



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

**DETERMINACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE CARBÓN ACTIVADO Y TIERRA
DIATOMACEA, PARA LA REMOCIÓN DE COLOR DE LICORES DE AZÚCAR DERRETIDA
EN LA FABRICACIÓN DE AZÚCAR REFINO**

José Emilio Zaparolli Zetina

Asesorado por el Ing. Estuardo Edmundo Monroy Benítez

Guatemala, enero de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE CARBÓN ACTIVADO Y TIERRA
DIATOMACEA, PARA LA REMOCIÓN DE COLOR DE LICORES DE AZÚCAR DERRETIDA
EN LA FABRICACIÓN DE AZÚCAR REFINO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JOSÉ EMILIO ZAPAROLLI ZETINA

ASESORADO POR EL ING. ESTUARDO EDMUNDO MONROY BENÍTEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, ENERO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma de Martini
EXAMINADOR	Ing. José Manuel Tay Oxorom
EXAMINADOR	Ing. Federico Guillermo Salazar Rodríguez
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**DETERMINACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE CARBÓN ACTIVADO Y TIERRA
DIATOMACEA, PARA LA REMOCIÓN DE COLOR DE LICORES DE AZÚCAR DERRETIDA
EN LA FABRICACIÓN DE AZÚCAR REFINO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha el 4 de agosto de 2009.


José Emilio Zaparolli Zetina

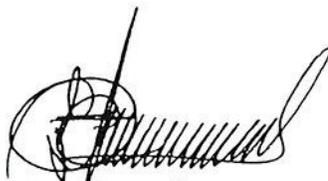
Guatemala, 28 de mayo de 2012

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Álvarez:

Por este medio hago constar que he asesorado y revisado el Informe Final del estudiante: **JOSÉ EMILIO ZAPAROLLI ZETINA**, quien se identifica con el número de carnet: **2000-11801**, titulado, **"DETERMINACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE CARBÓN ACTIVADO Y TIERRA DIATOMACEA, PARA LA REMOCIÓN DE COLOR DE LICORES DE AZÚCAR DERRETIDA EN LA FABRICACIÓN DE AZÚCAR REFINO"**. El cual está destinado a presentarse como su Trabajo de Graduación, por lo que considero que está listo para continuar con los procedimientos de aprobación de la Escuela de Ingeniería Química.

Atentamente,



Ing. Estuardo Edmundo Monroy Benítez

Estuardo Monroy Benitez
Ingeniero Químico
Colegiado No. 446



Guatemala, 07 de agosto de 2012
Ref. EI.Q.TG-IF.041.2012

Ingeniero
Victor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-163-2009-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: José Emilio Zaparolli Zetina

Identificado con número de carné: 2000-11801

Previo a optar al título de INGENIERO QUÍMICO.

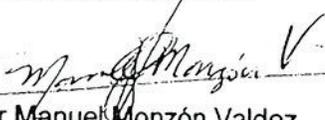
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

DETERMINACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE CARBÓN ACTIVADO Y TIERRA DIATOMACEA, PARA LA REMOCIÓN DE COLOR DE LICORES DE AZÚCAR DERRETIDA EN LA FABRICACIÓN DE AZÚCAR REFINO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Estuardo Monroy**.

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. Víctor Manuel Monzón Valdez
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





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, **JOSÉ EMILIO ZAPAROLLI ZETINA** titulado: "**DETERMINACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE CARBÓN ACTIVADO Y TIERRA DIATOMACEA, PARA LA REMOCIÓN DE COLOR DE LICORES DE AZÚCAR DERRETIDA EN LA FABRICACIÓN DE AZÚCAR REFINO**". 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, enero 2013



Cc: Archivo
VMMV/ale



DTG. 025.2013

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: **DETERMINACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE CARBÓN ACTIVADO Y TIERRA DIATOMACEA, PARA LA REMOCIÓN DE COLOR DE LICORES DE AZÚCAR DERRETIDA EN LA FABRICACIÓN DE AZÚCAR REFINO**, presentado por el estudiante universitario José Emilio Zaparolli Zetina, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 28 de enero de 2013.

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por la vida y sus riquezas.
Mi madre	Rosa Cetina, por su amor incondicional y ejemplo.
Mi padre	Enrique Zaparolli, por ser un padre e ingeniero ejemplar.
Mis hermanos	Pablo, Denisse, Juan Carlos, Michelle, Diego, Isabelle, Anna y Monserrat, por su apoyo y paciencia.
Mis tíos	Nora Zaparolli, Olga Cetina, Ruth Cetina y Julio Cetina, por todo su cariño.
Mis amigos	Mariano Hernández, Francisco Vides, Pedro Cordón, Mauricio Castillo, Alfonso Alburez, Julio Vargas, Tony Mezger, Jorge López, Francisco Aldana, Rosa López, Manfredo Valdés, Jonathan de León, Roberto Garnica, Meyling León, Carmela Enriquez, Victor Gallardo, Bernal Aguilar, Franty Miranda, Fausto Escobar, Francisco Paz, José Larrañaga y Héctor Sagastume.

Mis sobrinos

Carlos Enrique, Denisse, Juan Pablo, Marco, Paola, Lourdes, Fátima, Stephan, William, Cecilia, Jess, Jacobo, Rebeca, Josh, Isa y los que vienen.

Mi novia

Tatjana Rengel, por inspirarme.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por darme la capacidad y la oportunidad.
Mi madre	Rosa Cetina, por su ejemplo y apoyo.
Colaboradores	De los ingenios Trinidad, Pantaleón y en especial Concepción por enseñarme y compartir sus conocimientos.
Ingenieros	Rodolfo García, José Godoy, Fausto Escobar, por explotar mis habilidades y conocimientos. Y por su amistad.
Asesor	Ing. Estuardo Monroy, por asesorarme y creer en mí.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Proceso de fabricación de azúcar	3
2.1.1. Entrada o transporte de la caña de azúcar	3
2.1.2. Molienda	3
2.1.3. Clarificación	4
2.1.4. Evaporación	4
2.1.5. Cristalización	5
2.1.6. Separación o centrifugación	5
2.1.7. Refinado	6
2.1.8. Secado	6
2.1.9. Envasado	6
2.2. Refinación del azúcar de caña y color	7
2.2.1. Tipo I	11
2.2.2. Tipo II	11
2.2.3. Tipo III	12
2.2.4. Tipo IV	13

2.3.	La decoloración y su mecanismo	13
2.3.1.	Resinas de intercambio iónico, resinas poliestirénicas.....	14
2.3.2.	Carbón granulado y pulverizado	15
2.3.2.1.	Carbón animal	16
2.3.2.2.	Carbonatación	16
2.3.2.3.	Fosfatación	17
2.4.	La decoloración con adsorbentes de carbón	17
2.4.1.	Historia del carbón activado.....	17
2.4.2.	Importancia de la química superficial de los carbones activados.....	21
2.4.3.	Carbón activado pulverizado	26
2.5.	Filtración	27
2.5.1.	Diatomeas	28
2.5.1.1.	Clasificación.....	29
2.5.1.2.	Forma y función	30
2.5.1.3.	Reproducción.....	32
2.5.1.4.	Nutrición	32
2.5.1.5.	Hábitat	33
2.5.1.6.	Importancia económica y ecológica	34
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	37
3.1.	Variables	37
3.2.	Localización	38
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	38
3.4.	Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería y materiales)	38
3.4.1.	Equipo	38
3.4.2.	Cristalería	38

3.4.3.	Reactivos	39
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	39
3.5.1.	Disolución del derretido.....	39
3.5.2.	Análisis e adsorbancia y cálculo de color	39
3.6.	Análisis estadístico	41
3.6.1.	Análisis gráfico.....	41
3.6.2.	Análisis de regresión.....	41
3.6.3.	Análisis de varianza	42
3.7.	Recolección y ordenamiento de la información.....	42
3.7.1.	Porcentaje de decoloración en el licor filtrado	44
3.7.2.	Datos calculados.....	44
3.7.3.	Análisis gráfico.....	50
3.7.4.	Análisis de regresión.....	53
3.7.5.	Análisis de varianza	54
4.	RESULTADOS.....	57
4.1.	Promedio de porcentaje de decoloración licor filtrado	58
4.2.	Ecuación de regresión	58
5.	INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	59
	CONCLUSIONES.....	61
	RECOMENDACIONES.....	63
	BIBLIOGRAFÍA.....	65
	APÉNDICE	67

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Composición química de la caña.....	8
2.	Comportamiento de colores en zafra 2011	9
3.	Porcentaje de decoloración	10
4.	Colorantes iónicos/aromáticos.....	11
5.	Colorantes no iónicos / aromáticos.....	12
6.	Colorantes iónicos/ no aromáticos	12
7.	Resinas de intercambio iónico.....	14
8.	Resinas Poliestirénicas.....	15
9.	Esquema de un carbón granulado y pulverizado.....	16
10.	Poros de un carbón activado.....	20
11.	Principales grupos superficiales.....	22
12.	Comportamiento en medio básico y ácido.....	24
13.	Fotografía de una dolomita	36
14.	Diagrama de proceso de decoloración de azúcar derretido (licor)	37
15.	Dosis 0,04 kilogramos de tierra	51
16.	Dosis 0,05 kilogramos de tierra	51
17.	Dosis 0,06 kilogramos de tierra	52
18.	Dosis 0,07 kilogramos de tierra	52
19.	Dosis 0,08 kilogramos de tierra	53
20.	Gráfico de dispersión de resultados consolidados.....	58

TABLAS

I.	Resultados procesados.....	43
II.	Variaciones de dosificaciones.....	43
III.	Porcentaje de decoloración licor filtrado	45
IV.	Datos agrupados por dosificación de tierra 0,04 gramos	47
V.	Datos agrupados por dosificación de tierra 0,05 gramos	48
VI.	Datos agrupados por dosificación de tierra 0,06 gramos	49
VII.	Datos agrupados por dosificación de tierra 0,07 gramos	49
VIII.	Datos agrupados por dosificación de tierra 0,08 gramos	50
IX.	Estadística de regresión	53
X.	Anova.....	54
XI.	Tratamientos.....	55
XII.	Tabla de dosificación promedio de tierra y carbón.....	57

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descripción
c	Brix solución * Densidad aparente / 100
Cad	Color azúcar derretido
Clf	Color licor filtrado
g	Gramos
g/kg	Gramos por kilogramos
b	Medida de la longitud celda en cm (paso de luz)
PDC	Porcentaje de decoloración

GLOSARIO

Azúcar	También llamada sacarosa, azúcar común o bien azúcar de mesa y cuya fórmula química es $C_{12}H_{22}O_{11}$. Es un disacárido que se encuentra en el jugo de muchas sustancias, y se extrae principalmente de la caña de azúcar o de la remolacha.
Azúcar derretido	Azúcar proveniente del proceso de azúcar blanco que se funde con agua caliente para ser decolorado.
Carbón activado	Materia prima adsorbente de coloides que aportan color.
Decoloración	Remoción de material que aporta color en forma de coloides por medio de separación por adsorción y filtración.
Licor filtrado	Producto resultante de la decoloración del licor y material azucarado del cual se obtiene el azúcar refino.
Tierra diatomácea	Tierra de infusorios, utilizada para la retención de carbón en sistemas de filtración. Llamada tierra en el presente trabajo.

RESUMEN

Actualmente, en la industria azucarera guatemalteca se produce azúcar de diversas denominaciones, tales como: azúcar crudo, moreno, blanco y refino. Esta clasificación se realiza principalmente en función de las características físicas, siendo el color una de las características más importantes. La importancia del color está relacionada a la preferencia del consumidor y para cumplir con tal demanda es necesario establecer procesos de producción y control que garanticen la calidad del producto y la rentabilidad del mismo.

Uno de los procesos más utilizados para la obtención del color en la producción del azúcar es la decoloración por filtración con filtros de tierra diatomácea y carbón activado. En el proceso productivo la dosificación adecuada de los insumos de acuerdo a los niveles de producción es el punto crítico para obtener la rentabilidad y la calidad del producto.

Este trabajo busca establecer valores de dosificación de insumos para el proceso de decoloración de azúcar refino, a través del análisis de color de la materia prima y el producto terminado cumpliendo con las exigencias establecidas por la Comisión Internacional para los Métodos Uniformes de Análisis del Azúcar (ICUMSA, por sus siglas en inglés).

El proyecto se realizó en la refinería de un ingenio azucarero de Guatemala, utilizando los equipos disponibles en el proceso de la decoloración por filtración y el equipo de disponible en el laboratorio para la el análisis de color en la producción de azúcar refino.

OBJETIVOS

General

Determinar la dosificación de carbón activado y tierra diatomácea óptima, para el proceso de decoloración del azúcar derretido para obtener el licor final en una refinería de un ingenio azucarero.

Específicos

1. Disminuir el exceso de carbón activado empleado en el proceso de la decoloración del azúcar derretido utilizando la ecuación de decoloración establecida previo a aumentar dosificaciones en futuras operaciones.
2. Evaluar el color del azúcar derretido o licores en unidades Icumsa, empleando la normativa Icumsa 2005 vigente.
3. Evaluar el porcentaje de decoloración del licor final máximo posible con la variación de las dosis y tratamientos empleados.

INTRODUCCIÓN

El azúcar refinado que se produce y se comercializa en Guatemala, es uno de los principales productos de la caña con mayor valor agregado en el mercado, siendo el color y ciertos parámetros establecidos por el cliente las razones para que este valor agregado del producto al mismo tiempo se acompañe de la optimización de los recursos y de los costos de su producción.

Algunas de las variables y parámetros a controlar durante el proceso de la producción de azúcar se pueden mencionar entre los más importantes, la humedad, las cenizas, su granulometría y como principal característica el color, el cual es medido en unidades Icumsa, que a su vez es la entidad encargada de establecer el estándar mínimo de la mayoría de los clientes para los diferentes tipos de azúcares para las fábricas de azúcar.

Uno de las dificultades durante la fabricación de azúcar refinado, es precisamente el manejo y el control del color y turbidez del material en proceso, que se convertirá posteriormente en el producto final como azúcar refinado.

El color del azúcar se controla en varios puntos importantes del proceso del azúcar, el primer punto es durante la clarificación previa a la evaporación, y en la preparación de licor final, específico para la producción de azúcar refinado y se apoya en un sistema de decoloración para remoción de los colorantes que interactúan con los materiales precursores de color, que son los materiales coloidales, los no azúcares orgánicos y los constituyentes orgánicos que forman ceniza, eliminando todos ellos junto con el color.

El subproceso de decoloración utiliza una cantidad empírica en gramos, tanto de carbón activado como en el empleo de tierra diatomácea, aumentando considerablemente los costos de producción de azúcar refino, debido al costo que representa la adquisición de químicos al no contar con una curva de dosificación de carbón y tierra. Por lo que se toma como una oportunidad de mejora, establecer un mejor control en la adición de químicos, no solo reduciendo la cantidad de aditivos sino también permitiendo al proceso la obtención de azúcar refino de color bajo y con una turbidez reducida.

1. ANTECEDENTES

Una de las principales causas de reclasificación y reclamos de los clientes nacionales e internacionales de azúcar por falta de cumplimiento de especificaciones a causa del color fuera del parámetro permitido, es muchas veces, la presencia de materiales no cristalizables y eliminación de impurezas, como lo son los elementos que aportan color durante el proceso y que no son removidos de manera controlada o que simplemente no son removidos. Estos materiales no cristalizables y aportadores de color no sólo causan reclasificación, disminuye la eficiencia de la fábrica, sino que también aumenta la inversión de cantidad de tiempo, químicos y controles, para la decoloración del azúcar derretido.

Al mismo tiempo se puede entonces disminuir la presencia de material sólido no azúcar, obteniendo un material de mayor pureza y así poder lograr mejores tiempos de cocción en tachos.

Los resultados obtenidos de los ensayos, servirán para establecer las cantidades necesarias de reactivos a utilizar y la concentración del material azucarado, durante el proceso de decoloración y mejorar el proceso.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Proceso de fabricación de azúcar

El azúcar de caña es el azúcar producido a partir de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). El proceso de fabricación de azúcar refinado de alta pureza de la caña de azúcar utiliza procesos físico-químicos naturales para quitar las impurezas

2.1.1. Entrada o transporte de la caña de azúcar

La caña que llega a la fábrica se transporta desde los cañaverales, se pesa en las básculas y luego se descarga sobre las mesas de alimentación, con grúas tipo hilo o volteadores de camiones.

2.1.2. Molienda

La caña es sometida a un proceso de preparación que consiste en romper o desfibrar las celdas de los tallos por medio de picadoras. Luego unas bandas transportadoras la conducen a los molinos, donde se realiza el proceso de extracción de la sacarosa, consistente en exprimir y lavar el colchón de bagazo en una serie de molinos.

El lavado del colchón de bagazo se hace con jugo extraído en el molino siguiente (maceración) y el lavado del último molino se hace con agua condensada caliente (imbibición), que facilita el agotamiento de la sacarosa en

el bagazo y evita la formación de hongos y la necesidad de emplear bactericidas.

El bagazo sale del último molino hacia las calderas, para usarlo como combustible.

2.1.3. Clarificación

El jugo proveniente de los molinos, pasa al tanque de alcalinización, donde se rebaja su grado de acidez y se evita la inversión de la sacarosa, mediante la adición de sacarato de calcio o lecha de cal. Este proceso ayuda a precipitar la mayor parte de las impurezas que trae el jugo. El jugo alcalinizado se bombea a los calentadores, donde se eleva su temperatura hasta un nivel cercano al punto de ebullición y luego pasa a los clarificadores continuos, en los que se sedimentan y decantan los sólidos, en tanto que el jugo claro que es extraído por la parte superior. Los sólidos decantados pasan a los filtros rotatorios y al vacío, los cuales están recubiertos con finas mallas metálicas que dejan pasar el jugo, pero retienen la cachaza, que puede ser usada como abono en las plantaciones.

2.1.4. Evaporación

El jugo clarificado pasa a los evaporadores, que funcionan al vacío en su último efecto para facilitar la ebullición a menor temperatura. En este paso se le extrae el 75% del contenido de agua al jugo, para obtener el producto o meladura.

