

DIOS

Por ayudarme para culminar este trabajo, dándome la fortaleza, perseverancia y entendimiento necesario.

MI MADRE

María de Jesús Godínez Cardoza de Lima, por su esfuerzo para darme la oportunidad de estudiar y por la ayuda y apoyo que siempre me brindó para poder culminar mis estudios.

MI ABUELA

María Cornelia Cardoza Juarez (†), por su ayuda, esfuerzo y dedicación en mi formación.

MI ESPOSA

Claudia Elena, por su comprensión, ayuda y apoyo incondicional para alcanzar este logro.

MIS HIJOS

María Alejandra y José Rodrigo, por ser la principal razón de mi esfuerzo para terminar este trabajo de graduación y para seguir adelante con nuevos retos.

MI ASESOR

Lic. Oscar Benedicto Monzón Barrientos, por su apoyo y ayuda para culminar este trabajo.

INGENIO MAGDALENA

Por permitirme realizar mi trabajo de graduación.

ACTO QUE DEDICO A:

DIOS

Por darme la vida y la oportunidad de culminar mis estudios.

MI MADRE

María de Jesús Godínez Cardoza de Lima, por ser el pilar y el ejemplo a seguir en mi vida. Sé que este logro también es para ella una gran felicidad.

MI ABUELA

María Cornelia Cardoza Juarez (†), fue mi ejemplo de humildad, honradez, trabajo y esfuerzo. Aunque hoy no está presente, sé que comparte conmigo este logro.

MI ESPOSA

Claudía Elena Oliva Sagastume, por compartir su vida conmigo y permitirme que en familia alcancemos este logro. Ella me ha dado el ánimo para seguir adelante y culminar este trabajo.

MIS HIJOS

María Alejandra y José Rodrigo, son el mayor regalo y felicidad que Dios me ha dado.

MIS HERMANOS

Rita Lisseth y Cesar Augusto, sé que para ellos también es motivo de alegría este logro.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
GLOSARIO.....	V
RESUMEN.....	VII
OBJETIVOS.....	IX
INTRODUCCIÓN.....	XI

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Color.....	1
1.1.1. Definición de color de azúcar ICUMSA.....	1
1.1.2. Substancias que causan color.....	1
1.1.2.1. No-azúcares coloreados existentes en la caña.....	2
1.1.2.1.1. Clorofila.....	2
1.1.2.1.2. Xantofila.....	3
1.1.2.1.3. Caroteno.....	3
1.1.2.1.4. Antocianina.....	4
1.1.2.2. No-azúcares de la caña que pueden desarrollar color.....	5
1.1.2.2.1. Polifenoles.....	6
1.1.2.2.2. Aminocompuestos.....	7
1.1.2.3. No-azúcares coloreados productos de la descomposición del azúcar.....	8
1.1.2.3.1. Caramelo.....	9
1.1.2.3.2. Productos de la descomposición del azúcar.....	11
1.2. Proceso blanco directo.....	15
1.2.1. Definición proceso blanco directo.....	15
1.2.2. Etapas proceso blanco directo.....	15
1.2.2.1. Sulfitación.....	15
1.2.2.1.1. Sulfitadores.....	16

1.2.2.2. Alcalización.....	16
1.2.2.3. Calentamiento.....	16
1.2.2.4. Sedimentación y Decantación.....	17
1.2.2.5. Clarificación de meladura.....	17
1.2.3. Descripción del Proceso Cristal.....	17
2. MARCO METODOLÓGICO	
2.1. Métodos de muestreo y análisis estadístico.....	19
2.1.1. Método de Muestreo.....	20
2.1.2. Análisis Estadístico.....	20
2.2. Métodos de análisis químico.....	21
2.2.1. Brix refractométrico.....	22
2.2.2. Color del azúcar (ICUMSA 4).....	22
2.3. Recursos.....	24
2.4. Métodos matemáticos.....	25
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	
3.1. Resultados.....	27
3.2. Discusión de resultados.....	32
CONCLUSIONES.....	35
RECOMENDACIONES.....	37
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39
BIBLIOGRAFÍA.....	41

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Gráfica del comportamiento del azúcar producido a partir del proceso blanco directo y el proceso blanco cristal.	29
2	Gráfica del modelo matemático potencial	30
3	Gráfica del modelo matemático lineal comportamiento del Color ICUMSA del Azúcar Cristal vs Color ICUMSA del Azúcar Blanco agrupado por rango de color.	31

TABLAS

I	Toma de datos (Diseño experimental)	21
II	Costo de análisis	24
III	Resultados de color ICUMSA por día de producción	27
IV	Color ICUMSA promedio del azúcar blanco y el azúcar cristal para 3 distintos rangos de color ICUMSA del azúcar cristal	28

GLOSARIO

- BRIX** Es el porcentaje en peso de sólidos que se encuentran disueltos en una solución tomando de referencia el agua y una solución de sacarosa al 10% peso / peso.
- ICUMSA** International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis.

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó el color ICUMSA del azúcar blanco producido a partir del jugo primario (Proceso blanco cristal) y a partir del jugo diluido (Proceso blanco directo). Dicha evaluación se realizó con el fin de establecer la diferencia de color del azúcar blanco producido a partir del uso de los distintos jugos del tandem de molinos. Debemos recordar que el parámetro “color” es base para la clasificación de los tipos de azúcares y sus precios en Guatemala.

Luego de analizar los resultados obtenidos del color ICUMSA del azúcar obtenido con ambos procesos de producción de azúcar blanco, se concluyó que el proceso blanco cristal permite obtener un azúcar de bajo color, sin recurrir a un proceso de semi-refinación. Además, se obtuvo un modelo matemático que relaciona el color del azúcar producido a partir de un proceso blanco directo en función del color del azúcar producido a partir de un proceso cristal.

OBJETIVOS

General:

Evaluar la diferencia del color del azúcar producido a partir de un proceso blanco directo y de un proceso cristal.

Específicos:

1. Determinar los colores del azúcar y el nivel de diferencias entre el resultante en el proceso blanco directo y el proceso cristal.
2. Proponer un modelo matemático que relacione el color del azúcar producido a partir de un proceso blanco directo en función del color del azúcar producido a partir de un proceso blanco cristal.

INTRODUCCIÓN

La industria azucarera guatemalteca es de suma importancia dentro de la economía del país. Además, posee un lugar importante dentro del grupo de productores de azúcar en el mundo.

El proceso de globalización mundial no ha sido ajeno a esta industria, es por ello que, se busca optimizar y mejorar los procesos para obtener productos de calidad que satisfagan las exigencias del consumidor, y permitan competir en otros mercados.

El azúcar blanco que se consume en Guatemala, en su mayoría, es obtenido a partir de un proceso de azúcar conocido como blanco directo. Es de suma importancia para la recuperación de sacarosa que la eficiencia en el proceso de extracción de jugo de caña sea la mayor posible, pero a una mayor eficiencia en la extracción, ocurre un aumento en la cantidad de impurezas en el jugo de caña; es decir que, mientras mas sacarosa se extraiga, mayor será la proporción de materiales indeseables que acompañen a la sacarosa, lo cual complica el proceso de fabricación de azúcar.

