

UNIVERSIDAD DE MATANZAS “CAMILO CIENFUEGOS”
FACULTAD DE INGENIERIAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA



TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Evaluación de floculantes en la clarificación de jugos de caña de la Unidad Empresarial de Base Jesús Rabí.

Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico

Autor: Siulim Méndez Molina.

Tutor: MSc. Yoel Hernández Rodríguez.
Dr.C. Jesús Luis Orozco.

Matanzas, 2014

Declaración de autoridad.

Mediante este documento declaro ser la única autora del trabajo de tesis presentado en opción al título de Ingeniero Químico:

“Evaluación de floculantes en la clarificación de jugos de caña de la Unidad Empresarial de Base Jesús Rabí”.

Mediante el cual autorizo al Departamento de Química e Ingeniería Química, perteneciente a la Facultad de Ingenierías de la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos” a hacer uso libremente del mismo con el objetivo y finalidad que estimen conveniente.

Firma del Estudiante: _____

Fecha: _____

Nota de aceptación.

Presidente del Tribunal

Firma

Miembro del Tribunal

Firma

Miembro del Tribunal

Firma

Ciudad

Fecha

Pensamiento

“El azúcar es nuestra historia, sin ella es imposible interpretar la esencia y la verdad de Cuba”.

Jesús Menéndez

Dedicatoria

Dedico este trabajo a todas las personas que aportaron su granito de arena para poder realizar mi sueño. Esas maravillosas personas a las que les debo lo mejor de mi son:

- Mis padres por ser el motor impulsor de mi vida, de mis logros, de mis deseos de mirar siempre hacia adelante y de trazarme nuevas metas; por pensar en mí a todo momento; y en especial por recordarme que siempre estarán ahí, dispuestos a tenderme la mano y a darme fuerzas cuando sienta que las adversidades son más grandes que yo.
- Mi familia por apoyarme en todos los momentos de mi carrera y sobre todo en esta racha final.
- Mi pareja porque a pesar de que llegó a mi vida hace siete meses lo hizo en el momento que más lo necesitaba, me ha dado el apoyo y el amor que me han motivado a sentir que todo lo puedo con dedicación y sacrificio.
- Mis tutores por dedicarme su tiempo y sus conocimientos incondicionalmente.
- Mis profesores por brindarme todos sus conocimientos, su paciencia y su entrega durante estos cinco años.
- Mis amigos por su preocupación, su apoyo, por brindarme alegrías en los momentos de tristeza y compartir mis momentos de felicidad.

A todos ellos les dedico todo mi esfuerzo y sacrificio.

Agradecimientos

Agradezco a:

- Mis padres y a mi pareja por ser los pilares de mi vida, y las personas que me impulsaron a lograr mi sueño.
- Mi familia por su apoyo sin medidas en todas las facetas de mi vida y especialmente en esta fase final de la culminación de mis estudios.
- Los compañeros del ICIDCA, en especial a Marlén Ramil y a Marlén Alfonso por permitirme ser parte de sus estudios sobre floculantes y poder auxiliarme de sus conocimientos sobre el tema.
- Jorge Rapado Moreno por dedicarme su tiempo, conocimientos, paciencia y dedicación.
- Yoel Hernández por preocuparse por la realización de mi trabajo a pesar de sus problemas de salud.
- Jesús Luis Orozco por dedicarme su tiempo, sus consejos y su sabiduría.
- Todos los trabajadores del central azucarero Jesús Rabí por acogerme con cariño y hacer mi estancia placentera.
- Todos aquellos que no confiaron en mí, porque me hicieron más fuerte ante el reto de demostrarles que todo lo que me propongo lo alcanzo con amor, dedicación y entrega.

A todos ellos muchas gracias.

Opinión del Tutor.

Datos sobre la tesis:

Título: Evaluación de floculantes en la clarificación de jugos de caña de la Unidad Empresarial de Base "Jesús Rabí".

Estudiante: Siulim Méndez Molina
Nombre 1er. Apellido 2do. Apellido

Tutor: Yoel Hernández Rodríguez
Nombre 1er. Apellido 2do. Apellido

Máster en Tecnología de la
Producción Azucarera.

Grado Científico

Categoría Docente

Contenido de la opinión del tutor.