2.1.5. Cristalización

La cristalización o cocimiento de la sacarosa que contiene el jarabe se lleva a cabo en tachos al vacío. Estos cocimientos, según su pureza, producirán azúcar crudo (para exportación), azúcar blanco (para consumo directo) o azúcar para refinación. La cristalización del azúcar es un proceso demorado que industrialmente se acelera introduciendo al tacho unos granos de polvillo de azúcar finamente molido. La habilidad y la experiencia de los operarios que deben juzgar el punto exacto de los cocimientos, es indispensable para la obtención de un buen producto. Esto deja una curva de solubilidad de la sacarosa.

2.1.6. Separación o centrifugación

Los cristales de azúcar se separan de la miel restante en las centrífugas. Estas son cilindros de malla muy fina que giran a gran velocidad. El líquido sale por la malla y los cristales quedan en el cilindro, luego se lava con agua. Las mieles vuelven a los tachos, o bien se utilizan como materia prima para la producción de alcohol etílico en la destilería. El azúcar de primera calidad retenido en las mallas de las centrífugas, se disuelve con agua caliente y se envía a la refinería, para continuar el proceso.

Se resalta que en este punto se obtiene lo que se llama azúcar rubio, debido al color de los cristales; a continuación se detalla el proceso mediante el cual el azúcar rubio se convierte en azúcar blanco o azúcar refinado.

2.1.7. Refinado

En el proceso de refinado se derrite el azúcar nuevamente para pasar nuevamente por el proceso de cristalización y centrifugación tal y como se hace en el proceso de fabricación de azúcar blanco o crudo, con la diferencia que ya fue separada la miel aportadora de color, por lo que se tiene un material con menos coloración. Mediante la refinación, se eliminan o reducen las materias coloidales, colorantes o inorgánicas que el licor pueda contener. El azúcar disuelto se trata con ácido fosfórico y sacarato de calcio para formar un compuesto floculante que arrastra las impurezas, las cuales se retiran fácilmente en el clarificador. El material clarificado pasa a unas cisternas de carbón que quitan, por adsorción, la mayor parte de las materias colorantes presentes en el licor. El licor resultante se concentra, se cristaliza de nuevo en un tacho y se pasa a las centrífugas, para eliminar el jarabe.

2.1.8. Secado

El azúcar refinado se lava con condensado de vapor, se seca con aire caliente, se clasifica según el tamaño del cristal y se almacena en silos para su posterior empaque.

2.1.9. Envasado

El azúcar crudo de exportación sale directamente de las centrífugas a los silos de almacenamiento. Allí se carga a granel en contenedores que lo llevarán al puerto de embarque.

El azúcar refinado se empaca en presentación de 5, 500, 1 000 y 2 500 gramos; 50 y 100 kilogramos e incluso por toneladas.

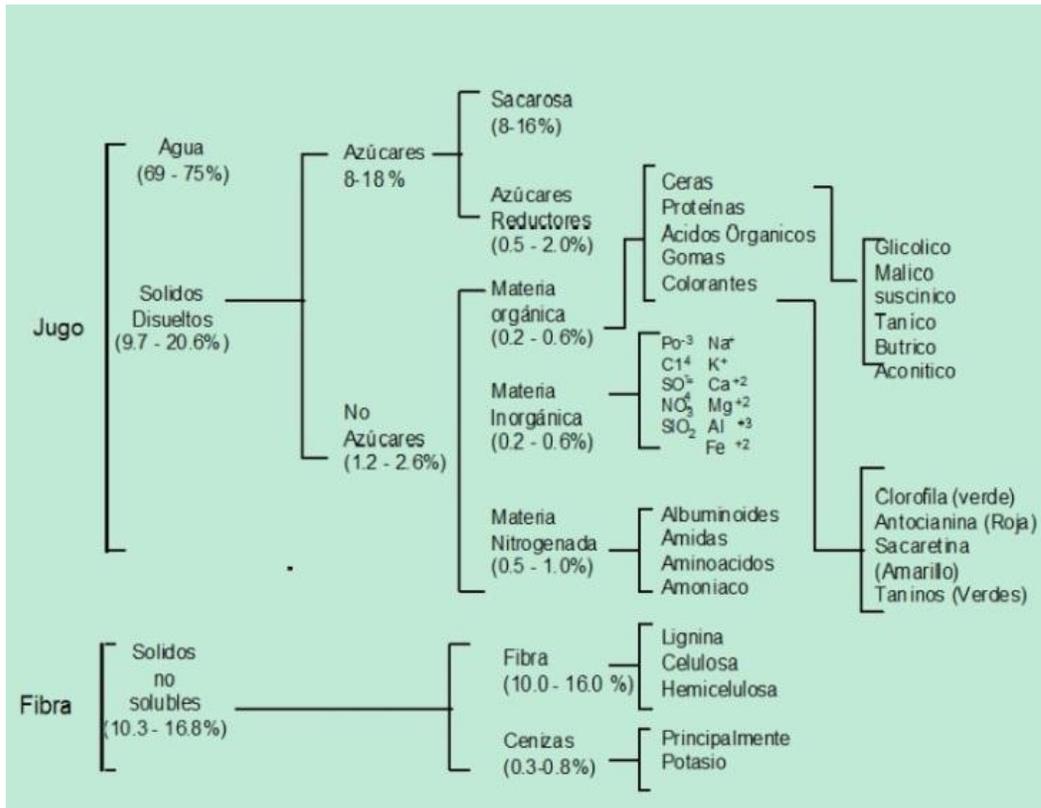
2.2. Refinación del azúcar de caña y color

La sacarosa es el azúcar de uso doméstico e industrial y es azúcar más común en el reino vegetal. Su formación se obtiene cuando los azúcares monosacáridos, glucosa y fructuosa, se condensan y al mismo tiempo forman agua. La sacarosa, y sus constituyentes, glucosa y fructuosa son los azúcares más comunes, encontrándose juntos en la mayoría de las plantas aunque en diferentes proporciones y cantidades.

La caña de azúcar además de ser acompañada de los monosacáridos también se ve acompañada de pequeñas cantidades de almidón, dextrana y gomas, componentes minerales, pH y acidez, ácidos orgánicos, proteínas, colorantes y precursores de color, componentes de sabor y otros componentes de menor importancia. En las partes verdes de la caña están presentes los familiares pigmentos verdes y amarillos de las plantas, las clorofilas A y B, los carotenos y las xantofilas, mismos que se extraen fácilmente en el laboratorio y en la fábrica. Durante la clarificación y la ebullición se destruyen o se separan la mayor parte de estos pigmentos.

En la figura 1 se observa la composición química de la caña, separada por jugo y por fibra, que son los componentes primarios de la caña.

Figura 1. Composición química de la caña

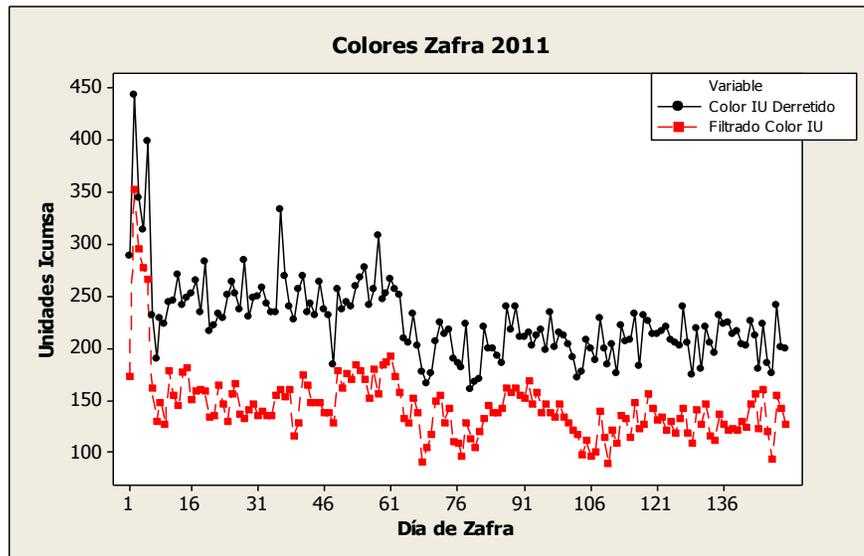


Fuente: ROGER, Pablo. Filtración de jarabes.

Los principales contribuyentes de color al azúcar se dividen en cuatro grupos principales: en primer lugar, los compuestos derivados de la caña, los compuestos fenólicos, polifenólicos y flavonoides. Ellos varían del color amarillo al café.

En la figura 2, se muestra el comportamiento de los colores del azúcar derretido, y el licor filtrado, en donde se puede observar que a partir del día 68 se reducen los colores de los materiales.

Figura 2. Comportamiento de colores en zafra 2011



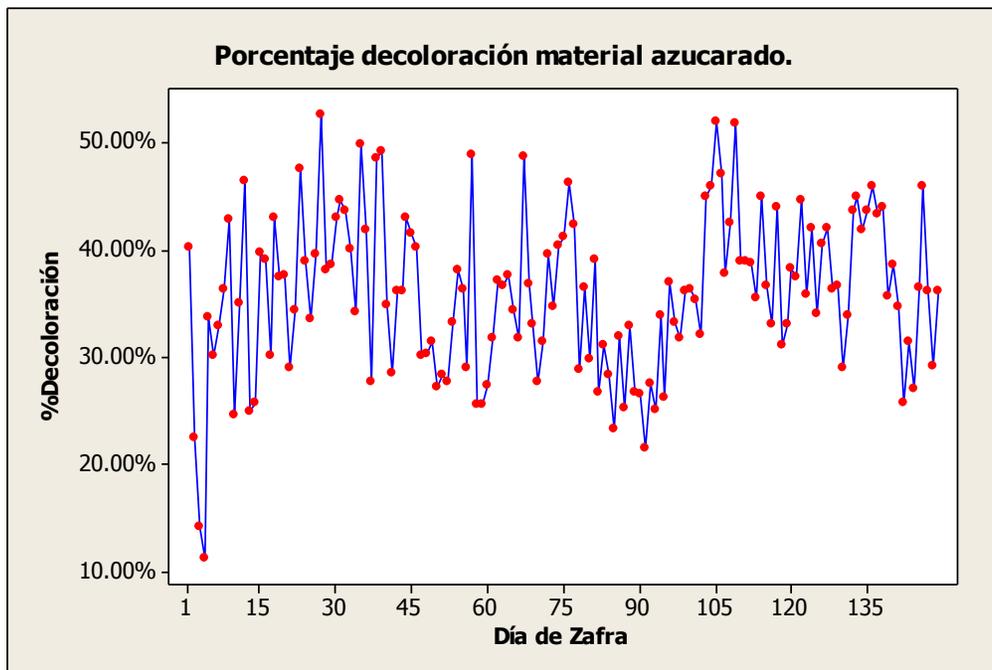
Fuente: Minitab.

Los segundos constituyen los compuestos del caramelo, este se forma por la descomposición de la sacarosa y del azúcar invertido por la acción del color. En tercer lugar: los compuestos de tipo de la melanoidina (formados por reacción de los azúcares con compuestos aminados) suministran color oscuro y café. El cuarto grupo está formado por la degradación de la fructuosa en condiciones básicas, como las existentes en las refinerías de azúcar.

De las diferencias entre los tipos de azúcar que se fabrican a nivel mundial, la característica principal que las distingue es el color, puesto que se percibe de inmediato y se puede medir con facilidad, por lo que el proceso de decoloración se convierte en el proceso clave para la refinación de azúcar. El color no es definido por el productor de azúcar sino más bien por el cliente, por lo que se convierte la decoloración en el proceso con mayor control en una refinería.

En la figura 3, se observa el comportamiento del porcentaje de decoloración para la zafra 2011. En los primeros días de zafra la decoloración normalmente es baja debido a que la operación es por lo general más inestable.

Figura 3. **Porcentaje de decoloración**



Fuente: Minitab.

El proceso de decoloración en la refinería no solo remueve color sino que también constituyentes inorgánicos que forman ceniza, material coloidal, debido a que los colorantes interactúan con los percusores de color, y los no azucares, eliminando entonces materia que aporta turbidez al mismo tiempo.

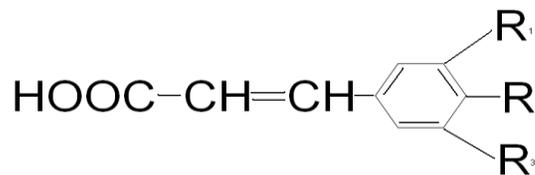
Actualmente no existe ningún equipo capaz de decolorar todos los tipos de colorantes, siendo estos clasificados como iónicos/aromáticos, no iónicos / aromáticos, iónicos/no aromáticos y los no iónicos/no aromáticos.

2.2.1. Tipo I

Iónicos / aromáticos:

Este grupo de colorante tiene un grupo iónico funcional y una estructura aromática básica como parte de la estructura molecular. Este tipo puede removerse fácilmente mediante un adsorbente con función de intercambio de iones y/o superficie aromática.

Figura 4. **Colorantes iónicos/aromáticos**



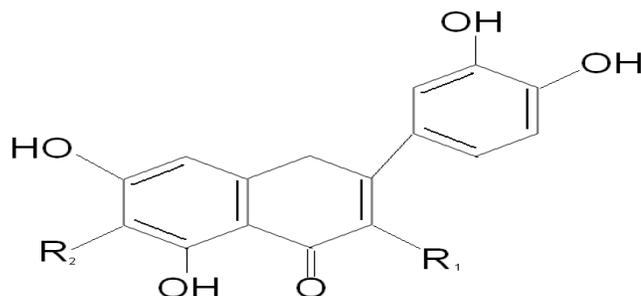
Fuente: elaboración propia.

2.2.2. Tipo II

No iónicos / aromáticos:

Esta presencia es por naturaleza altamente aromática. Ningún grupo iónico está presente. Este tipo de colorante se remueve de manera más efectiva mediante adsorbentes de naturaleza aromática, como el carbón y, en menor grado, mediante resina poliestirénica.

Figura 5. **Colorantes no iónicos / aromáticos**



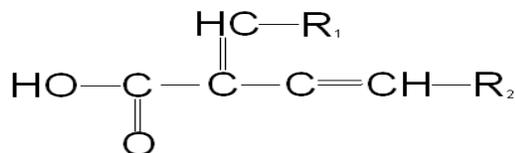
Fuente: elaboración propia.

2.2.3. Tipo III

Iónicos / no aromáticos

Este grupo contiene grupos iónicos funcionales con estructura molecular alifática muy probablemente con dobles enlaces conjugados. Debido a su naturaleza alifática, este grupo se elimina de manera muy efectiva mediante un mecanismo de intercambio de iones y en cierto grado, por precipitación. Si el doble enlace se conjuga ampliamente también se puede adsorber por medio de adsorbentes aromáticos.

Figura 6. **Colorantes iónicos/ no aromáticos**



Fuente: elaboración propia.

2.2.4. Tipo IV

No iónicos / no aromáticos

Este grupo constituye un pequeño número de colorantes que son muy difíciles de remover por los adsorbentes de que se dispone usualmente, a menos que la fracción no aromática esté altamente conjugada.

2.3. La decoloración y su mecanismo

El proceso de decoloración se basa en un método o bien en tres de ellos combinados, los cuales son:

El método de adsorción por medio de enlaces hidrofóbicos, como lo es la remoción de un colorante por el uso carbón, el otro método es el intercambio de iones por medio de un grupo iónico funcional, como los colorantes removidos por medio del empleo de una resina, y el tercer método actúa por precipitación seguida por oclusión y/o adsorción de fuerzas de van der Waals.

La combinación de los métodos se pueden describir como:

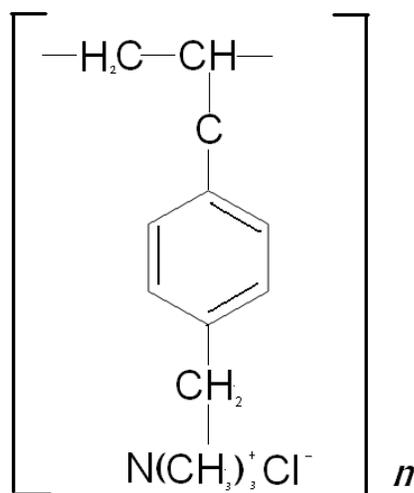
- a. Intercambio iónico: colorantes ácidos retenidos por resina en forma aniónica.
- b. Adsorción: enlaces hidrofóbicos (interacción aromático-aromático).
- c. Precipitación: se forman complejos con sustancias orgánicas como sales de amonio cuaternario/cationes inorgánicos como Ca^{2+} .
- d. Adsorción: atrapado dentro del cristal/adsorbente poroso.
- e. Combinación de los métodos.

Gracias a que se conoce acerca del tipo de mecanismo utilizado, de acuerdo al tipo de colorante, se conoce a nivel comercial el agente o agentes decolorantes con el fin de maximizar la función del colorante, permitiendo balancear el costo de operación con el costo de los productos adquiridos para la remoción de color. Dentro de los agentes decolorantes comúnmente empleados están:

2.3.1. Resinas de intercambio iónico, resinas poliestirénicas

Este tipo de decolorante, puede remover los colorantes, ya sea por adsorción o por intercambio de iones, gracias a la naturaleza aromática de la estructura del anillo bencénico.

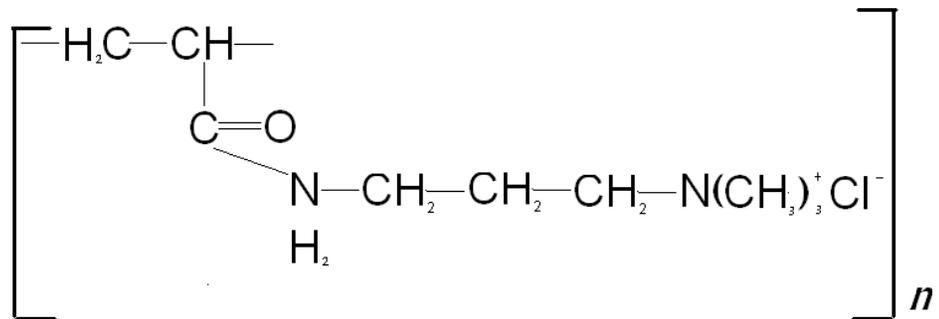
Figura 7. Resinas de intercambio iónico



Fuente: elaboración propia.

En este caso la remoción del color se efectúa por el intercambio de iones y por lo tanto está menos sujeto al ensuciamiento. La adsorción por esta resina alifática de alto peso molecular, es mínima.