Con el propósito de obtener una mayor calidad del azúcar blanco a partir de un proceso de azúcar blanco directo, Ingenio Magdalena, ubicado en la Democracia, Escuintla, ha separado el jugo obtenido en la extracción del tandem, utilizando únicamente el jugo primario (jugo del primer molino) para producir azúcar blanco, y el jugo del molino 2 en adelante para producir azúcar crudo; esto permitiría disminuir la cantidad de impurezas que acompañan al

jugo del primer molino o jugo primario, para mejorar la clarificación y de esta manera, obtener un mejor color de azúcar.

La producción de azúcar blanco, a través de un proceso blanco directo, utilizando únicamente el jugo primario del tandem de molinos, se conoce como **proceso cristal**, y el azúcar que se obtiene se denomina **azúcar cristal**.

Es importante hacer notar que este ingenio, pretende producir todo su azúcar blanco, a partir de jugo de primario, y el jugo diluido utilizarlo para producir azúcar crudo; con ello se podría producir ambas calidades de azúcar simultáneamente durante toda la zafra. A la vez, en la línea de azúcar crudo se han dejado instalados los equipos e instalaciones necesarias para llevar a cabo un proceso de blanco directo.

En este estudio se analizan tres meses del período de zafra 1999-2000, durante los cuales se produjo azúcar blanco, utilizando ambas líneas de producción (línea de azúcar crudo y línea de azúcar cristal). Es importante hacer notar que la diferencia entre ambos procesos productivos en este período, reside en el jugo utilizado para la elaboración del azúcar. Durante dicho período se produjo azúcar blanco con ambas líneas, debido a que la capacidad de la línea cristal no era suficiente para cumplir con la producción requerida durante la zafra. Por fines prácticos se hablará en adelante de azúcar blanco, el azúcar producido a partir del proceso blanco directo con jugo del molino 2 en adelante en la línea de producción de azúcar crudo y azúcar cristal, el azúcar blanco producido a partir del proceso blanco directo con jugo del primer molino, el cual se mencionará como proceso cristal.

No es objeto de este estudio el hacer una análisis económico del proceso productivo, sino hacer una comparación de la calidad del producto final (azúcar

blanco), luego de separar el jugo del primer molino en el proceso de extracción, tomando como base de comparación el color del azúcar.

Se hace una comparación del color del azúcar (unidades ICUMSA) obtenido a partir de cada una de los dos procesos evaluados, para determinar cuál de los dos procesos permite obtener un producto de menor color, y cuál es la relación que existe entre el color del azúcar blanco y el azúcar cristal.

1 MARCO TEÓRICO

1.1 Color

1.1.1 Definición de color de azúcar ICUMSA

Es el valor del índice de absorbancia multiplicado por 1000 a una longitud de onda de 420 nanómetros. Los valores resultantes se designan como unidades ICUMSA (U.I.). El índice de absorbancia se debe utilizar para cualquier cálculo de la eficiencia de la decoloración, así como para la comparación de los resultados de color. Asimismo, se debe evitar el empleo de la transmitancia para el cálculo y comparación, debido a la relación no lineal entre la transmitancia y la concentración.

1.1.2 Substancias que causan color

La naturaleza general de los no azúcares orgánicos que son responsables del color de la caña y su jugo crudo, ha sido hasta cierto grado divulgada en la literatura durante las últimas décadas. Estos materiales coloreados provienen de : (1) las sustancias de la caña que ya tenían color en su forma original; (2) 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; y (3) los compuestos coloreados que se forman durante el proceso por descomposición de algunos productos y por otras reacciones químicas. Aun cuando estas sustancias coloreadas se separan en tres grupos, están estrechamente relacionadas entre sí desde el punto de vista de las reacciones químicas que tienen lugar. La estructura química de algunas de estas materias colorantes es muy compleja y en ciertos casos difíciles de determinar, si bien varios textos describen métodos analíticos que pueden ser aplicados. Por otra parte, el desarrollo de los métodos cromatográficos durante los últimos años ha proporcionado nuevos procedimientos, y se

han reportado varios procedimientos en la separación de diferentes pigmentos.

1.1.2.1 No-azucares coloreados existentes en la caña

Si bien en la literatura se dan diversos nombres a las sustancias de color que existen en la caña, parece que éstas se pueden clasificar en cuatro tipos principales que son: clorofilas, xantofilas, carotenos y antocianinas. Los tres primeros pigmentos se encuentran en unos corpúsculos especiales de la planta llamados *plastidios*. Hay muchas clases de plastidios incoloros, desprovistos de pigmentos, se llaman *leucoplastidios*. Los cloroplastidios de color verde son los comunes. Se denominan cromoplastidios a los corpúsculos que tienen un color diferente del verde.

El cuarto pigmento, la antocianina, se encuentra en la célula vegetal o en la savia de muchas plantas, siendo el causante de los colores púrpura, azul y rojo. El color producido por los pigmentos depende de la concentración de ion hidrógeno en la savia. Cuando ésta es ácida el color es rojo y cuando es alcalina el color es azul.

1.1.2.1.1 Clorofila

La clorofila es la cromoproteína que forma la materia colorante verde las plantas. No es un solo pigmento, sino que consiste de dos pigmentos similares que han sido descritos como clorofila a y clorofila b. La clorofila tiene la fórmula empírica $C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$ y la clorofila b tiene una fórmula comparable $C_{55}H_{70}O_6N_4Mg$. Según Pringsheim, el magnesio

sostiene junta la molécula, dándole sus propiedades reaccionantes.

La clorofila forma una masa suave, insoluble en agua y en soluciones de azúcar pero soluble en alcohol, éter, álcalis y en otras sustancias; es de naturaleza coloidal. **Melchior** encontró que la clorofila estaba presente en forma de suspensión en el jugo de la caña, de ahí que se puede separar fácilmente durante el proceso. Sin embargo, sus experimentos mostraron que en las melazas no estaban presentes ni la clorofila ni sus productos de descomposición. Aparentemente forma compuestos incoloros con los iones férricos. Por las anteriores razones no tiene mucha importancia en el proceso de fabricación de azúcar.

1.1.2.1.2 Xantofila

La xantofila está estrechamente relacionada con la clorofila y constituye el pigmento amarillo que se presenta en las plantas. Su fórmula es $C_{40}H_{56}O_2$. Al igual que la clorofila, es insoluble en agua y en soluciones de azúcar, de ahí que no tenga importancia en el proceso de fabricación.

1.1.2.1.3 Caroteno

Los carotenos también están estrechamente asociados con las clorofilas e igualmente son pigmentos amarillos. Su fórmula es $C_{40}H_{56}$, tanto para alfa-caroteno como para beta-caroteno. Son insolubles en agua y en soluciones de azúcar, de ahí que no tengan importancia práctica en el jugo de la caña.

1.1.2.1.4 Antocianina

Antocianina es un término general para el grupo de sustancias rojas, azules y violetas que se encuentran en las plantas. Según una definición, la antocianina es el pigmento soluble de las flores rojas y azules y se compone de antocianidina combinada con glucosa y otros azúcares.

Las antocianinas son solubles en agua, perteneciendo al grupo de compuestos orgánicos clasificados como glucósidos. Con el ácido clorhídrico concentrado al 10% se vuelven de color violeta rojizo.

Geerlings afirma que la antocianina está prácticamente ausente en las variedades de caña blanca o amarilla, pero que es muy evidente en las cañas de color oscuro. Como es soluble en agua, entra en el jugo al ser molida la caña. Al añadirse cal toma un color verde oscuro, pero no se precipita, excepto en solución fuertemente alcalina.