Fecha de elaboración: _____

Firma: _____

Resumen

En el presente trabajo se evalúan los floculantes Quimifloc 400, Zukerfloc 400 C Plus y Kebofloc 402 por ser los dos primeros los recomendados por el Instituto Científico de la Caña de Azúcar (ICIDCA) tras un estudio realizado con anterioridad en la Unidad Empresarial de Base Jesús Rabí y el tercero por ser el que actualmente se emplea en la clarificación de jugos de dicho central. Para lograr lo antes expuesto se realiza una caracterización de los jugos que se procesan a partir de determinar diferentes parámetros de calidad, lo que demuestra la inestabilidad que presentan dichos jugos causada por las diferentes variedades de caña que se utilizan en la fábrica. Mediante la determinación de diferentes parámetros de calidad a los jugos alcalizado y clarificado, y un análisis costo-beneficio se obtienen las dosis más efectivas de cada floculante a escala de laboratorio. Las concentraciones escogidas resultan ser 2 mg/L para el floculante Quimifloc 400, 4 mg/L para el Zukerfloc 400 C Plus y 8 mg/L para el Kebofloc 402. Tras analizar los resultados obtenidos experimentalmente se realiza una prueba industrial con los floculantes Quimifloc 400 y Zukerfloc 400 C Plus y sus respectivas dosis por ser los de mayor efectividad, seleccionándose ambos floculantes como los que mejores resultados aportan al proceso de clarificación, lo cual valida los resultados obtenidos a escala de laboratorio.

Abstract

In this paper the Quimifloc 400, 400 Zukerfloc Kebofloc 402 C Plus and flocculants are evaluated for being the first two recommended by the Scientific Institute of Sugarcane (ICIDCA) after a study earlier in the Business Unit Base Jesus Rabbi and the third being the one currently used in juice clarification of that plant. To achieve the above characterization of juices processed from determining different quality parameters is performed, demonstrating to the instability of these juices caused by different cane varieties used in the factory. By determining different quality parameters to alkalized and clarified juices, and cost-benefit analysis the most effective dose of each flocculant obtained at laboratory scale. The concentrations are chosen to be 2 mg / L for Quimifloc 400, 4 mg / L flocculant for Zukerfloc 400 C Plus and 8 mg / L for 402 Kebofloc. Having analyzed the results obtained experimentally an industrial test is performed with flocculants Quimifloc Zukerfloc 400 and 400 C Plus and their respective dosages to be the most effective, being selected both flocculant like those that better results contribute to the clarification process, which validates the results obtained in laboratory scale.

Tabla de Contenido:

Contenido	Pág.
Resumen	
Abstract	
Introducción	1
Capítulo 1: Análisis Bibliográfico	3
1.1 Caña de azúcar. Calidad	3
1.1.1 Acción de los microorganismos sobre la caña de azúcar	3
1.2 Etapa de Purificación de los jugos de caña	4
1.3 Purificación física de los jugos de caña	5
1.4 Jugo mezclado	5
1.4.1 Composición química promedio del jugo mezclado	6
1.5 Purificación química de los jugos de caña	7
1.5.1 Relación entre los coloides y la carga iónica del jugo mezclado.	8
1.5.2 Características de los coloides del jugo mezclado	8
1.5.3 Desestabilización del sistema sólido-líquido	9
1.5.4 Relevancia de la desestabilización del sistema sólido-líquido	10
1.5.5 Aspectos físico-químicos de la purificación del jugo de caña	11
1.5.6 Coagulación de las impurezas del jugo de caña	11
1.5.7 Alcalización del jugo de caña	13
1.5.7.1 Influencia de la cal. Importancia	15
1.5.7.2 Acción del fósforo en el proceso de alcalización	16
1.5.8 Calentamiento del jugo de caña. Influencia de la temperatura	16
1.5.9 Floculación de las impurezas del jugo de caña	18
1.6 Descripción del proceso de clarificación del jugo de caña	18
1.7 Características generales de los equipos de clarificación	19
1.7.1 Tanque amortiguador flash	19
1.7.2 Clarificadores de jugo	20

1.7.3	Clarificadores con bandejas	21
1.7.4	Clarificadores sin bandejas	22
1.8	Floculantes	23
1.8.1	Características de los floculantes aniónicos	24
1.8.2	Fisicoquímica de la formación de flóculos	24
1.8.3	Preparación del floculante	25
1.8.4	Dosificación de la solución floculante	26
1.9	Conclusiones Parciales	28
Capítulo 2: Materiales y Métodos		29
2.1	Descripción de la etapa de purificación de los jugos de caña en la Unidad Empresarial de Base Jesús Rabí	29
2.2	Caracterización de los jugos que se procesan	31
2.3	Determinación de los parámetros que caracterizan los jugos	31
2.3.1	Determinación del potencial hidrogeniónico (pH)	31
2.3.2	Determinación de sólidos refractométricos disueltos en jugos.	31
2.3.3	Determinación del pol en productos azucareros. Método de la masa normal utilizando hidróxido de aluminio formado <i>in situ</i>.	32
2.3.4	Determinación de pureza al jugo	32
2.4	Procedimiento a seguir para la determinación de los parámetros de calidad del jugo	33
2.5	Determinación de los parámetros de calidad de los jugos	34
2.5.1	Determinación de la velocidad de sedimentación	34
2.5.2	Determinación del porcentaje de compactación de lodos	34
2.5.3	Determinación espectrofotométrica de la turbidez en jugos	35
2.5.4	Determinación espectrofotométrica del color del azúcar crudo en solución	35
2.6	Proceder para realizar el análisis estadístico a los resultados que se obtienen de los ensayos de laboratorio	36
Capítulo 3: Análisis de los resultados		38
3.1	Caracterización de los jugos que se procesan	38