Figura 8. **Resinas poliestirénicas**

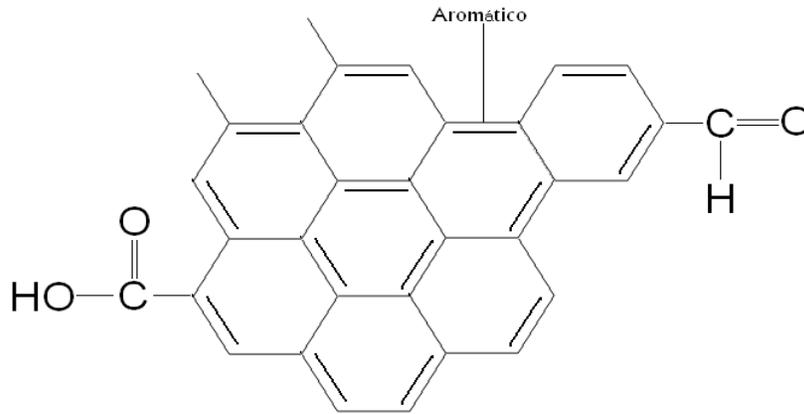


Fuente: elaboración propia.

2.3.2. **Carbón granulado y pulverizado**

Este agente remueve colorantes de alto peso molecular, en especial los de carácter ácido débil, además de ser el mejor agente para adsorber colorantes aromáticos y con dobles enlaces conjugados.

Figura 9. **Esquema de un carbón granulado y pulverizado.**



Fuente: elaboración propia.

2.3.1.1. **Carbón animal**

Además de la decoloración por el carbón de huesos descrita, la Hidroxiapatita puede adsorber colorantes, en especial los colorantes iónicos son precipitados por el calcio presente en el carbón animal.

2.3.1.2. **Carbonatación**

El mecanismo de remoción de color junto con la teoría de precipitación seguida de adsorción (oclusión) permite además la adsorción de colorantes de muy alto peso molecular.

2.3.1.3. Fosfatación con o sin sales de amonio cuaternario

La remoción del color se realiza en su mayor parte por precipitación seguida de absorción/adsorción. Este tipo es más eficiente cuando los colorantes presentes son altamente ácidos.

A pesar de conocer las bases de la decoloración, no es posible establecer un proceso o agente preciso para remoción de color en una refinería azucarera, lo que hace que constantemente se busquen metodologías, equipos que den apoyo y por supuesto reducción de producto químico para reducir los costos de operación y los impactos ambientales.

2.4. Decoloración con adsorbentes de carbón

Una de las principales causas de reclasificación de azúcar por incumplimiento de especificaciones de color es muchas veces la presencia de elementos que no son removidos de manera controlada o que por su naturaleza no son removidos, disminuyendo la eficiencia de la fábrica e inversión de tiempo, químicos y controles, entre otros. Por lo que una oportunidad de mejora se busca obtener al tener mejor control de la dosificación para lograr una remoción de color del azúcar derretido requerida.

2.4.1. Historia del carbón activado

El uso de los materiales de carbón se pierde en la historia, de forma que es prácticamente imposible determinar con exactitud cuando el hombre comenzó a utilizarlos. Lo cierto es que antes del uso de lo que en la actualidad denominamos carbones activos, es decir carbones con una estructura porosa

altamente desarrollada, ya se emplearon como adsorbentes el carbón vegetal, o simplemente maderas parcialmente desvolatilizadas o quemadas.

Los primeros usos de estos primitivos carbones activos, generalmente preparados a partir de madera carbonizada (carbón vegetal), parecen haber tenido aplicaciones médicas. Así, en Tebas (Grecia) se halló un papiro que data de 1550 a.C. en el que se describe el uso de carbón vegetal como adsorbente para determinadas prácticas médicas. Con posterioridad, en el 400 a.C., Hipócrates recomienda filtrar el agua con carbón vegetal para eliminar malos olores y sabores y para prevenir enfermedades. En relación al tratamiento del agua con carbón activo, se sabe que ya 450 años a.C. en los barcos fenicios se almacenaba el agua para beber en barriles con la madera parcialmente carbonizada por su cara interna. Esta práctica se continuó hasta el siglo XVIII como medio para prolongar el suministro de agua en los viajes transoceánicos. Sin embargo, la primera aplicación documentada del uso de carbón activo en fase gas no tiene lugar hasta en 1793, cuando el Dr. D.M. Kehl utiliza el carbón vegetal para mitigar los olores emanados por la gangrena. El mismo doctor también recomienda filtrar el agua con carbón vegetal.

La primera aplicación industrial del carbón activo tuvo lugar en 1794, en Inglaterra, utilizándose como agente decolorante en la industria del azúcar. Esta aplicación permaneció en secreto por 18 años hasta que en 1812 apareció la primera patente. En 1854 tiene lugar la primera aplicación a gran escala del carbón activo en fase gas, cuando el alcalde de Londres ordena instalar filtros de carbón vegetal en los sistemas de ventilación de las cloacas. En 1872 aparecen las primeras máscaras con filtros de carbón activo utilizadas en la industria química para evitar la inhalación de vapores de mercurio.

Sin embargo el término adsorción no fue utilizado hasta 1881 por Kayser para describir como los carbonizados atrapaban los gases. Aproximadamente por estas fechas R. von Ostrejko, considerado el inventor del carbón activo, desarrolla varios métodos para producir carbón activo tal y como se conoce en nuestros días, más allá de simples carbonizados de materiales orgánicos o del carbón vegetal. Así, en 1901 patentó dos métodos diferentes para producir carbón activo. El primero consistía en la carbonización de materiales lignocelulósicos con cloruros de metales; lo cual resultó la base de lo que hoy en día es la activación química. En el segundo, proponía una gasificación suave de materiales previamente carbonizados con vapor de agua o CO₂; es decir una activación física, o más correctamente térmica.

La Primera Guerra Mundial, y el uso de agentes químicos durante esta contienda, trajeron como consecuencia la necesidad urgente de desarrollar filtros de carbón activo para máscaras de gas. Sin duda este acontecimiento fue el punto de partida para el desarrollo de la industria de carbón activo y de un buen número de carbones activos usados no solo en la adsorción de gases tóxicos sino en la potabilización de agua. A partir de este momento tuvo lugar el desarrollo de multitud de carbones activos para las aplicaciones más diversas: depuración de gases y aguas, aplicaciones médicas, soporte de catalizadores, etc.

En términos generales los carbones activados se clasifican en dos grandes grupos:

- Carbones para purificación en fase líquida.
- Carbones para purificación en fase gaseosa.

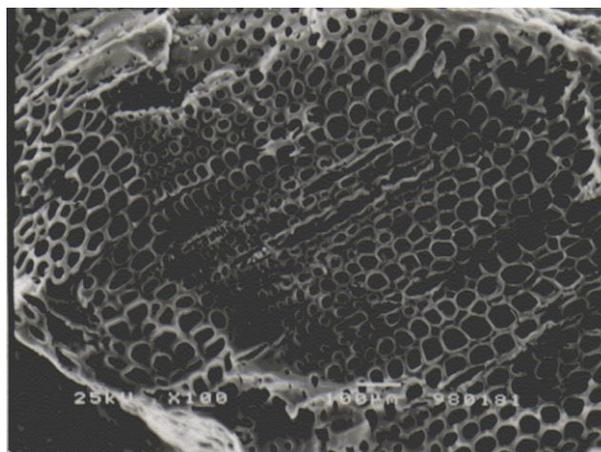
Las propiedades más importantes a considerar al seleccionar un carbón son el diámetro de los poros y las características de los mismos. Los poros de un carbón activado se clasifican en tres, de acuerdo a su tamaño:

- Microporos
- Poros medios
- Macroporos

Los microporos son poros con un radio de 20 Å o menos y son los que más área proporcionan. Son útiles para adsorber moléculas muy pequeñas, que generalmente se encuentran presentes en purificaciones de gases.

Los poros medios están en el rango de 20- 500 Å y aunque su contribución al área total es menor que los microporos, su tamaño les permite adsorber moléculas grandes que por lo general están presentes en purificaciones de líquidos.

Figura 10. **Poros de un carbón activado**



Fuente: ROGER, Pablo. Filtración de jarabes.

Los Macroporos casi no contribuyen al área total de un carbón pero su importancia radica en que actúan como Vías de acceso a los poros medios y microporos, afectando la velocidad de difusión de las impurezas en el carbón.

Desafortunadamente el área total y el tamaño de los poros no son fáciles de medir, y en consecuencia se suelen utilizar algunos índices como:

- El índice de iodo.
- El índice de melaza.
- El índice de azul de metileno.
- El índice de tetracloruro de carbono.
- El índice de butano.

Estos índices dan una idea de que tan fácil se adsorben las moléculas de distintos tamaños, por lo que podemos darnos una idea del tipo de poros que tiene un carbón. Normalmente es difícil que un carbón tenga poros de un solo tamaño, lo que tiene es una determinada distribución.

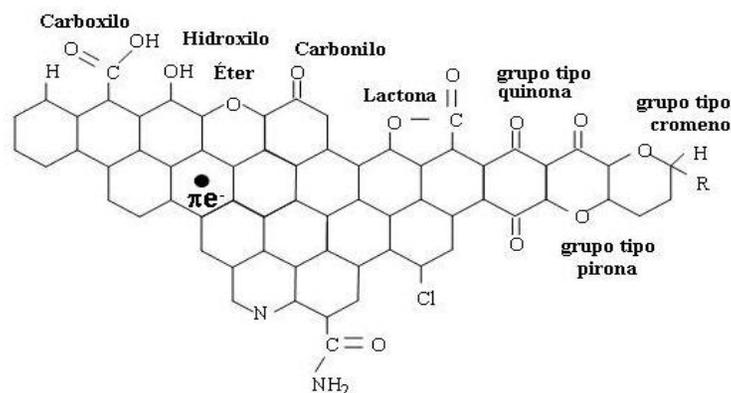
Cuando la media se inclina hacia los microporos se dice que el carbón es de fase gaseosa; en caso contrario, el carbón será para fase líquida.

2.4.2. Importancia de la química superficial de los carbones activados

La superficie de los carbones, en particular los átomos de carbono de los bordes de los planos basales, pueden encontrarse combinados en mayor o menor proporción con otros átomos distintos al carbono (heteroátomos), dando lugar a diferentes grupos superficiales. Por otro lado, los átomos de carbono de los planos basales, poseen orbitales p que contienen electrones más o menos

deslocalizados dentro de estos planos basales. La presencia o ausencia de los grupos superficiales, así como el mayor o menor grado de deslocalización de los electrones p afecta a las interacciones del carbón con otros elementos o compuestos.

Figura 11. Principales grupos superficiales



Representación esquemática de los principales grupos superficiales que pueden encontrarse un carbón. La mayoría de estos grupos son grupos oxigenados, debido a la tendencia de los carbonos a oxidarse incluso a temperatura ambiente. Los electrones deslocalizados de los orbitales p juegan un papel muy importante en la química superficial de los carbonos.

Fuente: CHEN, James. Manual del azúcar de caña, p 231.

Por ejemplo, todos los carbonos presentan en principio un carácter hidrófobo, no obstante se pueden disminuir este carácter hidrófobo adicionando grupos superficiales polares. Esto puede conseguirse por oxidación con algún tipo de agente oxidante. Los grupos oxigenados dan lugar a centros primarios de adsorción de moléculas de agua que a su vez adsorberán nuevas moléculas por formación de puentes de hidrógeno. De esta forma se aumenta el carácter hidrófilo y la mojabilidad de los carbonos. En el caso de la adsorción de compuestos inorgánicos en fase acuosa esto podría resultar beneficioso. Sin

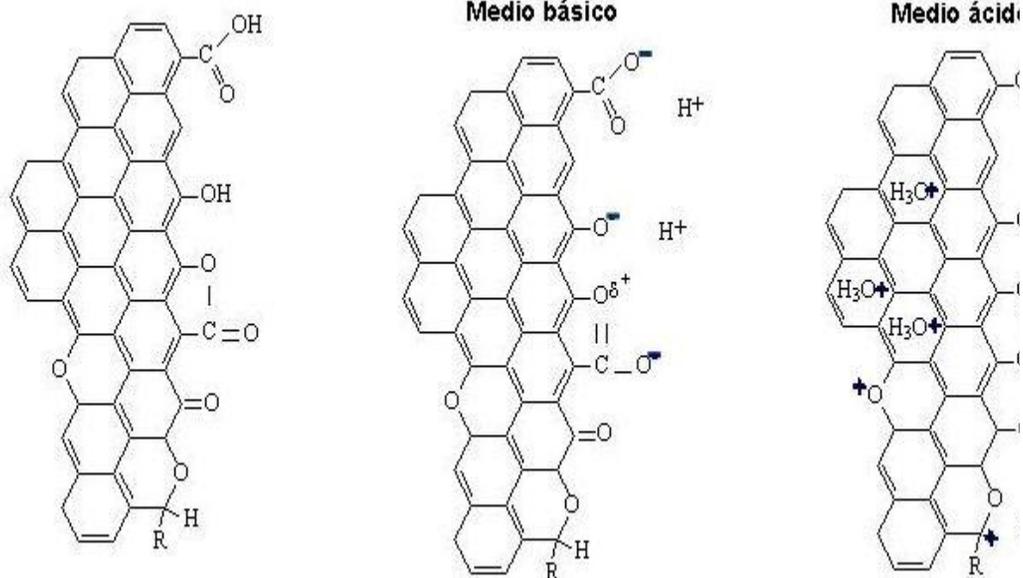
embargo, en el caso de que el carbón activado vaya a ser usado para adsorber compuestos en fase gas, el hecho de que los poros estén ocupados, o incluso bloqueados, por moléculas de agua puede llegar a disminuir sustancialmente la capacidad de adsorción del carbón. De hecho este efecto combinado de oxidación/adsorción de humedad de los carbones activados se conoce como efecto de envejecimiento (*ageing effect*) y es algo a evitar en la medida de lo posible, especialmente para las aplicaciones en fase gas.

Otra faceta importante de la química superficial de un carbón activado es su naturaleza anfótera, lo cual significa que en la superficie del carbón coexisten grupos superficiales de carácter ácido y grupos superficiales de carácter básico. El que un carbón sea globalmente ácido o básico dependerá tanto de la concentración de estos grupos como de la fuerza como ácido o base de los mismos. De forma intuitiva, se puede deducir que un carbón de tipo básico será preferible para la adsorción de compuestos ácidos que un carbón de tipo ácido y viceversa.

Por otro lado, los grupos ácidos tienden a liberar protones, especialmente en los medios básicos, mientras que los grupos básicos tienden a captarlos cuando se encuentran en un medio ácido. De esta forma pueden aparecer cargas positivas o negativas en la superficie del carbón. De forma genérica: si el pH del medio es mayor que el punto de carga cero del carbón (pHPZC, pH en el cual el número de cargas positivas es igual al de cargas negativas de forma tal que la carga neta sobre la superficie del carbón es cero), se tendrá un predominio de las cargas negativas en la superficie del carbón; por el contrario, si $\text{pH} < \text{pHPZC}$ se obtendrá una superficie cargada positivamente. Las condiciones en las que un carbón tenga una carga neta negativa serán preferibles para adsorber cationes y aquellas en las que presente una carga neta positiva lo serán para adsorber aniones. Dado que el modificar el pH de los

efluentes contaminantes no siempre resulta sencillo es preferible optimizar la química superficial del carbón activado teniendo en cuenta los criterios anteriores para que la adsorción sea máxima.

Figura 12. **Comportamiento en medio básico y ácido**



Representación esquemática del carácter ácido de algunos grupos oxigenados (carboxilos, hidroxilos y lactonas) y del carácter básico de los electrones deslocalizados del plano basal y de grupos oxigenados (tipo pirona, tipo quinona y tipo cromeno)

Fuente: ROGER, Pablo. Filtración de jarabes.

Optimizar la textura porosa y química superficial de un carbón activo no siempre es una tarea sencilla máxime si se tiene en cuenta que la textura porosa y la química superficial pueden estar interrelacionadas. Por ejemplo, un aumento en el contenido en grupos superficiales oxigenados puede modificar la textura porosa de un carbón ya que se pueden bloquear parte de los microporos lo que disminuye la accesibilidad al sistema poroso. Un tratamiento térmico a temperaturas elevadas para eliminar grupos superficiales puede también

producir un colapso de la textura porosa disminuyendo también el volumen de poros. Así, a veces puede ser necesario llegar a soluciones de compromiso cuando se pretende optimizar la textura porosa y química superficial de un carbón.

En general, los adsorbentes de carbón son conocidos como materiales porosos con un área superficial establecida en los poros dentro de las partículas, no permitiéndole al material adsorbido y alojado en los poros, ser removidos fácilmente, debido a la fuerza de adsorción, y para su remoción es necesario casi siempre la incineración. Los adsorbentes de carbono que se emplean comúnmente en los ingenios azucareros están los siguientes:

- El carbón animal y su sustituto sintético, el cual remueve colorantes y ceniza.
- El carbón granulado, que remueve colorantes y
- El carbón pulverizado.

Las ventajas del carbón animal es que se puede regenerar y puede ser utilizado varias veces, el carbón granulado, se puede utilizar unas 25 veces, y el pulverizado solamente una o dos veces. En el ingenio actualmente se utiliza pulverizado, ya que para que el producto pueda abarcar mercados más exigentes como lo son aquellos regulados por regímenes de creencias o religión, en donde no es permitido el uso de carbón de origen de hueso animal y cumplir así con las normas establecidas por el cliente.

El proceso de tratamiento con el adsorbente puede tener varios mecanismos, no se conoce exactamente un mecanismo exacto para la remoción óptima de las impurezas. Lo que sí se sabe es que el licor a tratar,

debe estar en contacto íntimo con el adsorbente durante un tiempo para que se pueda retener el material en los poros del carbón.

Debido a que el colorante del azúcar es una mezcla de varios componentes diferentes, cada uno con un potencial de adsorción diferente existe también varios cierta selectividad o separación del gran número de colorantes.

El único concepto que se puede aplicar en manera básica ya durante el proceso, es el del tiempo de contacto, ya que la cantidad de decoloración depende del alto grado de tiempo de contacto íntimo entre el licor y el carbón adsorbente. El tiempo requerido varía desde unos segundos con carbón activado, a horas con el carbón granulado.

2.4.3. Carbón activado pulverizado

El proceso requiere que la solución azucarada, se encuentre a una concentración de 60 a 64° grados Brix, con un pH de 7 y calentada a 82°C, durante 15 a 20 minutos, antes de la filtración, el tiempo corto requerido para esto, hace de la técnica la más utilizada.