Zerban y Freeland señalaron que la antocianina pertenece al grupo de los polifenoles y que se oscurece al combinarse con las sales de hierro. La importancia de antocianina que no es eliminada en el proceso se acentúa a causa de su reacción con el hierro. La carbonatación separa completamente la antocianina y la sulfitación parcialmente lo hace, dependiendo esto de la cantidad de precipitado que se forme; en cambio el ácido sulfúrico sólo da lugar a una decoloración temporal.

Melchor indica que la antocianina puede o no existir en la caña, así como también que hay diversas variedades que tiene propiedades diferentes. Se hace resaltar la importancia que tiene determinar de qué manera la antocianina reacciona con las sales férricas y con las álcalis y se señala que en algunas cañas la antocianina no da reacción de color con el cloruro férrico, a diferencia de antocianina de otra clase. Las variedades POJ 2878 y 2883 contienen poca antocianina, pero la POJ 2961 y la 2952 parece que la poseen en mayor cantidad. Ese investigador dice después que la antocianina y otros polifenoles se concentran en el punto de crecimiento de la planta y que se introducen en el jugo cuando al cortar la caña se le quita muy poca porción de punta.

Barrer y Strong han preparado antocianinas puras por análisis cromatográfico: Se utilizó una columna de Al_2O_3 (alumina) activado, habiéndose desarrollado una banda púrpura en la capa superior, y debajo de ésta una banda azul brillante.

1.1.2.2 No-azúcares de la caña que pueden desarrollar color

Han sido descritos numerosos no-azúcares incoloros que se encuentran en la caña, los que, por subsecuente reacción o combinación con otras sustancias, forman materias colorantes. Probablemente los más significantes de tales materiales pueden clasificarse en dos grupos generales: polifenoles y aminocompuestos.

1.1.2.2.1 Polifenoles

Los polifenoles existentes en la caña de azúcar son interesantes a causa de que reaccionan particularmente con el hierro y el oxígeno para dar origen a compuestos de color oscuro, especialmente en soluciones alcalinas. Ya Zerban se refirió a los polifenoles en la caña. Entre ellos están incluidos el tanino, derivado del ácido protocatéquico, los hidroxilos fenólicos de la antocianina en la corteza, y la “sacaretina” en la fibra de la caña. Además, las huminas y melanoidinas de la caña también contiene 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.

Entre las primeras referencias que se encuentran en la literatura, Greerlings menciona la sacaretina, polifenol que se encuentra en la fibra, que no se separa por el agua hasta que la solución se vuelve alcalina. Entonces, de incolora pasa a un color amarillo, extrayéndose lentamente. Se decolora otra vez cuando la solución se vuelve neutra o ácida, de ahí que cause poca dificultad. En el jugo crudo se adhiere a las partículas de bagazo, por lo que puede ser eliminada durante la clarificación.

Schneller comentó la reacción que se efectúa entre los polifenoles, que se encuentran en las yemas y puntas de la caña, e indicios de hierro, que es el causante de las sustancias oscuras en el jugo. Este investigador razonó que, cuando la sacaretina en combinación con el hierro causa un

color oscuro, hay otro constituyente de la caña, el tanino, que puede reaccionar más fácilmente, debido a que es soluble tanto en el agua como en el jugo. En otras palabras la presencia de tanino o de otros polifenoles similares solubles en agua puede explicar el color oscuro de los productos de la caña.

Posteriormente, Zerban y Freeland efectuaron investigaciones sobre la misma materia y subrayaron la importancia de los polifenoles y del color verde que forman con el hierro disuelto proveniente del material de los molinos. Inicialmente el hierro está en estado ferroso, pero cambia rápidamente, debido a que simultáneamente están presentes en el jugo enzimas oxidantes. La presencia de oxidasa, peroxidasa y tirosinasa, en conexión con los polifenoles y el hierro, explica los variados colores que puede tomar el jugo crudo de la caña. En ausencia de hierro el jugo tiene color café por su exposición a aire, pero si hay hierro presente aumenta entonces cada vez más a verde.

La exposición química de las diferentes reacciones entre los polifenoles y el hierro puede buscarse en los textos de química orgánica. Ahí se pueden ver los cambios en la estructura molecular, señalándose los compuestos verde, café y de otros colores.

1.1.2.2.2 Aminocompuestos

Existen en el jugo de la caña unos pocos centésimos del 1% de nitrógeno, estando cerca de la mitad en forma de

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. Wiggins y Williams en una reciente investigación, encontraron en el jugo de la caña los aminoácidos glicina, alinina, valina y leucina. Estos productos tienen cierta importancia, debido a que reaccionan con las pequeñas cantidades de azúcares reductores presentes formando compuestos coloreados.

A partir de los trabajos de Payne se determinó la naturaleza de la distribución del nitrógeno y sus compuestos en melazas de caña de Hawai. Este autor llegó a la conclusión de que alrededor del 34% del nitrógeno está en forma muy compleja y el resto en forma de compuestos relativamente simples. De esta última porción cerca de la mitad puede catalogarse en grupos claramente caracterizados.

1.1.2.3 No-azúcares coloreados productos de la descomposición del azúcar

En el proceso de fabricación, tanto los azúcares como los no azúcares están sujetos a la acción del calor, de la variación del pH, de aire, del hierro (del equipo), de los reactivos químicos añadidos (por ejemplo, la cal), etc. Todos estos factores tienen un efecto diferente en lo que respecta al desarrollo de color. Algunos de los colores pueden ser revelados 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.

El tipo de estos compuestos coloreados es variable y entre ellos se incluyen los productos de caramelización y descomposición de los azúcares y los subsecuentes productos que se forman con otros compuestos. Como estas reacciones están inter-relacionadas, es algo difícil hacer cualquier separación en grupos particulares. Por ejemplo, la sacarosa se invierte en medio ácido, los azúcares reductores formados se descomponen por el calor, y en solución alcalina se efectúan reacciones con otras sustancias diferentes del azúcar, tales como los polifenoles, aminocompuestos, etc.

La naturaleza y extensión de estas diversas reacciones y los compuestos coloridos finales que se forman dependen de las condiciones involucradas. Los aspectos teóricos de tales reacciones pueden encontrarse en textos de reacciones químicas.

1.1.2.3.1 Caramelo

Cuando el azúcar es calentado por arriba de 156°C se forman un material de color oscuro llamando caramelo. Aparentemente esto es debido a las reacciones de deshidratación y condensación que se efectúan en los azúcares calentados. Los caramelos se pueden formar tanto de la sacarosa como de la glucosa y fructosa. La composición del caramelo depende de las condiciones de tiempo, temperatura y pH. En la práctica se evitan las altas temperaturas con objeto de prevenir o de reducir al mínimo la caramelización.

Zerban señala que el caramelo es una mezcla compleja de anhídridos y que pueden diferenciarse tres anhídridos que han sido llamados caramelano, carameleno y caramelito. En la literatura se encuentran diferentes opiniones sobre la fórmula empírica propia de estos materiales.

Ledon y Larrañeta efectuaron estudios espectrofotométricos sobre la formación de color en los azúcares y encontraron que al calentar estos durante 20 horas los colores desarrollados por la glucosa y la fructosa eran idénticos, pero que, bajo las mismas condiciones, eran siete veces más intensos que el de la sacarosa. Sus pruebas hicieron ver que los incrementos de temperatura no sólo aumentaban la cantidad de pigmento formado, sino que también afectaban la naturaleza de éste.