3.2	Análisis de los resultados experimentales	39
3.2.1	Velocidad de sedimentación	39
3.2.1.1	Análisis estadístico para velocidad de sedimentación	42
3.2.2	Porcentaje de turbidez y porcentaje de remoción de turbidez	46
3.2.2.1	Análisis estadístico para el porcentaje de turbidez	51
3.2.3	Porcentaje de compactación de lodos	53
3.2.3.1	Análisis estadístico para el porcentaje de compactación de lodos	56
3.2.4	Porcentaje de Color y porcentaje de decoloración	59
3.3	Análisis costo-beneficio	62
3.4	Análisis de las pruebas industriales realizadas a los floculantes en estudio	64
3.4.1	Porcentaje de turbidez	65
3.4.2	Porcentaje de remoción de turbidez	66
3.4.3	Porcentaje de Color	66
3.4.4	Porcentaje de decoloración	67
3.5	Análisis estadístico para el porcentaje de remoción de turbidez y de color.	68
3.5	Conclusiones Parciales	70
	Conclusiones	71
	Recomendaciones	72
	Bibliografía	73
	Anexos	78

Introducción

El valor del azúcar crudo en el mercado mundial se ha incrementado en los últimos años, de tal manera que dicho producto se ha convertido en una de las principales exportaciones e ingreso de divisas en nuestro país. Para obtener un proceso eficiente y prometedor es necesario que las reacciones que tienen lugar desde la preparación de la materia prima hasta la obtención de los granos comerciales de azúcar, se estudien teniendo en cuenta los últimos métodos desarrollados.

La industria azucarera solo puede progresar si se dedica a seguir el camino de la producción de azúcar crudo con calidad y esto se logra a partir de la investigación sistemática y la colección de datos hecha de manera crítica y objetiva, además de la búsqueda de nuevas tecnologías para el desarrollo del proceso, lo cual trae consigo eficiencia en el mismo.

La Unidad Empresarial de Base (UEB) "Jesús Rabí" no está exenta en la búsqueda de soluciones para un mejor tratamiento de los jugos de caña que se procesan, que a su vez propicia la obtención de un producto final con calidad superior.

Es por ello que la purificación constituye hoy una de las etapas que se prioriza en la implementación de nuevas tecnologías para el mejoramiento en el proceso de producción, específicamente se ha mostrado especial interés en el área de clarificación, esto se debe a que es el proceso inicial por el cual son eliminadas todas las impurezas contenidas en el jugo que son susceptibles a coagulación y floculación por medios mecánicos y químicos, que implican el asentamiento y remoción por decantación de las mismas, para producir un jugo claro de buena calidad con la ayuda conjunta de la cal, el calor y la adición de floculante, (Aparicio, 2005).

Es por ello que se dieron a la tarea de invertir e instalar en el año 2010 un nuevo clarificador de bajo tiempo de retención, el cual logra completar el proceso de sedimentación entre 0,5 – 0,75 horas, valores muy favorables en comparación con la tecnología antigua en la que intervenían clarificadores convencionales, (Manual de Operaciones del Clarificador de Bajo Tiempo de Retención, 2010).

Es importante destacar que la clarificación de bajo tiempo de retención necesita del uso de floculantes para que el tiempo de clarificación del jugo sea

el mínimo posible con el objetivo de evitar la inversión de la sacarosa, manejar mayores volúmenes de jugo en un menor tiempo, y sobre todo obtener un jugo claro y brillante con la calidad requerida, (Lamasares. A, 2010).

La introducción de este nuevo clarificador de bajo tiempo de retención trajo consigo preocupaciones para los tecnólogos en cuanto a la necesidad de aplicar un floculante capaz de contribuir a la formación de flóculos y a su separación con una velocidad de sedimentación mayor.