El producto se conoce entonces como licor tratado y se hace pasar por un sistema de filtración basado en la filtración con tierra diatomacea, reteniendo el carbón activado y removiendo color y turbidez, y así obtener un licor final más limpio y con mejor color, se reduce de 200 o 300 IU a un valor de 90 IU, convirtiéndose luego de la cocción en azúcar de color máximo de 45 IU.

2.5. Filtración

La filtración es un proceso de separación de fases de un sistema heterogéneo, que consiste en pasar una mezcla a través de un medio poroso o filtro, donde se retiene la mayor parte de los componentes sólidos de la mezcla.

Las aplicaciones de los procesos de filtración son muy extensas, encontrándose en muchos ámbitos de la actividad humana, tanto en la vida doméstica como de la industria general, donde son particularmente importantes aquellos procesos industriales que requieren de las técnicas de ingeniería química.

La filtración se ha desarrollado tradicionalmente desde un estadio de arte práctico, recibiendo una mayor atención teórica desde el siglo XX. La clasificación de los procesos de filtración y los equipos es diversa y en general, las categorías de clasificación no se excluyen unas de otras.

La variedad de dispositivos de filtración o filtros es tan extensa como las variedades de materiales porosos disponibles como medios filtrantes y las condiciones particulares de cada aplicación: desde sencillos dispositivos, como los filtros domésticos de café o los embudos de filtración para separaciones de laboratorio, hasta grandes sistemas complejos de elevada automatización como los empleados en las industrias petroquímicas y de refino para la recuperación de catalizadores de alto valor, o los sistemas de tratamiento de agua potable destinada al suministro urbano.

2.5.1. Diatomeas

Son organismos unicelulares que pertenecen al filo de las algas pardodoradas; cuyo nombre científico es Bacillariophyta y se relaciona filogenéticamente con el filo Chrysophita y otros del conjunto Chromista. Según ciertos autores, las diatomeas se clasifican como un filo independiente.

Por sus características y requerimientos se las consideran las únicas algas verdaderas, ya que no presentan ninguna estructura propia del Reino Animal. Posee el mayor número de especies; aproximadamente unas 500 000; teniendo una amplia distribución mundial y constituyendo el grupo más importante del fitoplancton debido a que contribuyen con cerca del 90% de la productividad de los sistemas.

Bajo condiciones normales en la región sudamericana; siempre predominan por sobre los otros grupos, ya que se ven especialmente favorecidas por los eventos de surgencia que aportan aguas frías y ricas en nutrientes hacia la superficie. Son unicelulares, pero pueden unirse en colonias o cadenas con forma de tallo o ramificadas. En este caso, las diferentes especies presentan distintas estrategias o formas de unión entre las células.

Los frústulos de las diatomeas se sedimentan por gravedad cuando es digerida o muere la célula, dando origen a rocas sedimentarias como las diatomitas y moronitas. Las diatomeas se formaron en el fondo de los lagos de agua dulce, hace más de 70 millones de años, formando con el devenir de los tiempos acumulaciones de restos fósiles, denominada como tierra de diatomeas.

2.5.1.1. Clasificación

Existen diversas familias dentro de las diatomeas de acuerdo con los lechos donde se han formado:

- *Asterionella Formosa*: diatomea que forma colonias estrelladas de unas 8 células. Cada célula presenta un lado pleural, más ancho en los extremos. Las valvas son muy estrechas con los extremos algo abultados. *Diatoma hiemale*: diatomea colonial que forma cintas muy largas y densas. Las valvas son lanceoladas, lineales o elípticas. Presentan costillas robustas e irregulares.
- *Fragilaria Crotonensis*: diatomea de células dilatadas en el centro, que se unen formando cintas curvadas y retorcidas. Las valvas son muy estrechas y presentan sutiles estrías transversales.
- *Gomphonema* sp: género de diatomea que agrupa células cuyas caras pleurales son cuneiformes. Las células se pueden encontrar fijas a sustratos mediante pedúnculos gelatinosos simples.
- *Melosira* sp: género de diatomea colonial que agrupa células con forma cilíndrica, un poco más largas que anchas, adheridas unas a otras por la superficie valvar. *Melosira granulata*: diatomea colonial que forma cadenas largas y rígidas de células cilíndricas. Las superficies terminales de las valvas presentan un punteado irregular.
- *Melosira Varians*: diatomea colonial que forma cadenas largas de células en forma de tambor. Presentan cloroplasto en forma de plaquitas de color pardo – amarillento.

- Navícula sp: incluye individuos con valvas lanceoladas, estriadas transversalmente en la zona media, en sentido opuesto a los polos. Los extremos de las células son redondeados.
- Nitzschia sp: género que agrupa células, en general pequeñas, con valvas lanceoladas que presentan estrías transversales muy finas, apenas visibles y dispuestas densamente.
- Pinnularia sp: microalga diatomea característica, de rafe ligeramente ondulado, estrías transversales gruesas que a veces presentan poros.
- Surirella sp: la célula en visión pleural es cuneiforme, vista por encima es ovalada, con un polo anchamente redondeado y el otro más apuntado. A las muy desarrolladas cuyos canales se encuentran separados por espacios anchos.
- Tabellaria flocculosa: constituida por células que forman cadenas en zigzag. Vistas de lado las células son casi cuadradas, con numerosas bandas intercalares cuyos numerosos septos penetran profundamente. Las valvas se encuentran muy dilatadas en el centro.

2.5.1.2. Forma y función

La taxonomía de este grupo se basa en dos aspectos principales:

- La simetría.
- Las características de su pared celular.

Respecto a la simetría, las diatomeas se dividen en dos grupos:

- Las de simetría radial (orden Biddulphiales o Centrales).
- Las de simetría bilateral (orden Bacillariales o Pennales).

Las relaciones de simetría pueden establecerse determinando los ejes presentes en cada grupo.

Las diatomeas de simetría radial presentan dos ejes: eje pervalvar, que une los puntos medios de cada valva y el eje transversal o diámetro, perpendicular al anterior.

Las diatomeas de simetría bilateral presentan tres ejes: eje pervalvar que une los puntos medios de cada valva, eje apical que une los extremos del frústulo y eje transapical, que recorre la célula de pleura a pleura.

En lo que se refiere a su pared celular, esta es una estructura rígida constituida por sílice hidratada y proteínas, y se denomina frústulo o teca. El sílice les confiere rigidez y origina patrones de estrías, de trama complicada, que suelen servir como rasgos para su identificación. El frústulo se encuentra formado por dos partes que se unen como las piezas de una caja, recibiendo el nombre de “semitecas”. La semiteca superior se llama “epiteca” y la inferior, “hipoteca”.

Tanto la epiteca como la hipoteca, constan de porciones perfectamente delimitadas. La región superior de la epiteca y la inferior de la hipoteca se denominan valvas y, según corresponda, se nombran “epivalva” o “hipovalva”. Por otra parte, los bordes de las semitecas reciben el nombre de “pleuras”, existiendo una “epipleura” y una “hipopleura”.

Los frústulos de las diatomeas presentan una serie de ornamentaciones tales como areolas; poros; bandas; etc, o bien presentan prolongaciones o proyecciones. También es común la presencia de estructuras accesorias o externas como membranas; setas; espinas que sirven para la unión de las células en cadenas. En algunas especies de diatomeas con simetría bilateral existe una estructura central que recorre toda la célula denominada rafe.

Las representantes marinas presentan un rango de tamaño que fluctúa entre 50 y 500 um.

2.5.1.3. Reproducción

Su reproducción generalmente es por división celular. Esta especie de cápsula de vidrio en que viven encerradas no es totalmente simétrica, una de las tapas es más grande que la otra. Este hecho genera algunos cambios, sexualmente hablando. Normalmente se reproducen por mitosis, es decir, se dividen en dos células hijas. Al dividirse una de ellas se queda con la tapa más grande y debe sintetizar la más chica. Por el otro la que queda con la más pequeña debe fabricar una más diminuta, aún para terminar de conformar un cuerpo. Cuando llegan a reducirse tanto que corren peligro de muerte, en ese momento suena una alarma interna y se reproducen sexualmente y el descendiente tendrá el máximo tamaño de la especie.

2.5.1.4. Nutrición

Las diatomeas son autótrofas por excelencia. Estos organismos fotosintetizadores poseen un color dorado oliváceo debido a su juego de pigmentos fotosintéticos, que como en otros chromistas incluye clorofila c1 y c2,

así como carotenoides y pigmentos auxiliares. Suelen contener gotas de lípidos que, además de servir de reserva, contribuyen a su flotabilidad.

2.5.1.5. Hábitat

Estos organismos habitan en los sitios más impensados del planeta: desde hielos polares hasta aguas termales, tanto en mares como en ambientes dulciacuícolas, pasando por terrenos secos e inclusive en interior de animales (como en las vías respiratorias de monos), pueden seguir adelante en condiciones mínimas de vida.

Las diatomeas poseen un protoplasma interno de densidad similar a la del agua, pero su pared celular contiene grandes cantidades de siliconas, que tienen una densidad dos o tres veces mayor. Como resultado de esto, las diatomeas tienden a hundirse en un rango de 1m por día-1.

Dichas células, se ubican en la columna de agua y toman los nutrientes inorgánicos, tendiendo a formar zonas con una drástica reducción de nutrientes alrededor de ellas.

Hundiéndose es la forma en que las diatomeas alivian este problema. Sin embargo, la desventaja de esto es que cada vez se hunden a zonas de menor y menor intensidad lumínica.

Entonces, lo que se necesita es una mezcla a gran escala en la columna de agua que llevara a las diatomeas a la superficie nuevamente. Así, las diatomeas son características de aguas en que la mezcla por vientos ocurre con frecuencia.

Estas células poseen un control limitado de su flotabilidad, mediante la producción de grasas y aceites internos; pero es más difícil para el plancton de agua dulce que para el de agua de mar lograr una flotabilidad neutra por la diferencia de densidad entre los dos medios.

2.5.1.6. Importancia económica y ecológica

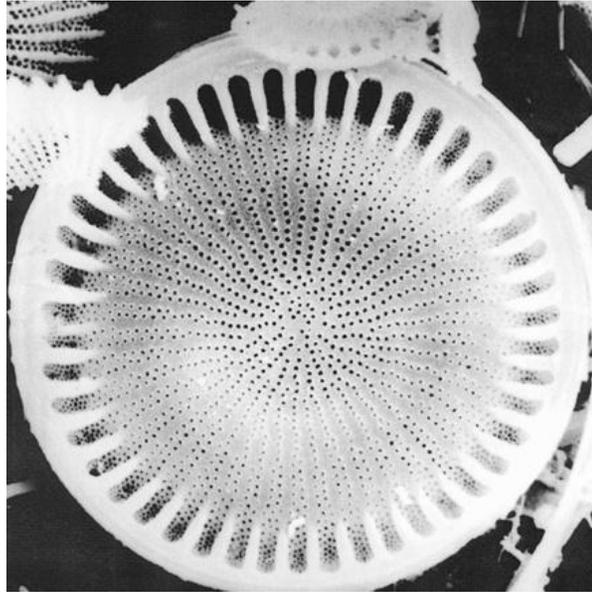
- Como insecticida: con un 99,86% de Tierra de Diatomeas, este compuesto se utiliza para combatir todo tipo de plagas conocidas, sin dañar las plantas; los animales o personas, no siendo tóxico ni dejando ningún tipo de residuos en los frutos. Es de amplio espectro, fácil aplicación y su manipuleo requiere mínimas precauciones. Además, es muy útil en el control de hormigas; cucarachas; vinchucas; hongos; etc.
- Como fertilizante: el sulfato múltiple natural al 10,3%; reconocido como antibacteriano; reemplaza con grandes ventajas en la desinfección del suelo al bromuro de metilo (altamente tóxico e inestable). Dicho compuesto combinado con oligoelementos se encuentra listo para brindar a las plantas toda su capacidad nutritiva y sanitaria. Sus componentes son catalizadores; biocatalizadores y presentan una gran cantidad de nutrientes.

Esto se debe, a que las diatomeas o algas fósiles actúan física y mecánicamente, siendo la alternativa de todos los venenos que actúan por contacto o ingestión. Por ejemplo, es sorprendentemente efectivo en la destrucción de los insectos a los que deshidrata por la capacidad absorbente de su componente activo. Aplicado con agua, se pulveriza sobre las plantas cumpliendo leal y completamente su función benefactora y liberadora de plagas.

- Como suplemento mineral: se utiliza la Diatomea Natural Amorfa. Es sumamente indicada para suplir la carencia nutricional en las desmineralizadas tierras de cultivos y en los animales, debido a que el complemento mineral de la misma mejora la asimilación de los alimentos, siendo un excelente antiaglomerante que evita la descomposición y la compactación del bolo alimenticio. Además; gracias a su capacidad absorbente; controla gases y olores obteniendo de forma inmediata el mejoramiento de los animales en su pelaje y plumas, así como incrementando la estimulación del apetito; vigor y estado de salud en general. Por ejemplo, es recomendado como complemento nutritivo para animales de granja. En gallinas, mejora la cáscara de los huevos, evita el stress, mejora las deposiciones y es un antiparasitario en general.
- Otros usos: Recientemente, ingenieros y científicos han demostrado que a partir de una porción de cierta enzima procedente de la diatomea *Cylindrotheca fusiformis* se pueden crear nuevos materiales de sílice a escala nanométricas, aptos para un amplio rango de aplicaciones. Dichos hombres de ciencia, pretenden además a partir de ésta enzima desarrollar una nueva nanoestructura híbrida (orgánica e inorgánica) de esferas de sílice. Este material podría emplearse para fabricar sensores; gafas especiales de visión nocturna y un dispositivo cuyo sistema fotónico sería capaz de producir holograma ultrarrápido. Otra aplicación de gran importancia a nivel médico comprendería una terapia no invasora contra el cáncer; el almacenamiento óptico de información y láseres de luz azul.

En la figura 5 se representa una fotografía de una dolomita, como se observa tiene un tamaño de agujero menos variable que el del carbón.

Figura 13. **Fotografía de una dolomita**



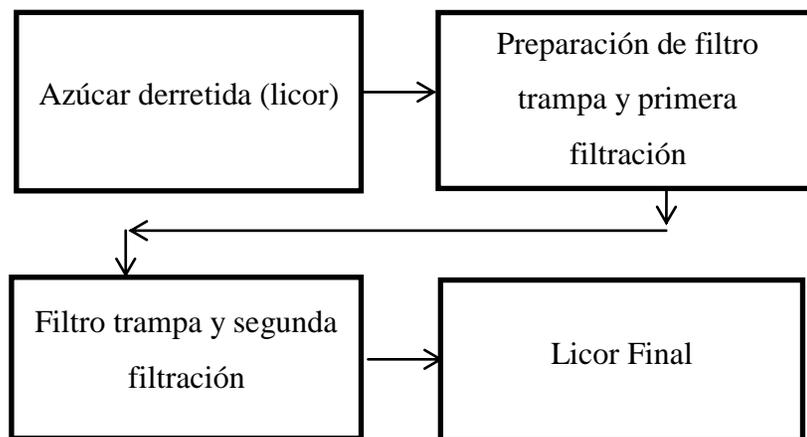
Fuente: ROGER, Pablo. Filtración de jarabes.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

- a. Azúcar derretido
- b. Licor Final
- c. Decoloración
- d. Carbón Activado
- e. Tierra diatomácea o tierra diatomea

Figura 14. Diagrama de proceso de decoloración de azúcar derretido



Fuente: elaboración propia.

El licor final es posteriormente concentrado por medio de la evaporación en los tachos de refinería, ya concentrado, es purgado hacia las centrífugas para separar el azúcar del jarabe, el azúcar es secado y envasado.

3.2. Localización

El presente estudio abarco un ingenio azucarero guatemalteco en el área de proceso de derretido de azúcar, el subproceso de filtración donde se lleva el tratamiento de adsorción y filtración, previo a la elaboración de azúcar refino.

3.3. Recursos humanos disponibles

Se cuenta con un auxiliar de laboratorio que recolecta la muestra y un analista de licores que se encarga de analizar la muestra.

3.4. Recursos materiales disponibles (cristalería y equipos)

Los ensayos y muestreos se realizaron con los equipos de análisis instalados en el laboratorio del ingenio. El uso adecuado de los equipos fue supervisado para la obtención de los resultados.

3.4.1. Equipo

- a. Agitador
- b. Espectrofotómetro
- c. Balanza analítica
- d. Refractómetro
- e. Bomba de vacío

3.4.2. Cristalería

- a. Beakers de diferentes tamaños
- b. Agitador magnético

- c. Erlenmeyer para vacío

3.4.3. Reactivos

- a. Carbón activado
- b. Tierra diatomácea
- c. Azúcar derretida (licor) 63° Brix

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

El uso de técnicas cualitativas o cuantitativas fueron esenciales para la obtención de los análisis y son técnicas avaladas por la Comisión de Métodos Uniformes para los Análisis de Azúcar.

3.5.1. Disolución del derretido

- Diluir el derretido con agua desmineralizada
- Pasar por un sistema limpiador ultrasónico para remover aire
- Agitar y filtrar por medio de una bomba de succión.
- Leer datos del espectrofotómetro y calcular turbidez y color.

Cálculos:

Absorbancia = dato del espectrofotómetro

3.5.2. Análisis de absorbancia y cálculo de color

- Preparar la muestra
- Pesar la cantidad de acuerdo al rango de color esperado

- Pesar las cantidades de muestra y agua para disolver con agitación.
- Ajustar el pH a $7,00 \pm 0,1$ de la solución.
- Filtrar solución a través de un filtro de membrana $0,45 \mu\text{m}$.
- Llenar celda con agua destilada previamente filtrada a $0,45 \mu\text{m}$ tomar lectura en espectrofotómetro, esto es el blanco, anotar como "Absorbancia blanco".
- Llenar la celda con otra porción de la solución y tomar lectura en espectrofotómetro, anotar como "Absorbancia solución filtrada".
- Tomar lectura de brix en refractómetro de la solución y anotar "brix solución filtrada".
- Tomar el resto de la solución sin filtrar, llenar la celda con la solución restante y tomar lectura en espectrofotómetro, anotar como "Absorbancia solución sin filtrar".
- Tomar alícuota de la solución y leer en refractómetro. Anotar "brix solución sin filtrar".
- Calcular Absorbancia corregida, restando "Absorbancia blanco" menos "Absorbancia solución filtrada" o "Absorbancia solución sin filtrar"

Cálculos:

$$\text{Color} = \text{Absorbancia Corregida} \times 1000 \div b \times c [\text{Unidades Icumsa IU}]^1$$

Donde:

b = Medida de la longitud celda en cm (paso de luz)

c = Brix solución * Densidad aparente / 100

3.6. Análisis estadístico

Se realizó el estudio estadístico del comportamiento de la decoloración del licor de jarabes, para un proceso que incluye repeticiones y frecuencia de los muestreos.