El efecto del pH fue más marcado que el de la temperatura, siendo el color diez veces mayor a un pH de 8.0 que a un pH de 5.9.

Por el calentamiento de la sacarosa se obtienen varios productos volátiles, tales como monóxido de carbono, bióxido de carbono, ácido fórmico, aldehído, acetona, acroleína, furfural, etc.

Por el calentamiento de la glucosa se forman de igual manera productos de destilación semejantes a los precedentes, siendo de color castaño el residuo de la

caramelización. Cuando la fructosa es calentada arriba de su punto de fusión, forma una masa amorfa de color amarillo.

Elbe describió la preparación del caramelo de sacarosa denominándolo dispersión coloidal de una sustancia húmica liofóbica. Explicó posteriormente que el material estaba formado por tres sustancias, siendo la primera una sustancia coloidal que por separación y coagulación se convertía en una masa infusible e insoluble de color café oscuro. Los otros dos materiales separados eran sustancias protectoras, incoloras, termalmente inestables, higroscópicas y solubles en ciertos solventes orgánicos. Cuando la sustancia coloidal estaba presente, las sustancias protectoras se volvían térmicamente estables y resistentes a la disolución.

Además de los derivados de la sacarosa, también pueden formarse caramelos, a partir de las pequeñas cantidades de glucosa y fructosa normalmente presentes. Los productos de caramelización de la glucosa sólida tienen la misma composición general que los de la sacarosa. De la fructosa se ha obtenido un caramelo.

1.1.2.3.2 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.

Geerlings, al comentar sobre estos productos de descomposición, señala el hecho de que la fructosa es la que se descompone más rápidamente, luego la glucosa y después la sacarosa. La coloración en soluciones ácidas no es tan pronunciada como en soluciones neutras. Sin embargo, al descomponerse los azúcares reductores en soluciones fuertemente alcalinas se forman compuestos de color oscuro. A bajas temperaturas la formación de color es menos intensa que a altas temperaturas. En este último caso, los productos de color café formados en la reacción tienen la desventaja de fragmentarse en productos secundarios de descomposición, los que causan una posterior inversión.

En condiciones alcalinas y bajo calentamiento prolongado, las hexosas forman diversos ácidos orgánicos. Zerban incluye en una lista el acético, fórmico, láctico, sacarínico, dihidroxibutírico y sus respectivas lactonas. Otros compuestos que han sido encontrados son formaldehídos, aldehído glicérico, dihidroxiacetona, metilglioxal, acetol y biacetil, y ácido glúcido. En adición a estas sustancias se forman materias colorantes oscuras tipo humina.

El oxígeno aumenta el color y los sulfitos y cianuros lo disminuyen.

Scallet y Gardener describieron el efecto de calentar soluciones de glucosa. Esto condujo a la formación de pequeñas cantidades de 5-hidroxi-metil-furfural, que es un precursor del color café causado por el calentamiento. Esos investigadores identificaron el material por medio de curvas de absorción del ultravioleta.

Vas determinó en diversas soluciones de azúcar el oscurecimiento debido al transcurso del tiempo y a la temperatura, así como la resultante caída del valor del pH. Bajo condiciones comparables, las soluciones de glucosa y de galactosa dan idénticas coloraciones; la fructosa da 15% mas color que la glucosa; y las soluciones de maltosa y lactosa eran 60% mas claras que las de glucosa. La sacarosa se descompone muy lentamente. Las mezclas de los componentes de los disacáridos dan idénticos colores a los de los monosacáridos.

En solución ácida se forman anhídridos de la glucosa y de la fructosa. Sattler y Zerban han identificado en las melazas el principal anhídrido de la fructosa, el diheterolevulosano I, que es un dianhídrido de la fructosa, el difructopiranososa. Hay una fuerte evidencia que éste se forma por dimerización del anhídrido de la 1, 2-fructopiranososa. Tal dimerización es una característica reconocida del azúcar y de los anhídridos. La glucosa, que es más estable que la fructosa, forma oligosacáridos que tienen de dos a siete unidades de glucosa.

Spengler y Todt han informado acerca de la descomposición del azúcar invertido por efecto del calor y en un medio alcalino, particularmente en lo que se refiere a la formación de color. Acompaña a esta formación de color la producción de ácidos orgánicos tales como el láctico y el fórmico. Se efectuaron determinaciones fotoeléctricas del color utilizando un colorímetro de Lange, aparato en donde los números de color indican el porcentaje de luz absorbida.

1.2 Proceso de blanco directo

1.2.1 Definición proceso blanco directo

El azúcar de un proceso blanco directo se cuece directamente a partir del jugo de caña concentrado, sin el paso intermedio de la fabricación de un crudo que se tenga que volver a fundir para su purificación o refinación posterior. Para producir azúcar blanco a partir de un proceso blanco directo, es necesario recurrir a un proceso más complejo que la simple defecación. Los procesos que utilizan sulfitación (SO_2) o carbonatación (CO_2) junto con la cal son los métodos más antiguos y mejor conocidos (de hecho, los únicos) en uso general. Los azúcares producidos por el proceso de carbonatación tienen una calidad más uniforme que los producidos por sulfitación, pero el costo es mucho mayor.

1.2.2 Etapas proceso blanco directo por sulfitación

1.2.2.1 Sulfitación

Los procesos de sulfitación están sujetos a casi tantas modificaciones como la defecación simple. Entre las variaciones pueden incluirse las siguientes: 1) modificación de la secuencia de adición de la cal y el SO_2 (primero la alcalización, primero la sulfitación, adición simultánea de la cal y el gas, procedimientos fraccionados); 2) modificaciones de la temperatura (sulfitación en caliente o en frío, calentamiento por etapas); y 3) adición de los reactivos (intermitente, continua, control ya sea manual o automática).

Dentro la formas de sulfitación que existen se pueden mencionar las siguientes: sulfitación en frío, sulfitación después de la alcalización, sulfitación en caliente.

1.2.2.1.1 Sulfitadores

Por lo general, el jugo mezclado frío se atomiza dentro de los altos tanques, cilíndricos y verticales, con un diámetro de 4 pies o más y posiblemente una altura de 15 pies, cuyas terceras partes superiores están equipadas con una serie de rejillas de madera dura, fabricadas con tabloncillos de 2 X 4 pies colocados de canto. El jugo entra por la parte superior

1.2.2.2 Alcalización

En esta etapa se añade la cal suficiente para neutralizar los ácidos orgánicos que contiene el jugo. Existen varias formas de añadir la cal, dentro de las cuales se pueden mencionar la circulación de la cal, alcalización intermitente y aplicación de cal como sacarato.

1.2.2.3 Calentamiento

La temperatura final a la que se calientan los jugos en la clarificación varía entre 194 y 238°F (90-115°C), a pesar que el procedimiento más común consiste en calentar el jugo hasta un punto ligeramente superior a la ebullición. Por lo general, se piensa que el sobrecalentamiento no resulta ventajoso y que las temperaturas ligeramente superiores a la ebullición, por ejemplo, 218°F(103°C) son las máximas admisibles para una buena práctica.