El floculante Quimifloc 400 ha sido el empleado de forma extensiva en los centrales cubanos, pero su efectividad comprobada a lo largo de años y ratificada según pruebas realizadas, no obvió, ni deberá obviar, la valoración de otras alternativas. Es por ello que en la zafra que recién acabó, 2013-2014, se utilizaron tres floculantes en diferentes etapas, ellos son Quimifloc 400, Kebofloc 402 y Zukerfloc 400 C Plus, por lo que podemos plantear como **problema de la investigación:**

¿Cómo determinar el floculante más efectivo en la clarificación de jugos de caña de la Unidad Empresarial de Base "Jesús Rabí"?

La presente propuesta tiene como **hipótesis** de trabajo:

Si se realiza una evaluación de los floculantes posibles a utilizar en la industria azucarera se puede determinar el floculante de mejores resultados y la dosis más efectiva en la clarificación de jugos de caña de la Unidad Empresarial de Base Jesús Rabí.

Objetivo General:

Seleccionar el floculante más efectivo en la clarificación de jugos de caña de la Unidad Empresarial de Base Jesús Rabí.

Objetivos Específicos:

1. Caracterizar a escala de laboratorio los jugos que se procesan.
2. Determinar la dosis de cada floculante que mejores resultados aporta en la clarificación de jugo.
3. Validar a escala industrial los resultados obtenidos a escala de laboratorio.

Capítulo 1: Análisis Bibliográfico

Este capítulo constituye la fundamentación teórica de la tesis y a la vez representa una valoración de la bibliografía sobre las temáticas que a continuación se abarcan.

1.1 Caña de azúcar. Calidad

La caña de azúcar es una planta de características excepcionales, capaz de sintetizar carbohidratos solubles y material fibroso a un ritmo muy superior al de otros cultivos comerciales. Es un cultivo de la zona tropical del mundo, requiere agua y suelos adecuados para crecer bien. Es una planta que puede producir 150 toneladas de caña por hectáreas al año (con 14% de sacarosa, 14% de fibra y 2% de otros productos solubles). Su período de crecimiento varía entre 11 y 17 meses y su tamaño está en dependencia de la variedad de caña y de la zona donde se coseche. Requiere nitrógeno, fósforo, potasio y otros elementos para su nutrición, (Larrahondo, 2009).

Giraldo, (2005) opina que la caña de azúcar, la composición química de su jugo y el azúcar que se produzca dependen de factores que van más allá del mismo proceso de extracción en fábrica y son aquellos inherentes a la planta, los cuales varían ampliamente. Estos son:

1. Posición geográfica del cultivo.
2. Variedad, edad y madurez de la caña.
3. Práctica de cultivo.
4. Temporada del año en la que se hace la recolección.
5. Tratamiento mecánico durante el corte, transporte y molienda.

Existen otros factores que se originan por causa de la organización que tenga cada fábrica después del corte de la caña. Como ejemplo de algunos de ellos tenemos:

1. Grado de quema y tiempo entre corte y molienda.
2. Contenido de material extraño.
3. Altura del corte.
4. Acción de microorganismos.

1.1.1 Acción de los microorganismos sobre la caña de azúcar

Según Morrel, (1985) los jugos de caña son excelentes medios de cultivo para el desarrollo y crecimiento de microorganismos pues reúnen condiciones óptimas tales como: temperatura, humedad, sustrato, etc. Estos microorganismos que pueden ser bacterias, mohos y levaduras provocan inversión de la sacarosa y producen gomas, estas dañan el proceso de producción y tienen dos vías de entrada fundamental: la materia prima y el aire ambiental.

Una de las bacterias típicas del proceso de producción de azúcar crudo es la *Leuconostoc mesenteroides* (ver anexo 1), esta origina polisacáridos como las dextranas que emplean la sacarosa como materia prima, aumentan las pérdidas de sacarosa en la fábrica y la viscosidad de los jugos, esto genera problemas en la evaporación, elevando erróneamente el valor de la polarización de la sacarosa como consecuencia de su comportamiento dextrarrotatorio, provocan pérdidas de sacarosa en mieles y agua de lavado a causa de la elongación de los cristales de sacarosa denominados cristal aguja.

1.2 Etapa de Purificación de los jugos de caña

Morejón, (2012) opina en su informe técnico que la purificación de los jugos es el resultado del trabajo conjunto de muchos procesos unitarios. Cada uno de ellos es relevante porque permiten la eliminación de cierta cantidad de impurezas diferentes. De esta forma, la purificación del jugo comprende dos procesos elementales:

1. Purificación física: tiene lugar en los molinos, se extrae el jugo de la caña y se separan las impurezas de mayor tamaño como: bagazo, materia extraña y parte del bagacillo.
2. Purificación química: es la eliminación de las impurezas solubles, insolubles o coloidales a causa de las diferentes reacciones químicas entre los componentes del jugo y los insumos químicos que se adicionan para clarificarlo. El resultado de la purificación química es la coagulación y la floculación de las impurezas del jugo y la remoción de estas mediante la decantación de las mismas para obtener un jugo claro.