3.6.1. Análisis gráfico

Para el análisis se utiliza una gráfica de dispersión para evaluar la relación entre las variables. Los valores nos sirven como las coordenadas x , y coordenadas y para graficar cada observación y así resumir comportamientos y facilitar interpretación de los resultados.

3.6.2 Análisis de regresión

Para medir la asociación lineal que entre la dosis de tierra diatomácea y carbón que se ajuste al análisis gráfico y así describir el comportamiento del porcentaje de decoloración.

Dado que para una ecuación de regresión con múltiples predictores el modelo es:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_1^2 + \beta_3 X_1^3 + \beta_4 X_2 + \beta_5 X_2^2 + \beta_6 X_2^3 + \beta_7 X_1 X_2$$

Donde $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7$ y β_0 son

X_1 = tierra (g)

X_2 = carbón (g)

3.6.3 Análisis de varianza (ANOVA)

Esta prueba consiste en determinar si la hipótesis de que las medias de las poblaciones del resultado de decoloración son iguales, evaluando como hipótesis nula que todas las medias de la población son iguales, mientras que la hipótesis alterna establece que al menos una es diferente. Es decir que establece si hay diferencia significativa entre los porcentajes de decoloración para cada una de las dosis aplicadas.

3.7. Recolección y ordenamiento de la información

Se cuenta con los datos que analizan en el laboratorio durante el período de zafra y cuando se tienen las variaciones de dosificación. Para el azúcar derretido y el licor filtrado se realizan análisis cada 4 horas.

Se utilizó el siguiente formato para la recolección de los datos de azúcar derretido, licor final y el porcentaje de decoloración:

Tabla I. Resultados procesados

Zafra 2011				
Tratamiento	Repetición	Color IU Derretido	Filtrado Color IU	% Decoloración
1	1	---	---	---
2	1	---	---	---
3	1	---	---	---
4	1	---	---	---
....		---	---	---
....		---	---	---
....		---	---	---
73	3	---	---	---
74	3	---	---	---
75	3	---	---	---

Fuente: elaboración propia.

Para la variación de dosis de carbón y tierra diatomácea se utilizó el siguiente formato:

Tabla II. Variaciones de dosificaciones

Dosificaciones (gramos/saco)		
Tratamiento	Tierra	Carbón
1	0,04	0,01
2	0,04	0,02
3	0,04	0,03
4	0,04	0,04
5	0,04	0,05
6	0,05	0,01
7	0,05	0,02
8	0,05	0,03
...		
...		
...		
25	0,08	0,05

Fuente: elaboración propia.

3.7.1. Porcentaje de decoloración en el licor filtrado

Se utiliza la siguiente ecuación:

$$PDC = (cad - clf) \div (cad * 100)$$

Donde:

PDC = Porcentaje de decoloración

cad = color azúcar derretido

clf = color licor final

Ejemplo:

Para el tratamiento 1 de la zafra 2011, el color del azúcar derretido 215,57 y el color del licor derretido 121,82:

$$cad = 215,57$$

$$clf = 121,82$$

$$PDC = (215,57 - 121,82) \div (215,82 * 100)$$

$$PDC = 43,50$$

3.7.2. Datos calculados

Los datos calculados constan de 25 tratamientos y 3 repeticiones para un total de 125 análisis. Las variaciones en las dosificaciones se hicieron de acuerdo a los parámetros de operación recomendados en la metodología.

Tabla III. **Porcentaje de decoloración licor filtrado**

Tratamiento	Repetición	Tierra gramos	Carbón gramos	Color licor filtrado	Color azúcar derretido	% Decoloración
t1	1	0,04	0,01	121,82	215,57	43,49%
t1	2	0,04	0,01	179,84	259,55	30,71%
t1	3	0,04	0,01	192,79	266,47	27,65%
t2	1	0,04	0,02	135,05	222,16	39,21%
t2	2	0,04	0,02	113,84	207,59	45,16%
t2	3	0,04	0,02	147,93	232,93	36,49%
t3	1	0,04	0,03	126,85	223,46	43,23%
t3	2	0,04	0,03	130,98	213,86	38,75%
t3	3	0,04	0,03	130,21	204,26	36,25%
t4	1	0,04	0,04	156,18	212,18	26,39%
t4	2	0,04	0,04	161,33	231,86	30,42%
t4	3	0,04	0,04	147,45	228,02	35,33%
t5	1	0,04	0,05	134,23	236,87	43,33%
t5	2	0,04	0,05	176,74	267,05	33,82%
t5	3	0,04	0,05	142,84	240,24	40,54%
t6	1	0,05	0,01	123,84	202,26	38,77%
t6	2	0,05	0,01	160,96	223,15	27,87%
t6	3	0,05	0,01	126,46	199,72	36,68%
t7	1	0,05	0,02	129,44	189,82	31,81%
t7	2	0,05	0,02	111,15	183,59	39,46%
t7	3	0,05	0,02	177,05	256,66	31,02%
t8	1	0,05	0,03	122,40	213,74	42,73%
t8	2	0,05	0,03	145,85	226,31	35,55%
t8	3	0,05	0,03	90,89	176,88	48,61%
t9	1	0,05	0,04	95,72	199,73	52,08%
t9	2	0,05	0,04	108,29	175,20	38,19%
t9	3	0,05	0,04	156,21	226,27	30,96%
t10	1	0,05	0,05	130,39	213,81	39,02%
t10	2	0,05	0,05	168,79	214,96	21,48%
t10	3	0,05	0,05	93,38	175,28	46,73%
t11	1	0,06	0,01	177,00	243,63	27,35%
t11	2	0,06	0,01	105,00	165,57	36,58%
t11	3	0,06	0,01	104,80	167,08	37,28%
t12	1	0,06	0,02	174,87	239,58	27,01%

Continuación de la tabla III.

Tratamiento	Repetición	Tierra gramos	Carbón gramos	Color licor filtrado	Color azúcar derretido	% Decoloración
t12	2	0,06	0,02	173,42	277,40	37,48%
t12	3	0,06	0,02	151,58	233,05	34,96%
t13	1	0,06	0,03	129,55	207,76	37,64%
t13	2	0,06	0,03	119,08	205,48	42,05%
t13	3	0,06	0,03	123,36	180,22	31,55%
t14	1	0,06	0,04	127,68	204,54	37,58%
t14	2	0,06	0,04	119,51	170,43	29,88%
t14	3	0,06	0,04	137,68	199,38	30,95%
t15	1	0,06	0,05	133,30	212,28	37,21%
t15	2	0,06	0,05	128,51	203,39	36,82%
t15	3	0,06	0,05	97,53	176,73	44,81%
t16	1	0,07	0,01	137,57	201,86	31,85%
t16	2	0,07	0,01	155,26	224,50	30,84%
t16	3	0,07	0,01	162,36	240,22	32,41%
t17	1	0,07	0,02	154,29	210,86	26,83%
t17	2	0,07	0,02	157,35	211,58	25,63%
t17	3	0,07	0,02	127,02	223,12	43,07%
t18	1	0,07	0,03	132,76	208,79	36,41%
t18	2	0,07	0,03	117,15	175,07	33,08%
t18	3	0,07	0,03	149,71	205,70	27,22%
t19	1	0,07	0,04	133,70	200,48	33,31%
t19	2	0,07	0,04	100,46	188,48	46,70%
t19	3	0,07	0,04	132,85	206,96	35,81%
t20	1	0,07	0,05	154,57	246,03	37,17%
t20	2	0,07	0,05	136,96	257,23	46,76%
t20	3	0,07	0,05	143,03	242,35	40,98%
t21	1	0,08	0,01	153,12	246,89	37,98%
t21	2	0,08	0,01	152,49	210,59	27,59%
t21	3	0,08	0,01	127,86	222,49	42,53%
t22	1	0,08	0,02	158,06	217,93	27,47%
t22	2	0,08	0,02	146,69	214,34	31,56%
t22	3	0,08	0,02	159,63	265,41	39,86%
t23	1	0,08	0,03	161,73	240,49	32,75%

Continuación de la tabla III.

Tratamiento	Repetición	Tierra gramos	Carbón gramos	Color licor filtrado	Color azúcar derretido	% Decoloración
t23	2	0,08	0,03	137,57	234,70	41,38%
t23	3	0,08	0,03	178,88	243,70	26,60%
t24	1	0,08	0,04	159,57	282,99	43,61%
t24	2	0,08	0,04	126,27	234,30	46,11%
t24	3	0,08	0,04	149,81	263,50	43,15%
t25	1	0,08	0,05	136,99	237,38	42,29%
t25	2	0,08	0,05	141,02	230,17	38,73%
t25	3	0,08	0,05	135,55	249,87	45,75%

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Datos agrupados por dosificación de tierra 0,04 gramos**

Tratamiento	Repetición	Tierra gramos	Carbón gramos	Color licor filtrado	Color azúcar derretido	% Decoloración
t1	1	0,04	0,01	121,82	215,57	43,49%
t1	2	0,04	0,01	179,84	259,55	30,71%
t1	3	0,04	0,01	192,79	266,47	27,65%
t2	1	0,04	0,02	135,05	222,16	39,21%
t2	2	0,04	0,02	113,84	207,59	45,16%
t2	3	0,04	0,02	147,93	232,93	36,49%
t3	1	0,04	0,03	126,85	223,46	43,23%
t3	2	0,04	0,03	130,98	213,86	38,75%
t3	3	0,04	0,03	130,21	204,26	36,25%
t4	1	0,04	0,04	156,18	212,18	26,39%
t4	2	0,04	0,04	161,33	231,86	30,42%
t4	3	0,04	0,04	147,45	228,02	35,33%
t5	1	0,04	0,05	134,23	236,87	43,33%
t5	2	0,04	0,05	176,74	267,05	33,82%
t5	3	0,04	0,05	142,84	240,24	40,54%

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Datos agrupados por dosificación de tierra 0,05 gramos**

Tratamiento	Repetición	Tierra gramos	Carbón gramos	Color licor filtrado	Color azúcar derretido	% Decoloración
t6	1	0,05	0,01	123,84	202,26	38,77%
t6	2	0,05	0,01	160,96	223,15	27,87%
t6	3	0,05	0,01	126,46	199,72	36,68%
t7	1	0,05	0,02	129,44	189,82	31,81%
t7	2	0,05	0,02	111,15	183,59	39,46%
t7	3	0,05	0,02	177,05	256,66	31,02%
t8	1	0,05	0,03	122,40	213,74	42,73%
t8	2	0,05	0,03	145,85	226,31	35,55%
t8	3	0,05	0,03	90,89	176,88	48,61%
t9	1	0,05	0,04	95,72	199,73	52,08%
t9	2	0,05	0,04	108,29	175,20	38,19%
t9	3	0,05	0,04	156,21	226,27	30,96%
t10	1	0,05	0,05	130,39	213,81	39,02%
t10	2	0,05	0,05	168,79	214,96	21,48%
t10	3	0,05	0,05	93,38	175,28	46,73%

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Datos agrupados por dosificación de tierra 0,06 gramos**

Tratamiento	Repetición	Tierra gramos	Carbón gramos	Color licor filtrado	Color azúcar derretido	% Decoloración
t11	1	0,06	0,01	177,00	243,63	27,35%
t11	2	0,06	0,01	105,00	165,57	36,58%
t11	3	0,06	0,01	104,80	167,08	37,28%
t12	1	0,06	0,02	174,87	239,58	27,01%
t12	2	0,06	0,02	173,42	277,40	37,48%
t12	3	0,06	0,02	151,58	233,05	34,96%
t13	1	0,06	0,03	129,55	207,76	37,64%
t13	2	0,06	0,03	119,08	205,48	42,05%
t13	3	0,06	0,03	123,36	180,22	31,55%
t14	1	0,06	0,04	127,68	204,54	37,58%
t14	2	0,06	0,04	119,51	170,43	29,88%
t14	3	0,06	0,04	137,68	199,38	30,95%
t15	1	0,06	0,05	133,30	212,28	37,21%
t15	2	0,06	0,05	128,51	203,39	36,82%
t15	3	0,06	0,05	97,53	176,73	44,81%

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Datos agrupados por dosificación de tierra 0,07 gramos**

Tratamiento	Repetición	Tierra gramos	Carbón gramos	Color licor filtrado	Color azúcar derretido	% Decoloración
t16	1	0,07	0,01	137,57	201,86	31,85%
t16	2	0,07	0,01	155,26	224,50	30,84%
t16	3	0,07	0,01	162,36	240,22	32,41%
t17	1	0,07	0,02	154,29	210,86	26,83%
t17	2	0,07	0,02	157,35	211,58	25,63%
t17	3	0,07	0,02	127,02	223,12	43,07%
t18	1	0,07	0,03	132,76	208,79	36,41%
t18	2	0,07	0,03	117,15	175,07	33,08%
t18	3	0,07	0,03	149,71	205,70	27,22%
t19	1	0,07	0,04	133,70	200,48	33,31%
t19	2	0,07	0,04	100,46	188,48	46,70%
t19	3	0,07	0,04	132,85	206,96	35,81%
t20	1	0,07	0,05	154,57	246,03	37,17%
t20	2	0,07	0,05	136,96	257,23	46,76%
t20	3	0,07	0,05	143,03	242,35	40,98%

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Datos agrupados por dosificación de tierra 0,08 gramos**

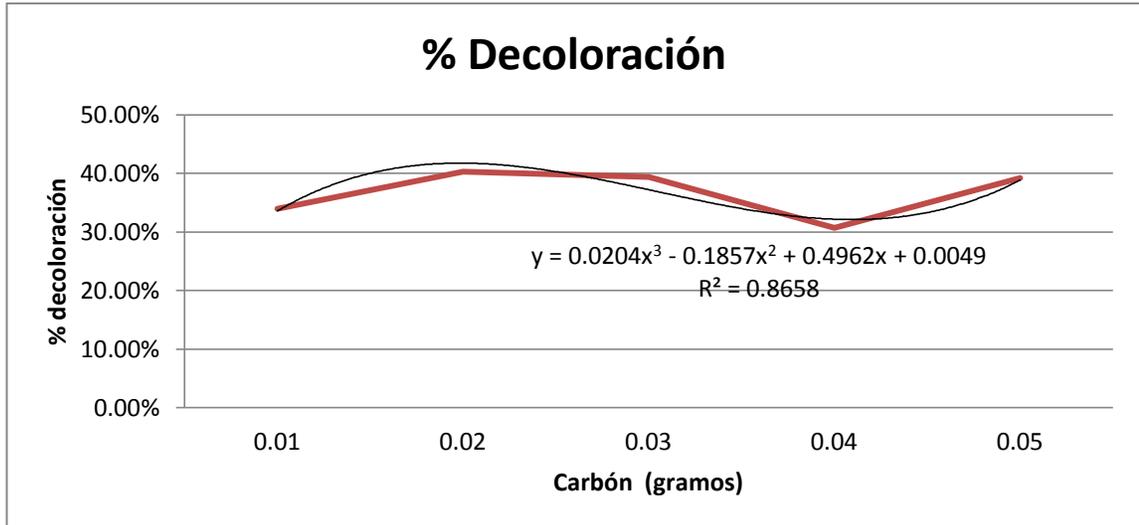
Tratamiento	Repetición	Tierra gramos	Carbón gramos	Color licor filtrado	Color azúcar derretido	% Decoloración
t21	1	0,08	0,01	153,12	246,89	37,98%
t21	2	0,08	0,01	152,49	210,59	27,59%
t21	3	0,08	0,01	127,86	222,49	42,53%
t22	1	0,08	0,02	158,06	217,93	27,47%
t22	2	0,08	0,02	146,69	214,34	31,56%
t22	3	0,08	0,02	159,63	265,41	39,86%
t23	1	0,08	0,03	161,73	240,49	32,75%
t23	2	0,08	0,03	137,57	234,70	41,38%
t23	3	0,08	0,03	178,88	243,70	26,60%
t24	1	0,08	0,04	159,57	282,99	43,61%
t24	2	0,08	0,04	126,27	234,30	46,11%
t24	3	0,08	0,04	149,81	263,50	43,15%
t25	1	0,08	0,05	136,99	237,38	42,29%
t25	2	0,08	0,05	141,02	230,17	38,73%
t25	3	0,08	0,05	135,55	249,87	45,75%

Fuente: elaboración propia.

3.7.3. Análisis gráfico

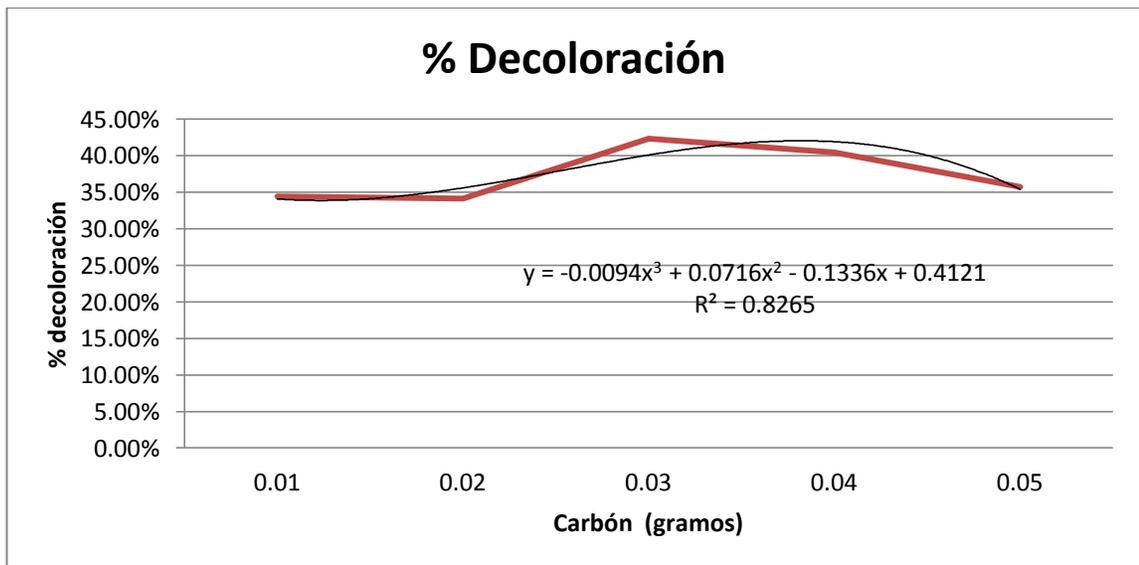
El análisis gráfico con valor constante de tierra diatomácea y variación de la dosis de carbón para observar alguna linealidad entre dosificaciones.