1.2.2.4 Sedimentación y decantación

El principal objetivo de la clarificación es eliminar la máxima cantidad de impurezas del jugo en la etapa más temprana del proceso que permitan las otras consideraciones del mismo, tales como la claridad y reacción del jugo claro. Existe una cantidad muy grande de dispositivos para separar el precipitado del jugo clarificado; el principio universalmente utilizado es el de sedimentación y decantación. Los dispositivos de decantación pueden ser discontinuos o continuos en cuanto a operación, sendo estos últimos los mas modernos. Dentro de los clarificadores continuos del tipo bandeja que se utilizan corrientemente para llevar a cabo la decantación, dentro los que se pueden mencionar el clarificador Dorr, el clarificador RapiDorr y el clarificador Graver.

1.2.2.5 Clarificación de meladura

También llamado proceso de clarificación del jarabe crudo. Se trata de un proceso de flotación que elimina la mayor parte de las impurezas insolubles en suspensión procedentes del jarabe espeso, el que pasa luego directamente a los tanques de suministro de los tachos al vacío, listo para la cristalización.

1.2.3 Descripción del proceso cristal

Es una variante del proceso de fabricación de azúcar blanco directo donde únicamente se hace uso del jugo del primer molino para fabricar el azúcar blanco.

2 MÉTODOS Y MATERIALES

En este estudio se analizan 3 meses del período de zafra 1999-2000, durante los cuales se produjo azúcar blanco, utilizando ambas líneas de producción (blanco directo y proceso cristal). Durante dicho período se produjo azúcar blanco con ambas líneas debido a que la capacidad de la línea cristal no era suficiente para cumplir con la producción requerida durante la zafra. El período de tres meses está comprendido entre los meses de enero y marzo de año 2,000; los días que se tomarán en cuenta para el análisis, serán aquellos en los cuales se produzca azúcar blanco simultáneamente en ambas líneas de producción, descartando todo aquel día dentro del período mencionado, en los cuales el azúcar que se produzca en una de las líneas no cumpla con un máximo de color ICUMSA de 300, parámetro máximo de color para el azúcar blanco estándar.

De acuerdo con el procedimiento que se ha establecido para el desarrollo de este trabajo, se incluyen en su orden los siguientes métodos de referencia:

2.1 Métodos de muestreo y análisis estadístico

Con base en estos métodos se llevó a cabo la toma de muestras en el área de envasado de producto terminado, y además la parte estadística, es decir, la media aritmética, desviación estándar y análisis de rechazo de los datos obtenidos.

2.1.1 Métodos de muestreo

Punto de muestreo:

Fueron tomadas muestras de azúcar en el envasado a la salida del secador rotatorio, de la siguiente forma:

- **Azúcar cristal:** Esta muestra se obtuvo del azúcar que se produjo a partir del proceso cristal, el muestreo se realizó a cada una de las plantas de masa primera obtenidas con este proceso. Cada planta tiene un volumen de 56.634 m^3 (2000 pies^3).
- **Azúcar blanco:** Esta muestra se obtuvo del azúcar que se produjo a partir del proceso de azúcar blanco directo, dado que la producción en esta línea se lleva a cabo con un tacho continuo, se tomaron muestras por cada 56.634 m^3 masa primera producidos, esto con el fin de tener la misma base de muestreo que la línea de azúcar cristal.

2.1.2 Análisis estadístico

Dado que se muestreo cada $56,634 \text{ m}^3$, es decir, cada una de las plantas de masa primera en el caso de la línea de azúcar cristal y en la línea de azúcar crudo cada $56,634$ de masa primera producida. Cabe mencionar que cada día de producción, dependiendo de la cantidad de caña molida, de la calidad de jugo obtenido en la molienda y de la calidad del color obtenido en las plantas, varía la cantidad de plantas que se tienen para análisis, es decir, se pudieron obtener únicamente una o hasta cinco

templadas en un mismo día. Se determinó un valor representativo por día, para lo cual fue necesario tomar la media y la desviación estándar de la misma. El análisis de rechazo de datos de las distintas corridas para obtener el dato representativo se llevó a cabo según referencia 1, p. 130. En la tabla I, se muestra cómo se piensa realizar la toma de datos para cada uno de los días en las dos líneas de producción.

Tabla I: Toma de datos (Diseño experimental)

Fecha	No. de templa	Color ICUMSA (U.I.)azúcar cristal	Medía color azúcar cristal (U.I.)	Desviación estándar azúcar cristal	Color ICUMSA (U.I.) azúcar blanco	Medía color azúcar blanco (U.I.)	Desviación estándar azúcar blanco
	1						
	2						
	3						
	4						
	5						

2.2 Métodos de análisis químico

Son todos los análisis refractométricos y volumétricos que se desarrollaron en este estudio.

2.2.1 Brix refractométrico¹

Cristalería y equipo:

- 1 Refractómetro automático, marca Rudolph, modelo J157.
- 1 Embudo
- 1 Papel filtro marca Whatman 91 o equivalente.
- 1 Beaker de 50 ml.

Procedimiento:

- 1) Filtrar la muestra, a través del papel filtro.
- 2) Verificar que la muestra a leer tenga una temperatura de 20°C o lo más cercano a ella.
- 3) Colocar la muestra en refractómetro.
- 4) Leer el brix indicado en el refractómetro.
- 5) El equipo corrige la lectura obtenida a la temperatura de referencia 20°C.

Cálculos:

Brix = Lectura refractométrica.

2.2.2 Color del azúcar blanco (ICUMSA)²:

Cristalería y equipo:

- 1 Espectrofotómetro. Con rango de medición de 330 – 950 nm, ancho de banda espectral de 5nm, precisión recomendada +/- 1nm
- 1 Membrana de filtración. Con poros de 0.45 µm, y diámetro de 47mm.

¹ ICUMSA. **Methods Book** (1994).

² ICUMSA. **Methods Book** (1994) GS2/3-1.

- 1 Refractómetro.
- 1 Balanza de laboratorio, con precisión de 0.1 g.

Reactivos:

Agua de dilución. Agua desmineralizada y a pH 7.

Procedimiento:

- 1) Homogenizar la muestra de azúcar.
- 2) Tomar 25 g de la muestra y mezclar con 25 g de agua de dilución, de esta manera preparamos una solución 1:1 en peso de azúcar y agua.
- 3) Filtrar al vacío la solución preparada, utilizando la membrana que se menciona anteriormente.
- 4) Remover burbujas de aire atrapadas, introduciendo un erlenmeyer que contenga la solución filtrada en un baño ultrasónico por un tiempo de 3 minutos.
- 5) Medir el brix de la solución filtrada utilizando un refractómetro.
- 6) Ajustar el pH de la solución filtrada a 7, utilizando para ello soluciones de hidróxido de sodio o de ácido clorhídrico (0.01N)
- 7) Filtrar a través de la membrana de 0.45 μm
- 8) Introducir solución filtrada en una celda cuadrada de absorción de 1cm de paso, habiéndose asegurado de las buenas condiciones de la celda y haciendo el respectivo lavado de la celda con la solución filtrada.
- 9) Ajustar el espectrofotómetro a 420 nm de longitud de onda.
- 10) Calibrar el espectrofotómetro con el agua de dilución, utilizándola como blanco.

11) Colocar la celda de absorción con la solución filtrada dentro del espectrofotómetro y determinar la absorbancia de dicha solución.

Cálculos:

Determinar ρ , según el brix de la solución, consultar tablas de referencia 5, sección SP-3, Tabla D.

$$U.I. = (Abs * 1000) / (L * \rho)$$

Donde:

Abs = Absorbancia de la solución.

L = Largo de la celda en centímetros.

ρ = Densidad de la solución de azúcar al vacío en g/ml.

2.3 Recursos

Para llevar a cabo el presente trabajo se tiene un presupuesto de Q.3,860.00, detallado de la siguiente manera:

- Análisis químico:

Tabla II: Costo de análisis

Método de Análisis	Costo Unitario (Q.)	Cantidad de análisis	Total costo (Q.)
Brix refractométrico	0.90	400	360.00
Color ICUMSA	2.00	400	800.00
Total			Q.1,160.00

Es importante hacer notar que el costo por análisis es sumamente bajo, dado que Ingenio Magdalena está aportando todo el equipo y personal para realizar dicho trabajo, únicamente se está considerando el valor las consumibles utilizados en los análisis, los cuales son básicamente membranas de filtración.

- Transporte y alimentación:

Durante el período que se realizará el estudio, se estima viajar cada semana y permanecer en las instalaciones del Ingenio durante la semana. El Ingenio Magdalena proporcionará alojamiento, por lo que, únicamente se considera el traslado al Ingenio Magdalena, lo cual tendrá un costo de Q. 50.00 por semana, es decir, un total de Q. 600.00 durante los tres meses.

En lo que respecta a alimentación, durante cada semana se están considerando 3 tiempos de alimentación durante los 5 días de la semana, dicha alimentación se realizará en las instalaciones del hotel del Ingenio Magdalena y el costo será de Q. 10.00, es decir un total de Q. 1,800.00.

- Papelería y útiles:

Se considera un gasto de Q.300.00 en lo que respecta a papelería y útiles para realizar el trabajo, lo cual incluye papel, tintas para impresión, etc.

2.4 Métodos matemáticos

Con los datos obtenidos se propondrá un modelo matemático que relacione el color ICUMSA obtenido en la línea crudo en función del color obtenido en la línea cristal, con el fin de predecir que color se podrá obtener en el la línea de azúcar crudo cuando se desea producir azúcar blanco en ambas líneas, como sucedió en el período sujeto a análisis.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Resultados

Tabla III: Resultados

Fecha	Azúcar Cristal Color ICUMSA	Azúcar Blanco Color ICUMSA	Diferencia Color ICUMSA
03-Ene-2000	226	260	34
04-Ene-2000	240	261	21
19-Ene-2000	252	280	28
20-Ene-2000	215	242	27
21-Ene-2000	239	277	38
22-Ene-2000	242	270	28
23-Ene-2000	270	286	16
25-Ene-2000	239	278	39
26-Ene-2000	224	261	37
27-Ene-2000	253	278	25
28-Ene-2000	260	293	33
29-Ene-2000	235	261	26
30-Ene-2000	277	300	23
31-Ene-2000	242	260	18
01-Feb-2000	270	296	26
07-Feb-2000	264	280	16
08-Feb-2000	225	262	37
09-Feb-2000	252	292	40
26-Feb-2000	270	298	28
28-Feb-2000	267	299	32
29-Feb-2000	268	291	23
03-Mar-2000	241	268	27
04-Mar-2000	271	300	29
05-Mar-2000	242	262	20
07-Mar-2000	235	255	20
08-Mar-2000	260	283	23
09-Mar-2000	269	299	30
10-Mar-2000	270	289	19
11-Mar-2000	239	267	28
12-Mar-2000	252	277	25
13-Mar-2000	270	299	29
14-Mar-2000	268	292	24
15-Mar-2000	253	292	38
16-Mar-2000	261	288	27
18-Mar-2000	228	247	19
19-Mar-2000	213	249	36
20-Mar-2000	158	177	19
21-Mar-2000	224	253	29
26-Mar-2000	250	278	28
27-Mar-2000	267	297	30

Tabla IV: Agrupando por rangos de color los resultados de la tabla III se tiene:

Rangos de color ICUMSA del azúcar cristal	Color de azúcar cristal promedio en ese rango	Color azúcar blanco promedio en ese rango
200 a 240	229	259
241 a 260	250	278
260 a 280	269	294

Figura 1. Comportamiento del color del azúcar producida a partir del proceso blanco directo y el proceso cristal