Figura 15. **Dosis 0,04 gramos de tierra**



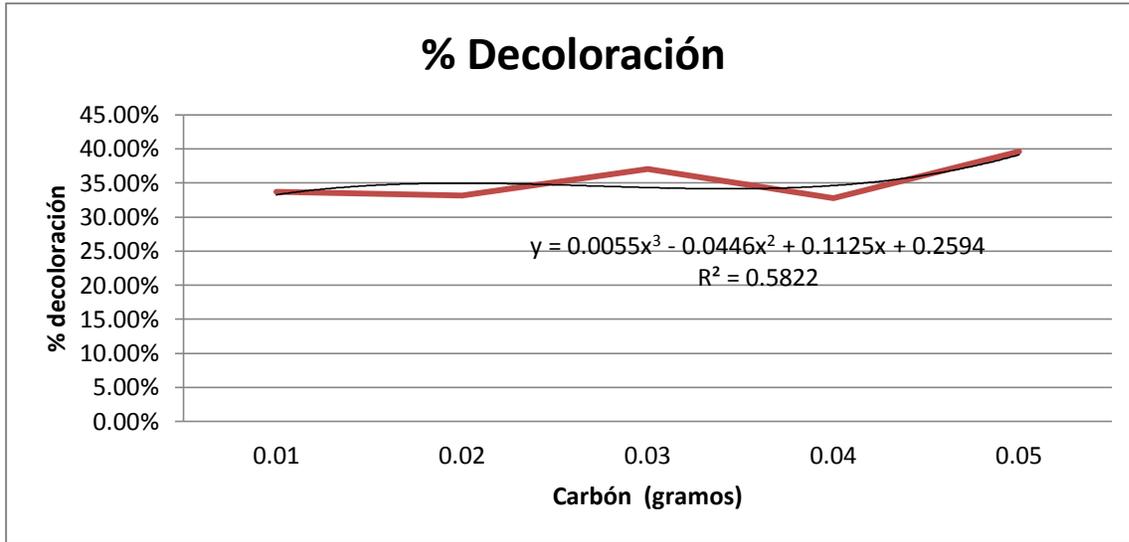
Fuente: elaboración propia con base en Excel.

Figura 16. **Dosis 0,05 gramos de tierra**



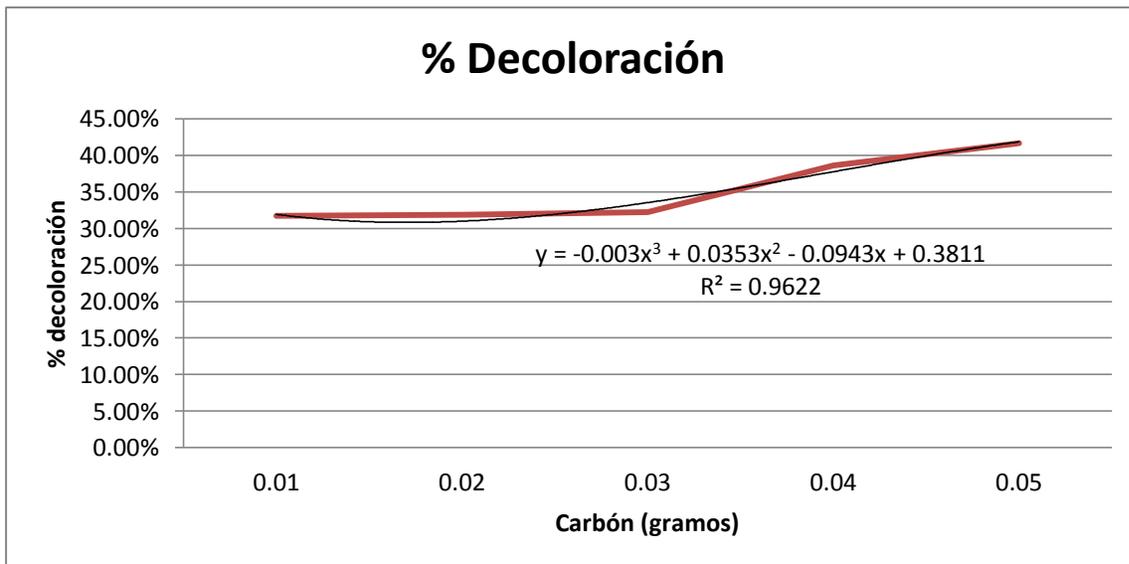
Fuente: elaboración propia con base en Excel.

Figura 17. Dosis 0,06 gramos de tierra



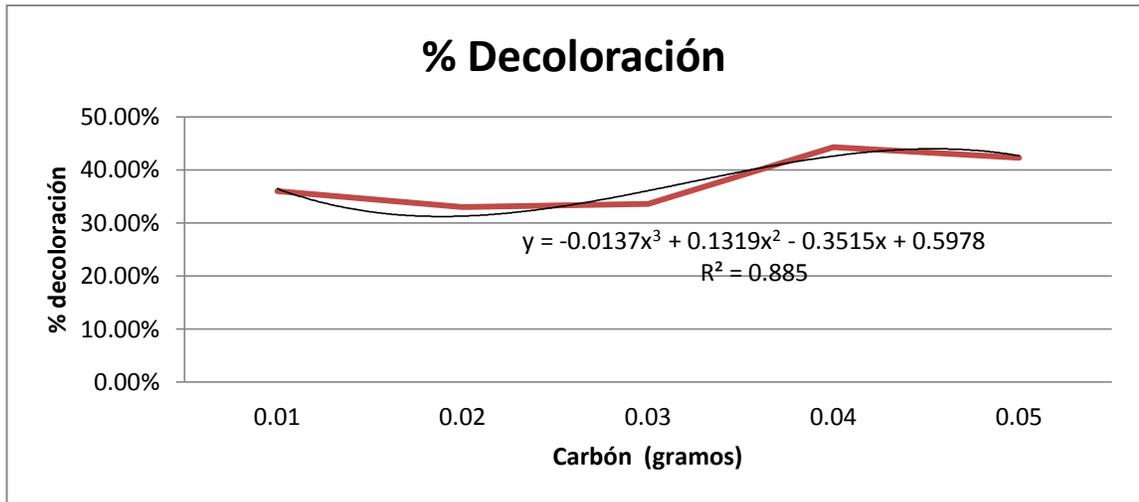
Fuente: elaboración propia con base en Excel.

Figura 18. Dosis 0,07 gramos de tierra



Fuente: elaboración propia con base en Excel.

Figura 19. **Dosis 0,08 gramos de tierra**



Fuente: elaboración propia con base en Excel.

3.7.4. Análisis de regresión

La regresión se utiliza para predecir una medida basándose en el conocimiento de otra, como lo son los resultados de los colores.

Tabla IX. **Estadísticas de regresión**

<i>Estadísticas de Regresión</i>	
Múltiple R	0,402943873
R Cuadrado	0,162363765
R Cuadrado Ajustado	0,074849531
Error Estandar	0,062948937
Observaciones	75

Fuente: PHSTAT Excel.

3.7.5. Análisis de varianza (Anova)

Correlación de Pearson entre porcentaje de decoloración y aplicación de carbón = 0,312

Valor P = 0,006 para prueba de normalidad.

Tabla X. **Anova**

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significancia F</i>
Regresión	7	0.051461	0.0073516	1.855284	0.091051
Residual	67	0.265492	0.0039625		
Total	74	0.316953			

Fuente: PHSTAT. Excel.

Agrupación de la información utilizando el método de Tukey, el cual designa una letra a cada grupo para diferenciar las medias de los otros grupos de datos.

Tabla XI. **Tratamientos**

Tratamientos		
t24	3	0.44289 A
t8	3	0.42301 A
t25	3	0.42258 A
t20	3	0.41637 A
t9	3	0.40410 A
t2	3	0.40288 A
t15	3	0.39612 A
t3	3	0.39414 A
t5	3	0.39231 A
t19	3	0.38606 A
t13	3	0.37081 A
t21	3	0.36034 A
t10	3	0.35740 A
t6	3	0.34441 A
t7	3	0.34095 A
t1	3	0.33950 A
t11	3	0.33736 A
t23	3	0.33578 A
t12	3	0.33151 A
t22	3	0.32963 A
t14	3	0.32800 A
t18	3	0.32239 A
t17	3	0.31843 A
t16	3	0.31701 A
t4	3	0.30716 A

Fuente: Minitab.

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

4. RESULTADOS

4.1. Promedio de porcentaje de decoloración licor filtrado

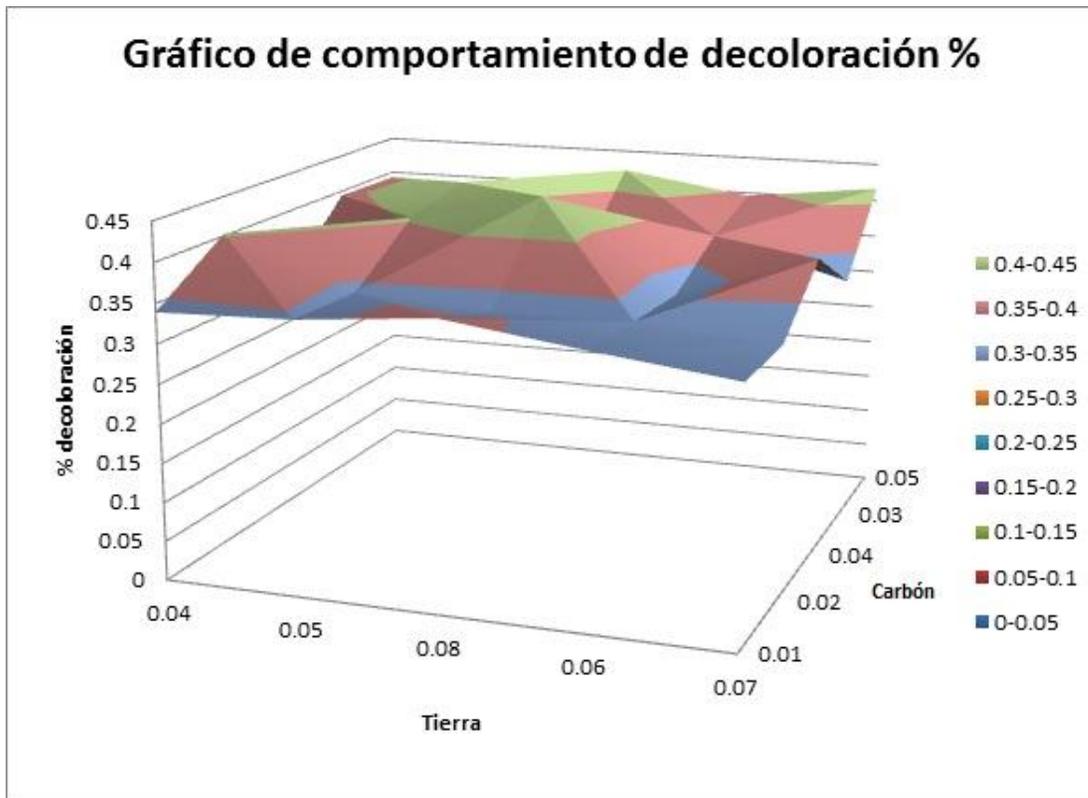
El promedio del porcentaje de decoloración consiste en el promedio de los resultados obtenidos para cada tratamiento y cada una de las repeticiones.

Tabla XII. **Tabla de dosificación promedio de tierra y carbón**

	Carbón (gramos)					
		0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
Tierra (gramos)	0,04	33,95%	40,29%	39,41%	30,72%	39,23%
	0,05	34,44%	34,09%	42,30%	40,41%	35,74%
	0,06	33,74%	33,15%	37,08%	32,80%	39,61%
	0,07	31,70%	31,84%	32,24%	38,61%	41,64%
	0,08	36,03%	32,96%	33,58%	44,29%	42,26%

Fuente: Minitab.

Figura 20. **Gráfico de dispersión de resultados consolidados (carbón y tierra en gramos)**



Fuente: elaboración propia con base en Excel.

4.2. Ecuación de regresión

La ecuación de regresión para el porcentaje de decoloración corresponde a:

$$\begin{aligned} \% \text{ decoloración} = & \\ & - 0,306 + 40,9 \text{ tierra} - 781 \text{ tierra}^2 + 0,4574 \text{ Tierra}^3 - 3,2 \text{ carbon} + 17 \\ & \text{Carbon}^2 - 57 \text{ Carbon}^3 + 63,3 \text{ Sinergia} \end{aligned}$$

5. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Se realizó la determinación de la dosificación óptima de carbón activado y tierra diatomácea, para la remoción de color del azúcar derretido en la fabricación de azúcar refino en un ingenio azucarero guatemalteco, para establecer valores de dosificación óptimos de insumos que permitan obtener producto que cumpla con las exigencias del mercado.

Para la determinación de la dosificación se utilizaron muestreos del material azucarado previos a iniciar la fase de decoloración y posteriores a pasar por el proceso de adsorción y filtración, mediante la variación de la dosificación de carbón activo en cinco diferentes cantidades para una dosificación fija de tierra diatomácea. Esta prueba se realizó con cinco variaciones de tierra y cinco de carbón, con un total de 25 tratamientos, y 3 repeticiones para cada uno de los tratamientos, con un total de 75 tratamientos.

De acuerdo a los datos de los tratamientos planteados y repeticiones el porcentaje de decoloración (véase tabla IX), del 36,48%, con un máximo de 37,82% y un mínimo de 35,21% de decoloración, lo cual indica que cualquiera de las combinaciones pudieran obtener un porcentaje similar de decoloración.

Se realizó un gráfico de dispersión para determinar una tendencia en los datos, dando como resultado que para cada una de las variaciones de los tratamientos y cada cambio en carbón muestran un comportamiento con dispersión de datos cúbico.

Utilizando una ecuación cúbica que permita una interacción directa del aporte de tierra y de carbón, se obtuvo como resultado un coeficiente de correlación de un 0,1623 (véase tabla VII), con lo que se determina que existe una relación poco significativa en el porcentaje de remoción de color y la dosificación de tierra y carbón.

Esto pudiera indicar que existen otras variables del proceso que no están relacionadas a la dosificación que influyen en el proceso de decoloración, sin embargo la aplicación de insumos para decoloración del azúcar derretido si ayuda a mejorar la calidad del producto base para la elaboración de azúcar refino.

Para determinar si el valor de las medias de cada uno de los tratamientos variaban entre sí, se realizó un análisis de varianza, dando como resultado una correlación de Pearson entre porcentaje de decoloración y dosificación de carbón de 31,20% y una prueba de normalidad de los datos de 0,006.

Con el análisis estadístico de los datos obtenidos y el gráfico se puede determinar que existen varios puntos máximos sobre la curva de decoloración y que no hay mucha diferencia entre los resultados y tratamientos. Además que no hay una diferencia significativa de medias, por lo que se obtienen los mismos resultados de decoloración en los rangos empleados.

Como dosificación óptima se alcanza la mejor decoloración cuando se emplea una dosis de 0.8 de tierra y 0.04 de carbón.

CONCLUSIONES

1. No existe correlación significativa en el porcentaje de remoción de color y la dosificación de tierra y carbón que permita una dosificación óptima de estos insumos para la decoloración del azúcar derretido.
2. El mayor porcentaje de decoloración se obtiene con la dosificación de 0,08 gramos de tierra por saco de azúcar y 0,04 gramos de carbón por saco de azúcar con un porcentaje de decoloración de 44,29%.
3. El exceso de carbón se puede considerar a partir de 0,05 gramos por saco de azúcar.
4. De acuerdo al análisis de diferenciación de medias ANOVA, no existe diferencia estadísticamente significativa entre resultados y tratamientos para la decoloración y los rangos de dosificación.

RECOMENDACIONES

1. Establecer dosificaciones más exactas de carbón mediante el uso de dosificadores automatizados, para tener un mejor control de los gramos dosificados de carbón en el material azucarado para reducir posibles excedentes en la producción y determinar una mejor dosificación por medio de estudios posteriores en el proceso de decoloración.
2. El estudio de otras variables de proceso que afecten la adsorción y filtración para continuar búsqueda de optimización de insumos empleados.
3. El uso de otro equipo filtrante posterior a la filtración con tierra para aumentar porcentaje de decoloración.
4. Evaluar procesos posteriores a la decoloración como el lavado de azúcar en centrífugas para la obtención de azúcar refino y su influencia en el mismo.