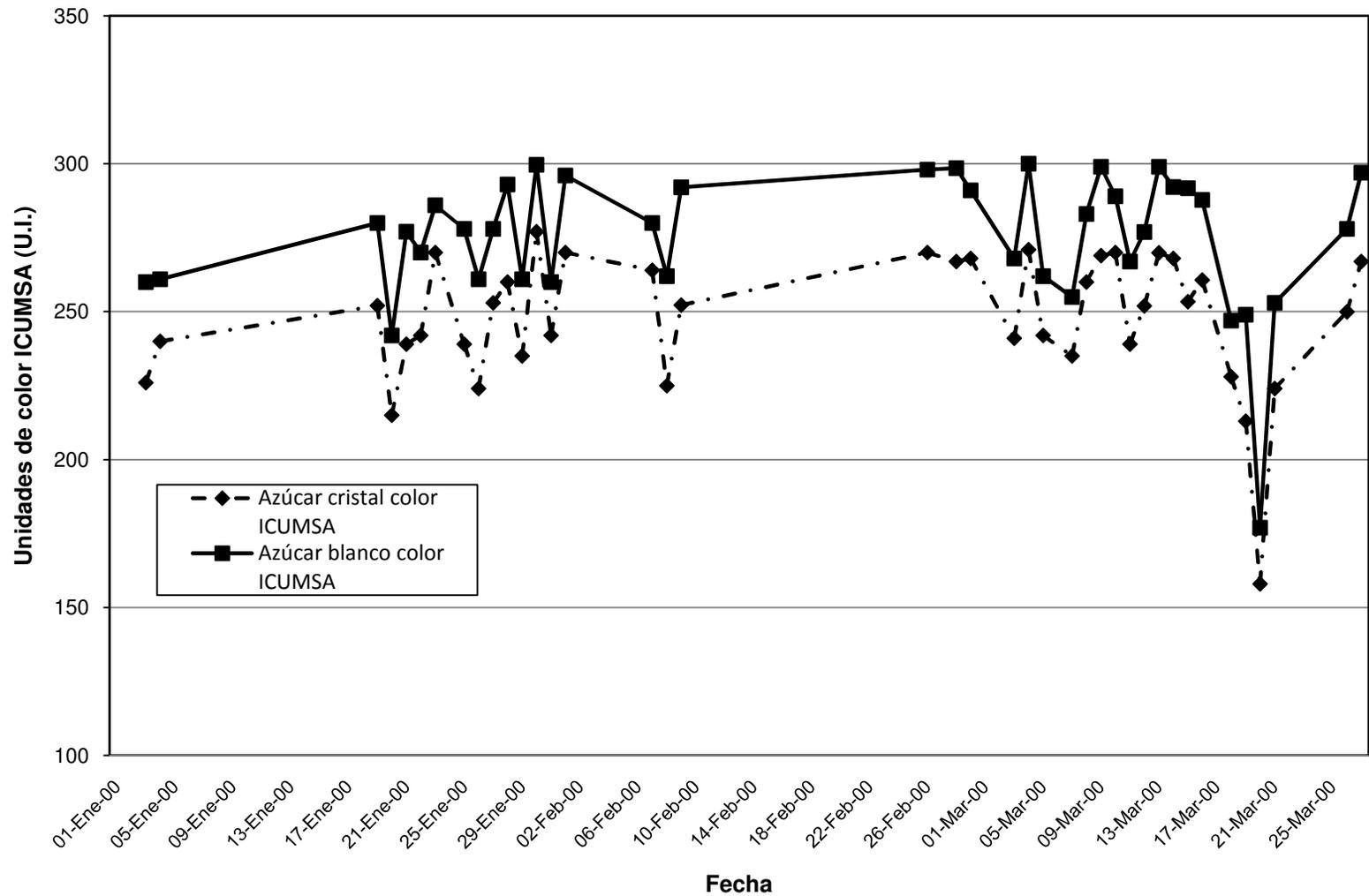


Figura 2. Modelo matemático potencial

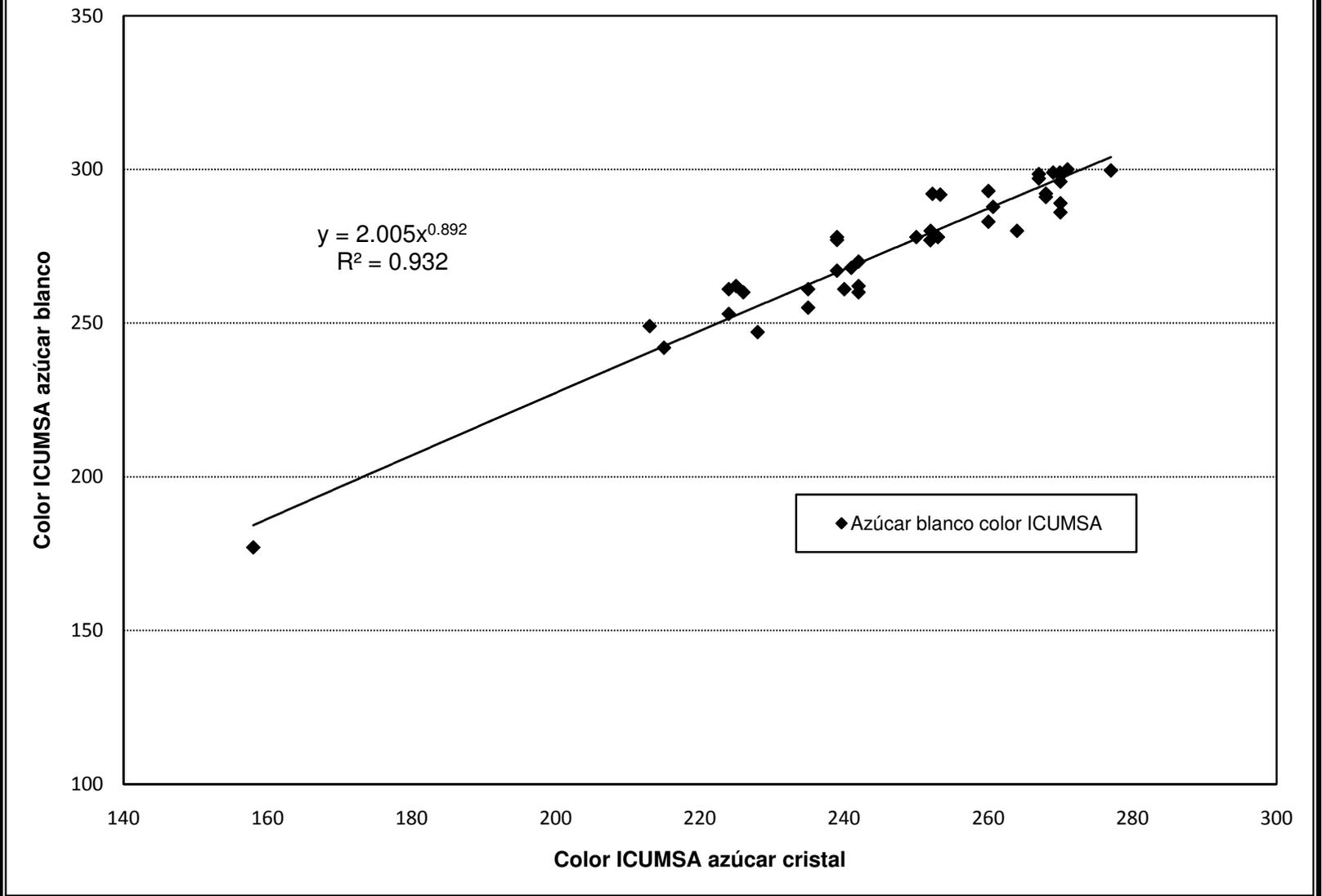
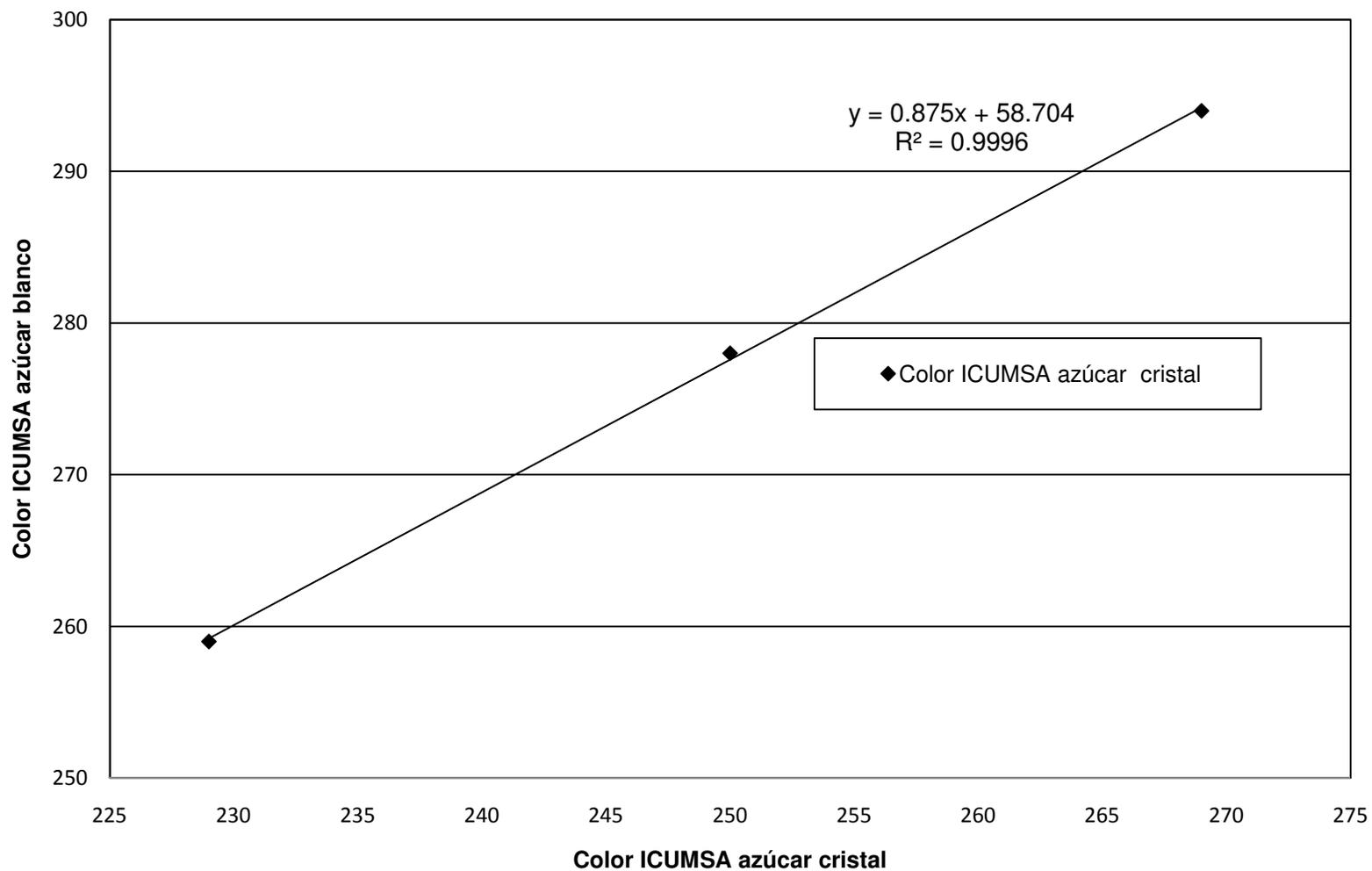