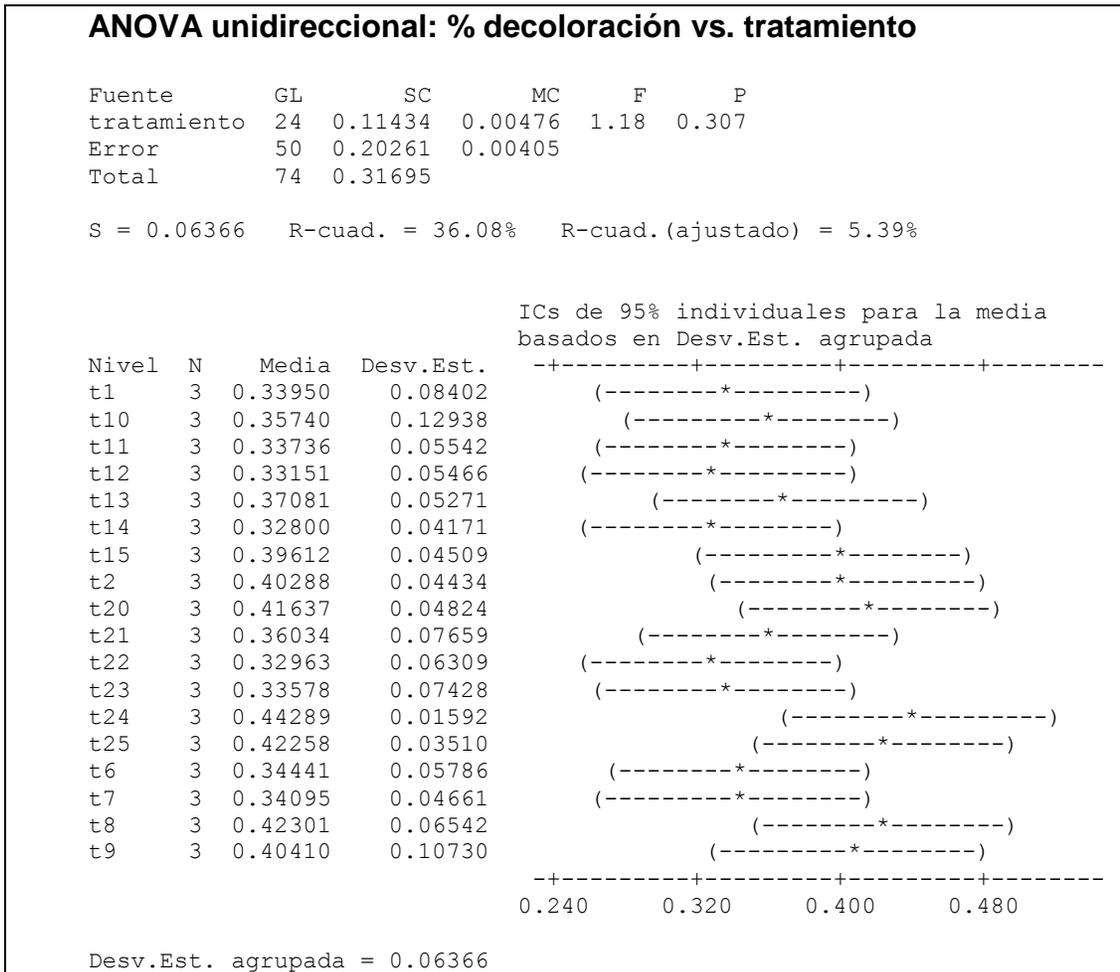
BIBLIOGRAFÍA

1. CHEN, James C.P. *Manual del azúcar de caña*. 11a ed. México: Limusa, 1991. 1200 p. ISBN 978-968183-6627.
2. HUGOT, E. *Manual para ingenieros azucareros*. México: Continental, 1984. 802 p. ISBN 0-444-42438-5.
3. PINEDA MARROQUÍN, Julio Mauricio. *Evaluación de la dosificación óptima de carbón activado pulverizado utilizado en el proceso de decoloración de azúcar blanca sin refinar para la fabricación de bebidas carbonatadas*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2000. 53 p.
4. PINTO MORÁN, Lisbeth Mirella. *Determinación del carbón activado más eficiente para la decoloración de jarabes simples en proceso continuo utilizando torres empacadas*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 1989. 76 p.
5. SPENCER, Guilford; MEADE, George. *Sugar Cane Hand Book*. 9a ed. Estados Unidos: John Wiley and Sons, inc. 1948. 1200 p. ISBN 0-471-530-379.

APÉNDICE

Análisis de comparación de medias

El procedimiento funciona comparando la varianza entre las medias de los grupos y la varianza dentro de los grupos como un método para determinar si los grupos son todo parte de una población más grande o poblaciones separadas con características diferentes. Para este caso se utilizó Minitab® 16.2.2.



Continúa.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
 Todas las comparaciones de dos a dos entre los niveles de tratamiento

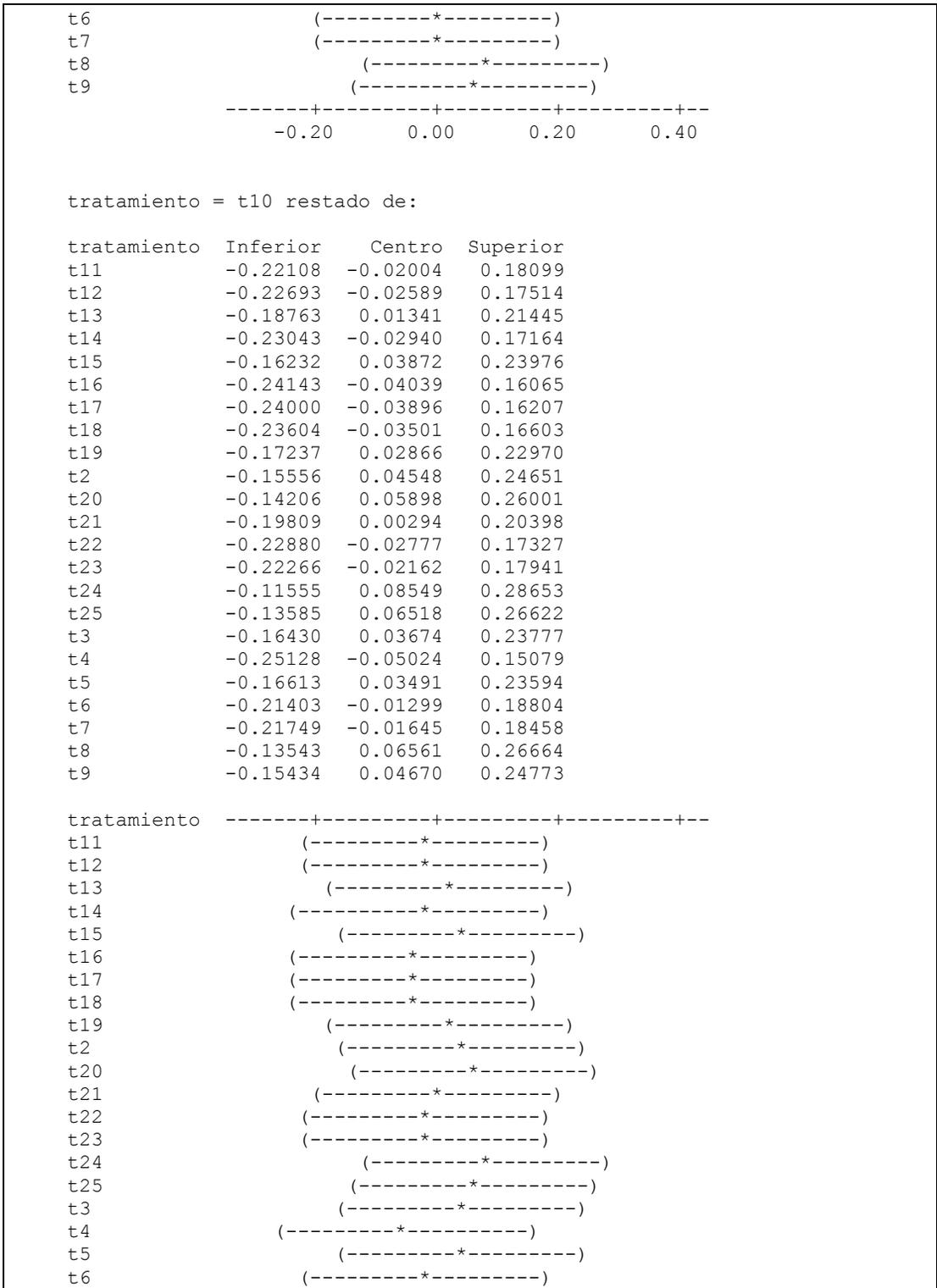
Nivel de confianza individual = 99.97%

tratamiento = t1 restado de:

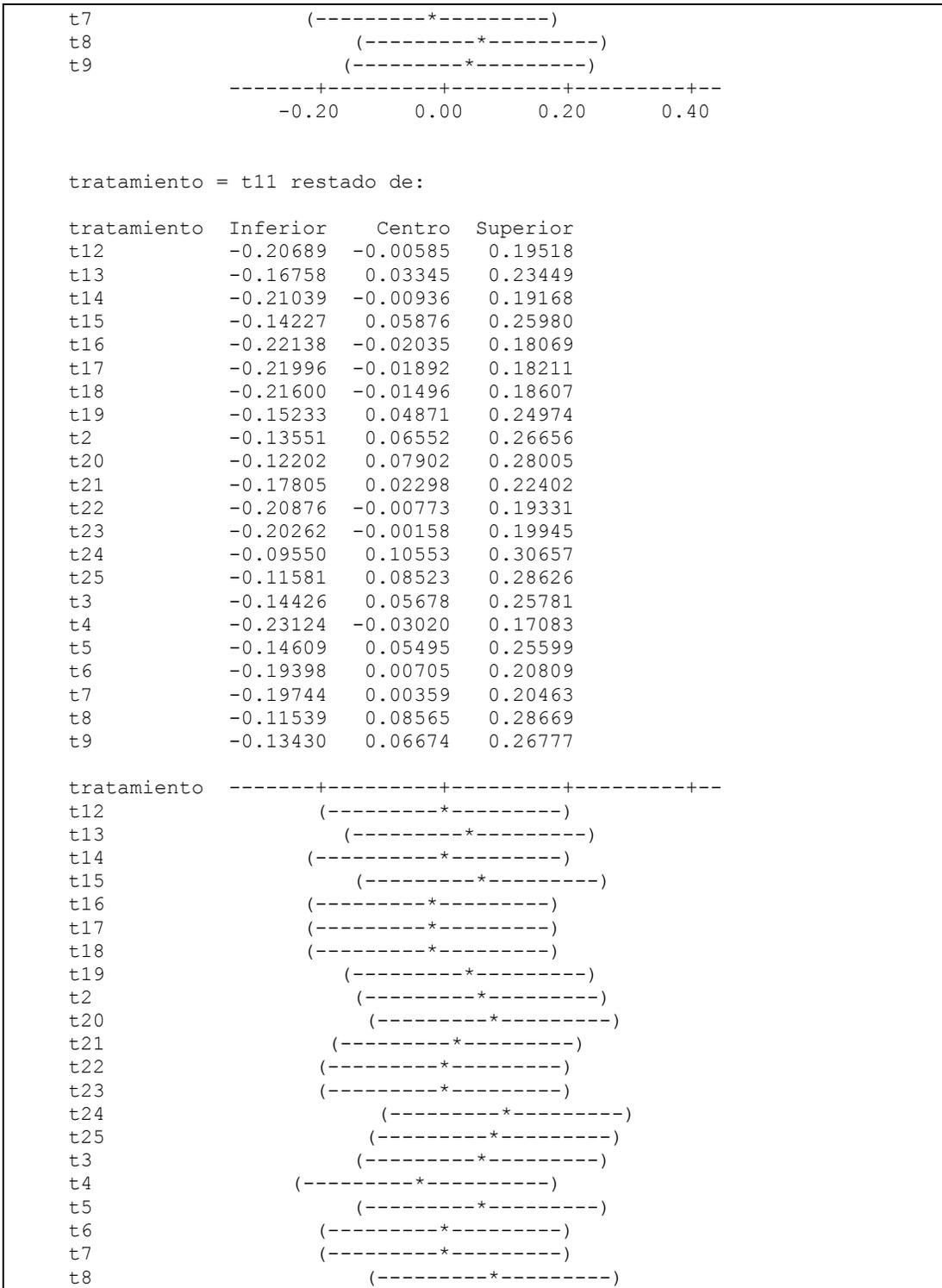
tratamiento	Inferior	Centro	Superior
t10	-0.18314	0.01790	0.21893
t11	-0.20318	-0.00214	0.19889
t12	-0.20903	-0.00800	0.19304
t13	-0.16973	0.03131	0.23234
t14	-0.21254	-0.01150	0.18953
t15	-0.14442	0.05662	0.25765
t16	-0.22353	-0.02249	0.17854
t17	-0.22210	-0.02107	0.17997
t18	-0.21814	-0.01711	0.18393
t19	-0.15447	0.04656	0.24760
t2	-0.13766	0.06338	0.26441
t20	-0.12416	0.07687	0.27791
t21	-0.18020	0.02084	0.22187
t22	-0.21091	-0.00987	0.19116
t23	-0.20476	-0.00373	0.19731
t24	-0.09765	0.10339	0.30442
t25	-0.11795	0.08308	0.28412
t3	-0.14640	0.05463	0.25567
t4	-0.23338	-0.03235	0.16869
t5	-0.14823	0.05281	0.25384
t6	-0.19613	0.00491	0.20594
t7	-0.19959	0.00145	0.20248
t8	-0.11753	0.08350	0.28454
t9	-0.13644	0.06459	0.26563



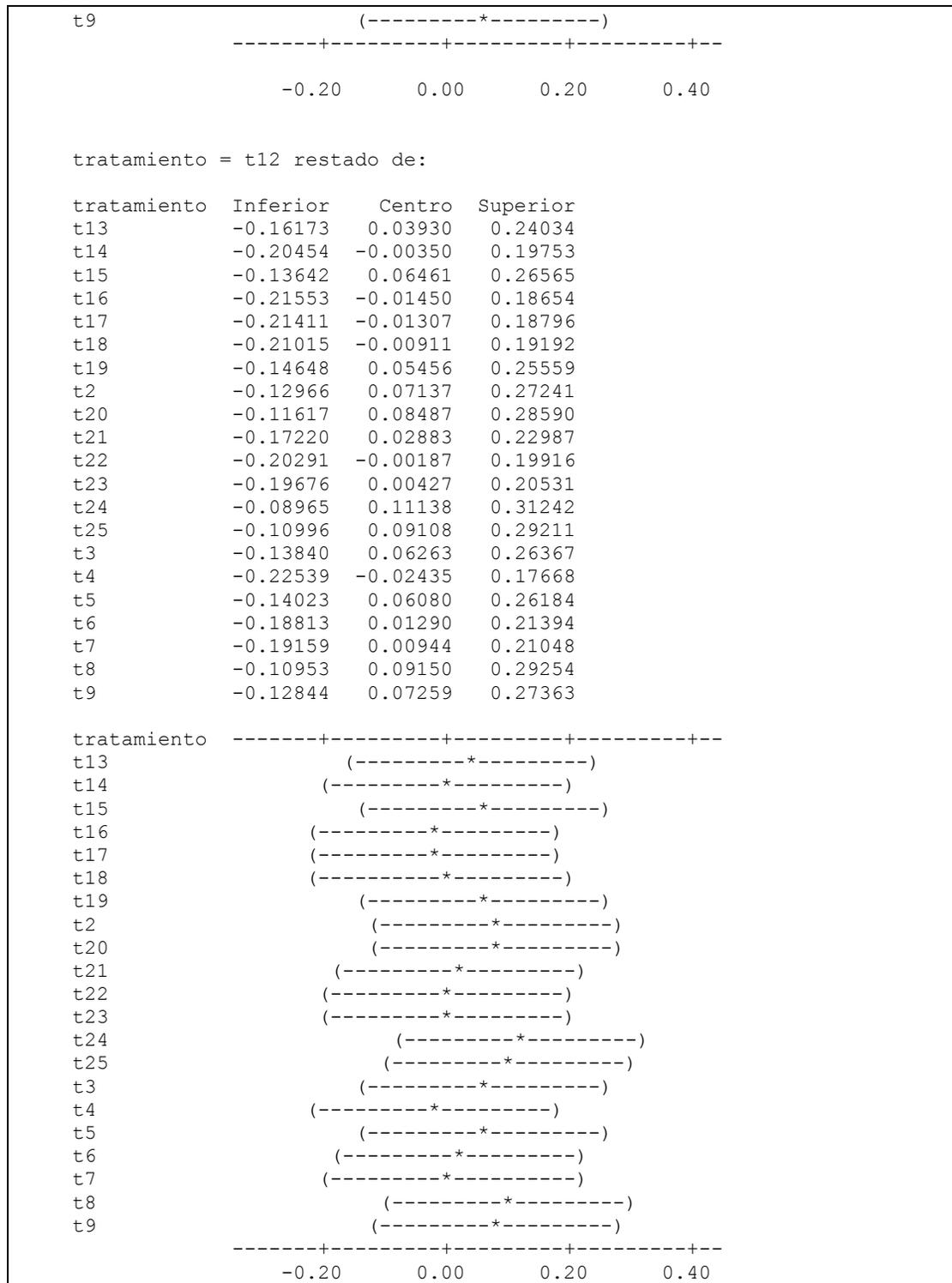
Continúa.



Continúa.



Continúa.