Figura 3. Modelo matemático lineal
Comportamiento del color ICUMSA del azúcar blanco vs
Color ICUMSA del azúcar cristal agrupado por rango de color



3.2 Discusión de resultados

De acuerdo con los resultados obtenidos, los cuales se presentan en la tabla II, se puede apreciar que el color ICUMSA del azúcar producida a partir del proceso blanco cristal, es menor que el obtenido a partir del proceso blanco directo. El color promedio de los días en los cuales se llevó a cabo el análisis fue de 275 U.I. para el azúcar blanco y 248 U.I. para el azúcar cristal, es decir, que la diferencia promedio de los del color obtenido a partir de los dos procesos fue de 27 U.I, lo cual significa un 10% de menor color ICUMSA obtenido en el azúcar cristal.

El color que se obtiene del azúcar producido a partir de los dos procesos de producción analizados, varía de forma considerable, es decir, que el color ICUMSA obtenido tanto en el azúcar blanco, como en el azúcar cristal presenta gran diferencia entre los diferentes días de producción y se puede apreciar una gran variabilidad del color obtenido.

Aunque es evidente que el color ICUMSA del azúcar cristal es menor que el del azúcar blanco, de la misma manera como varía el color ICUMSA en los dos procesos de producción, también se observa mucha variación entre la diferencia de color ICUMSA entre el azúcar blanco y el azúcar cristal. Esto se puede apreciar tanto en la tabla II, así como la figura 1.

El coeficiente de correlación que describe de mejor manera la relación entre el color del azúcar blanco en función del color del azúcar blanco es 0.93 y corresponde a un modelo matemático de

tipo potencial, del cual está expresado por la ecuación $y = 2.0052x^{0.8928}$, donde x es el color ICUMSA del azúcar cristal y y es el color ICUMSA del azúcar blanco. Este bajo coeficiente de correlación se debe a la dispersión de los datos que se obtuvieron, dada la diferencia del color ICUMSA del azúcar blanco y del azúcar cristal que se observa en los distintos días analizados. Es decir que, existe una baja correlación entre el color ICUMSA del azúcar blanco en función del color ICUMSA del azúcar cristal, lo cual se puede observar en la figura 2.

Ahora bien, relacionando los colores promedio observados por rangos de los colores de azúcar cristal y azúcar blanco se observa una muy baja dispersión de datos y el coeficiente de correlación que describe de mejor manera dicha relación es de 0.9996 y corresponde a un modelo matemático de tipo lineal, como se puede observar en la figura 3, el cual fue elaborado a partir de los datos de la tabla III. La ecuación que representa la relación de los colores ICUMSA promedio del azúcar blanco en función del azúcar cristal para los rangos de color ICUMSA establecidos está expresado por $y = 0.8755x + 58.704$, donde x es el color ICUMSA promedio del azúcar cristal y y es el color ICUMSA promedio del azúcar blanco. El coeficiente de correlación del modelo matemático, así como la figura 3, permiten observar un comportamiento bastante predecible para los datos promedio de los rangos de color establecidos, lo cual, permite establecer una muy buena predicción del comportamiento del color ICUMSA del azúcar blanco en función del color ICUMSA del azúcar cristal.

CONCLUSIONES

- 1 El color ICUMSA del azúcar blanco es mayor que el del azúcar cristal.
- 2 La diferencia entre el color ICUMSA del azúcar blanco y del azúcar cristal no mantienen una diferencia constante, debido a los altibajos operativos de los procesos.
- 3 El modelo que describe el color ICUMSA del azúcar blanco en función del azúcar cristal, posee una baja correlación consecuencia de los altibajos operativos.
- 4 La producción de azúcar cristal presenta menor dificultad operativa para la obtención de un menor color del azúcar comparada con la dificultad operativa de la producción de azúcar blanco del mismo color, debido a que el jugo del molino 1 tiene mayor pureza y menor color que el jugo del molino 2 en adelante, esto facilita la obtención de un menor color de azúcar.
- 5 La mejora operativa en la producción de azúcar cristal permitirá al consumidor recibir un azúcar de menor color que el azúcar blanco, sin llegar el azúcar cristal a ser un azúcar refino, a un precio menor que el precio del azúcar refino.

- 6 Se puede predecir, según los rangos de color de la producción, el color de un azúcar a partir del otro y conocer, según esta predicción, el impacto económico que tienen las decisiones del tipo de azúcar a producir, así como las consecuencias económicas de tener procesos con altibajos operativos tanto de materia prima como de operación industrial.

RECOMENDACIONES

- 1 Analizar otras variables que afecten el color ICUMSA del azúcar, como por ejemplo, alguno de los pasos involucrados en el proceso de clarificación.
- 2 Analizar la variación en el color ICUMSA del azúcar que podrían causar otros procesos distintos a la clarificación, como por ejemplo la evaporación.
- 3 Mantener un monitoreo de los parámetros que influyen en la obtención del color del azúcar para establecer los rangos operativos mas adecuados y de mayor eficiencia.
- 4 Analizar y establecer el impacto en la cantidad de azúcar que se dejó de producir como consecuencia de la disminución de color.
- 5 Realizar un estudio de mercado para conocer la aceptación del color del azúcar cristal, comparado con el color del azúcar blanco tanto a nivel industrial como de hogares, principalmente en las áreas urbanas y rurales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Pieter HONIG. **Principios de Tecnología Azucarera**. México: Editorial Continental, 1969. p. 205
2. INTERNATIONAL COMMISSION FOR UNIFORM METHODS OF SUGAR ANALYSIS (ICUMSA) . **Methods Book**. England: British Sugar Technical Centre, 1994. GS2/3-2
3. INTERNATIONAL COMMISSION FOR UNIFORM METHODS OF SUGAR ANALYSIS (ICUMSA) . **Methods Book**. England: British Sugar Technical Centre, 1994. GS2/3-1.

BIBLIOGRAFÍA

1. AYRES, Gilbert. *Análisis Químico Cuantitativo*. 2da edición. México: Editorial Harla, 1974.
2. HUGOT, E. *Handbook of Cane Sugar Engineering*. 2da edición. Holanda: Editorial Elsevier, 1979.
3. CHEN, James. *Cane Sugar Handbook*. 11a edición. USA: Editorial Wiley Interscience, 1985.
4. HONIG, Pieter. *Principios de Tecnología Azucarera*. México: Editorial Continental, 1969.