Continúa.

tratamiento = t13 restado de:

tratamiento	Inferior	Centro	Superior
t14	-0.24384	-0.04281	0.15823
t15	-0.17573	0.02531	0.22635
t16	-0.25484	-0.05380	0.14724
t17	-0.25341	-0.05237	0.14866
t18	-0.24945	-0.04842	0.15262
t19	-0.18578	0.01525	0.21629
t2	-0.16897	0.03207	0.23310
t20	-0.15547	0.04557	0.24660
t21	-0.21150	-0.01047	0.19057
t22	-0.24221	-0.04118	0.15986
t23	-0.23607	-0.03503	0.16600
t24	-0.12896	0.07208	0.27311
t25	-0.14926	0.05177	0.25281
t3	-0.17771	0.02333	0.22436
t4	-0.26469	-0.06365	0.13738
t5	-0.17954	0.02150	0.22253
t6	-0.22744	-0.02640	0.17463
t7	-0.23090	-0.02986	0.17117
t8	-0.14884	0.05220	0.25323
t9	-0.16775	0.03329	0.23432

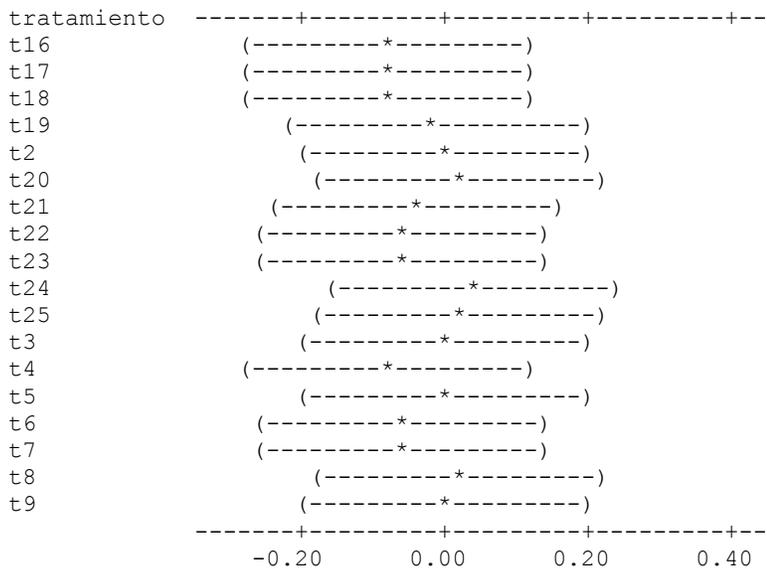


tratamiento = t14 restado de:

tratamiento	Inferior	Centro	Superior
t15	-0.13292	0.06812	0.26915
t16	-0.21203	-0.01099	0.19004
t17	-0.21060	-0.00957	0.19147
t18	-0.20664	-0.00561	0.19543

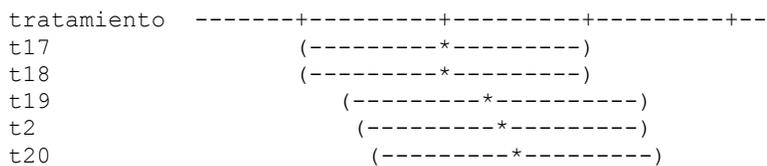
Continúa.

t5	-0.20485	-0.00381	0.19722
t6	-0.25275	-0.05171	0.14932
t7	-0.25621	-0.05517	0.14586
t8	-0.17415	0.02689	0.22792
t9	-0.19306	0.00798	0.20901

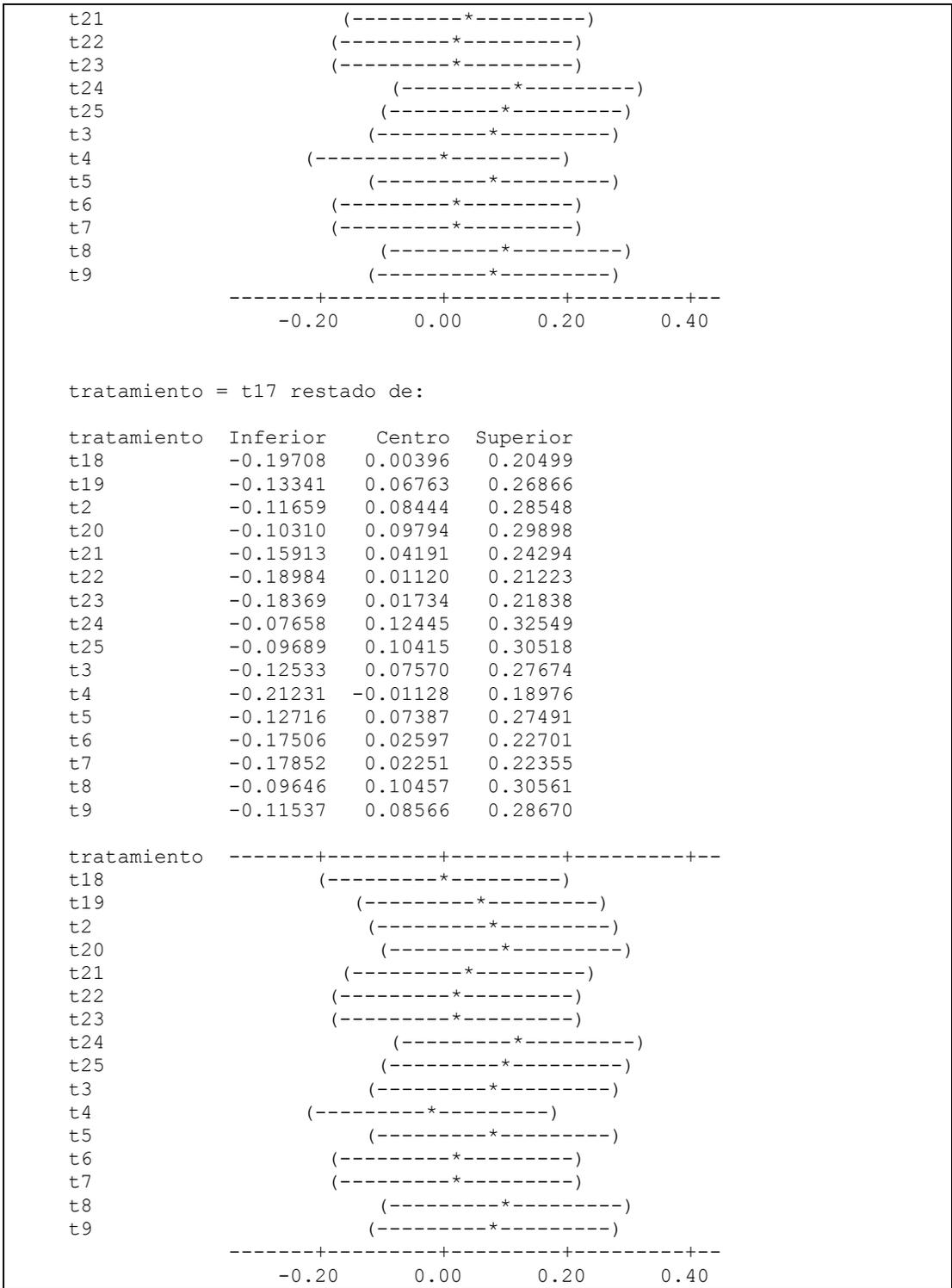


tratamiento = t16 restado de:

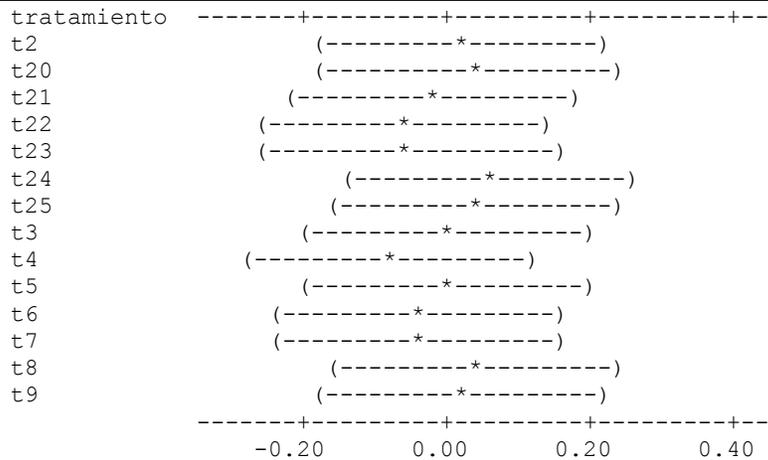
tratamiento	Inferior	Centro	Superior
t17	-0.19961	0.00143	0.20246
t18	-0.19565	0.00538	0.20642
t19	-0.13198	0.06905	0.27009
t2	-0.11517	0.08587	0.28690
t20	-0.10167	0.09937	0.30040
t21	-0.15770	0.04333	0.24437
t22	-0.18841	0.01262	0.21366
t23	-0.18227	0.01877	0.21980
t24	-0.07516	0.12588	0.32691
t25	-0.09546	0.10557	0.30661
t3	-0.12391	0.07713	0.27816
t4	-0.21089	-0.00985	0.19118
t5	-0.12574	0.07530	0.27633
t6	-0.17364	0.02740	0.22843
t7	-0.17710	0.02394	0.22497
t8	-0.09504	0.10600	0.30703
t9	-0.11395	0.08709	0.28812



Continúa.

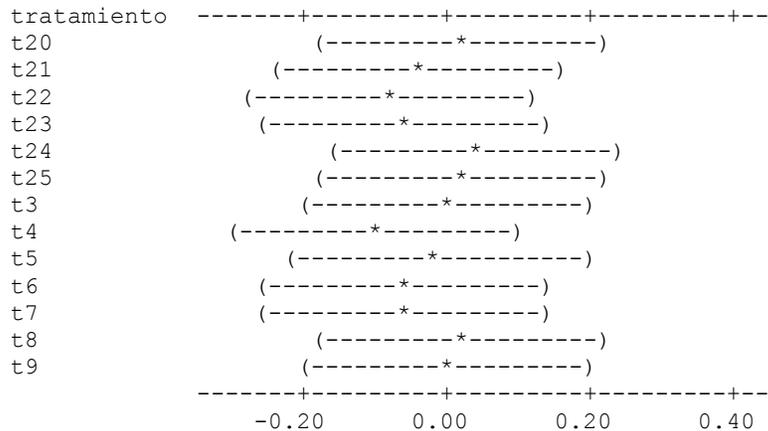


Continúa.



tratamiento = t2 restado de:

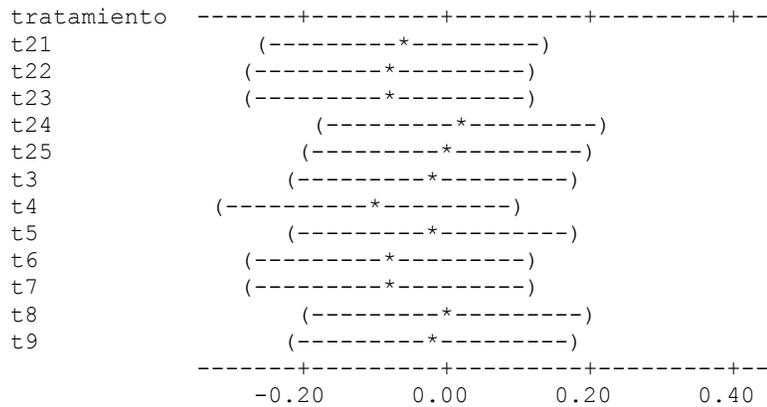
tratamiento	Inferior	Centro	Superior
t20	-0.18754	0.01350	0.21453
t21	-0.24357	-0.04254	0.15850
t22	-0.27428	-0.07325	0.12779
t23	-0.26814	-0.06710	0.13393
t24	-0.16102	0.04001	0.24105
t25	-0.18133	0.01971	0.22074
t3	-0.20978	-0.00874	0.19229
t4	-0.29676	-0.09572	0.10531
t5	-0.21161	-0.01057	0.19047
t6	-0.25950	-0.05847	0.14257
t7	-0.26297	-0.06193	0.13911
t8	-0.18091	0.02013	0.22116
t9	-0.19982	0.00122	0.20225



tratamiento = t20 restado de:

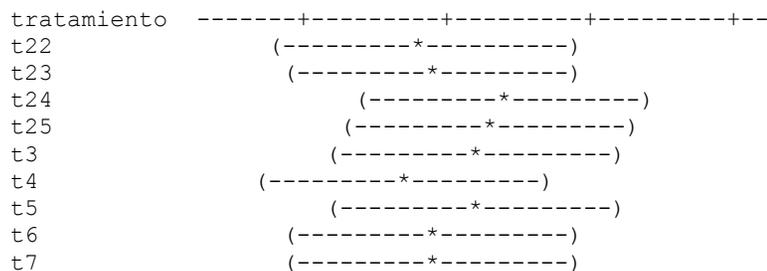
Continúa.

tratamiento	Inferior	Centro	Superior
t21	-0.25707	-0.05603	0.14500
t22	-0.28778	-0.08674	0.11429
t23	-0.28163	-0.08060	0.12044
t24	-0.17452	0.02651	0.22755
t25	-0.19483	0.00621	0.20724
t3	-0.22327	-0.02224	0.17880
t4	-0.31025	-0.10922	0.09182
t5	-0.22510	-0.02407	0.17697
t6	-0.27300	-0.07197	0.12907
t7	-0.27646	-0.07543	0.12561
t8	-0.19440	0.00663	0.20767
t9	-0.21331	-0.01228	0.18876

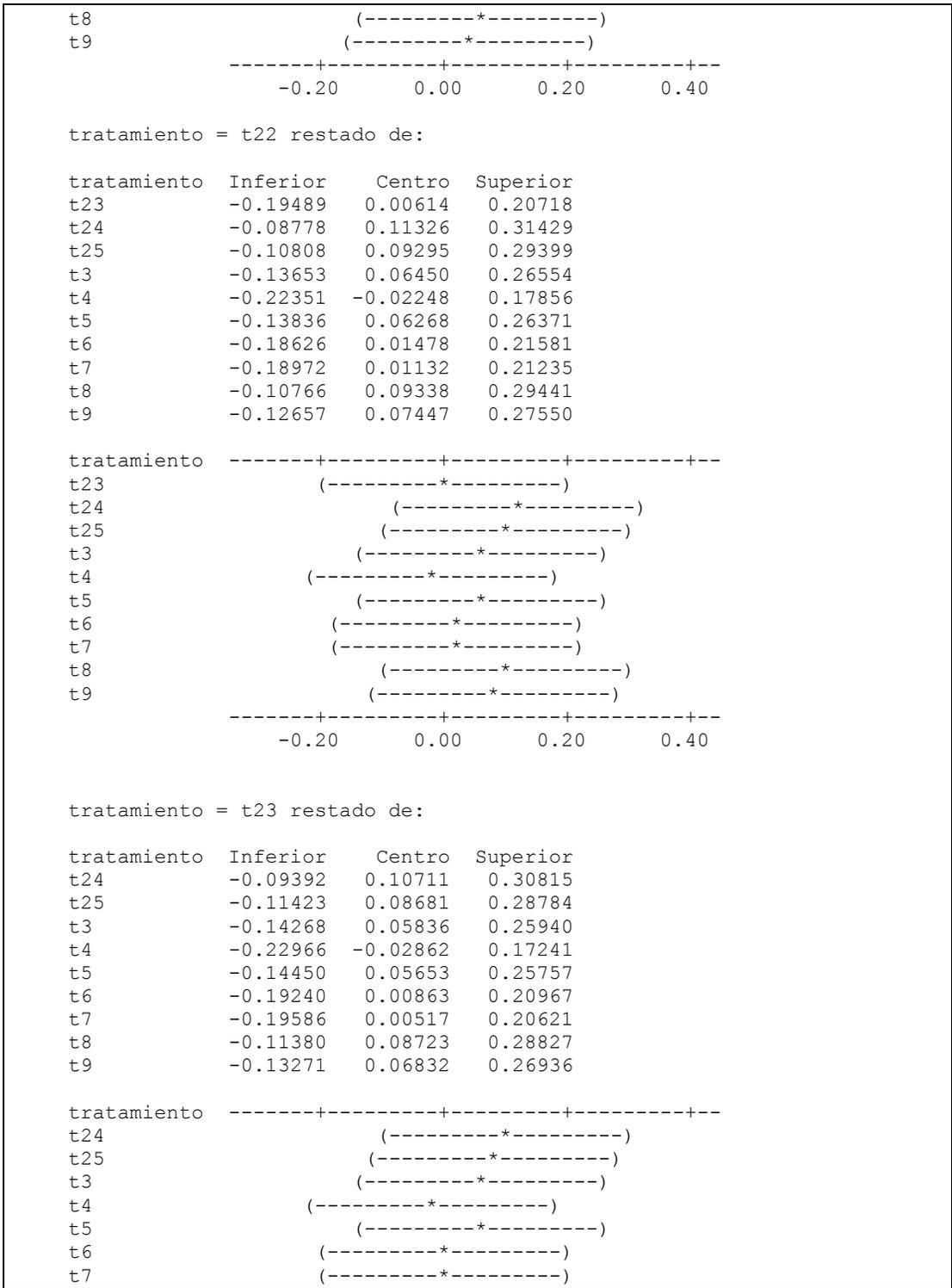


tratamiento = t21 restado de:

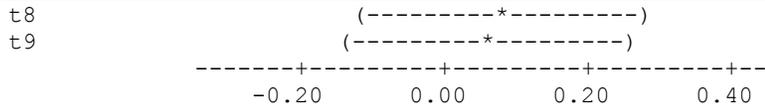
tratamiento	Inferior	Centro	Superior
t22	-0.23174	-0.03071	0.17033
t23	-0.22560	-0.02456	0.17647
t24	-0.11849	0.08255	0.28358
t25	-0.13879	0.06224	0.26328
t3	-0.16724	0.03380	0.23483
t4	-0.25422	-0.05318	0.14785
t5	-0.16907	0.03197	0.23300
t6	-0.21697	-0.01593	0.18510
t7	-0.22043	-0.01939	0.18164
t8	-0.13837	0.06267	0.26370
t9	-0.15728	0.04376	0.24479



Continúa.

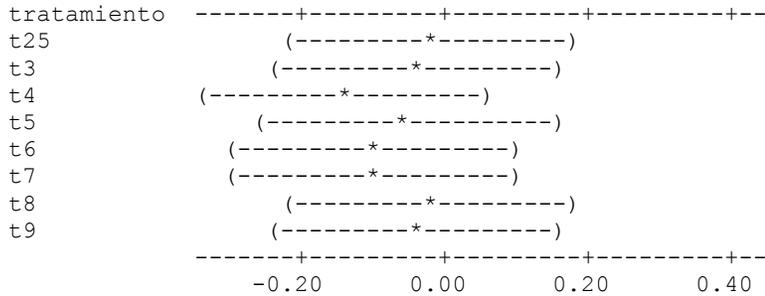


Continúa.



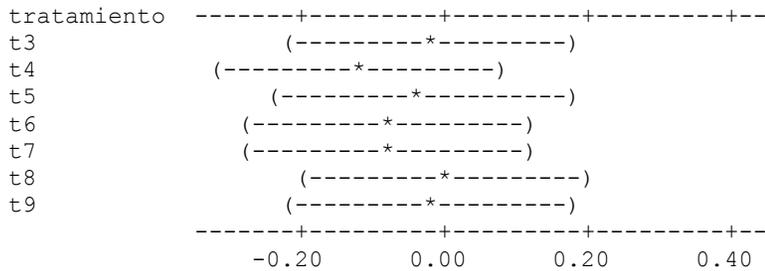
tratamiento = t24 restado de:

tratamiento	Inferior	Centro	Superior
t25	-0.22134	-0.02031	0.18073
t3	-0.24979	-0.04875	0.15228
t4	-0.33677	-0.13573	0.06530
t5	-0.25162	-0.05058	0.15045
t6	-0.29952	-0.09848	0.10255
t7	-0.30298	-0.10194	0.09909
t8	-0.22092	-0.01988	0.18115
t9	-0.23983	-0.03879	0.16224



tratamiento = t25 restado de:

tratamiento	Inferior	Centro	Superior
t3	-0.22948	-0.02845	0.17259
t4	-0.31646	-0.11543	0.08561
t5	-0.23131	-0.03028	0.17076
t6	-0.27921	-0.07817	0.12286
t7	-0.28267	-0.08164	0.11940
t8	-0.20061	0.00042	0.20146
t9	-0.21952	-0.01849	0.18255



tratamiento = t3 restado de:

Continúa.