1.3 Purificación física de los jugos de caña

Posada, (1987) explica que la purificación física es la primera operación que se realiza en la fábrica, se emplea la molienda de la caña para la extracción y eliminación de las partículas de mayor tamaño presentes en el jugo.

Los dos métodos que se emplean para la extracción del jugo de caña son la difusión (tecnología aplicada de la producción de remolacha) y la compresión (trituration).

La estación de molinos consta de rodillos por los que pasa sucesivamente la caña exprimida (bagazo). Se aplica agua de imbibición sobre el bagazo para ayudar a la extracción del jugo, según sea la cantidad de entrada.

Una vez extraído el jugo por los molinos, el mismo se hace pasar por tamices y coladores vibratorios (ver anexo 2) de diferentes tamaños para ayudar a separar las partículas grandes y pequeñas que están en suspensión.

La operación consiste en hacer pasar el jugo mezclado (unión de los jugos que se obtienen del primer y segundo molino) por unas mallas fijas construidas de barras transversales, que separan el material en suspensión del jugo que queda retenido en la criba y con ayuda de raspadores móviles los retornan al molino a través de conductores o transportadores.

Aunque la separación física promueve la eliminación de impurezas, se considera a menudo como una técnica imperfecta, porque su trabajo es parcial. Se ha encontrado que puede pasar 1 g de material en suspensión por cada litro de jugo colado. Por esta razón, se requiere a través del proceso de elaboración de azúcar, realizar no solo clarificaciones de los materiales sino también más tamizaciones o filtraciones, (Romero y Torres, 1996).

1.4 Jugo mezclado

Honig, (1974) agrega que el jugo por lo general está comprendido como una solución de agua, sacarosa y barro, además se compone de sustancias orgánicas e inorgánicas que se encuentran en diversas proporciones y que son estas, junto con lo que es considerado materia extraña las que se eliminan en el proceso de purificación.

Las sustancias que componen el jugo mezclado pueden ser solubles e insolubles. Dentro de las sustancias solubles se encuentran los carbohidratos,

las sales inorgánicas y los no azúcares, como ejemplo de las insolubles tenemos la tierra, el bagazo, la fibra, las materias extrañas, entre otras.

Las impurezas presentes en el jugo mezclado se tratan en dos grupos:

1. Material grueso disperso: es el bagazo, la tierra, las ceras, entre otras. Este tipo de material se puede separar por medio de la filtración y la cantidad presente en el jugo varía según la calidad de la caña.
2. Coloides: son partículas finamente divididas, insolubles, conformadas por derivados de la caña y del suelo. Aunque este tipo de material se puede eliminar por medio de la molienda, una gran cantidad de materia coloidal pasa a los jugos, muchas veces por acción de los microorganismos o por la formación de sustancias a partir de las reacciones que tienen lugar en los procesos de purificación.

Ochoa, (2008) opina que los coloides, y más acertadamente las partículas con carga iónica, juegan un papel clave en la clarificación del jugo. Es gracias a este tipo de sustancias que suceden las reacciones químicas entre la cal y el jugo mezclado y finalmente la formación de los flóculos por interacciones del floculante y las partículas coaguladas.

Los sólidos solubles se cuantifican según el porcentaje de brix. La razón porcentual entre la sacarosa y el brix es conocido como pureza del jugo. El contenido aparente de sacarosa, expresado como un porcentaje en peso y determinado mediante un método polarimétrico, se denomina pol. Los sólidos solubles diferentes de la sacarosa, que incluyen los azúcares reductores como la glucosa y otras sustancias se conocen como no-sacarosa y resultan de la diferencia porcentual entre el brix y la pol, (Steindl, 1998).

1.4.1 Composición química promedio del jugo mezclado

Según la Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de la caña panelera, (2011) todas las sustancias presentes en el jugo mezclado diferentes a la sacarosa se denominan en conjunto como no-azúcares y todas son consideradas impurezas durante el proceso de elaboración de azúcar.

Mediante investigaciones se ha logrado establecer cantidades aproximadas de las sustancias químicas y su composición en el jugo mezclado, en el anexo 3 se muestra el promedio de la composición química del jugo mezclado.

En el artículo Calidad de la Caña de Azúcar, (2010) se expresa que los ácidos orgánicos nitrogenados son los responsables del pH natural del jugo y de la capacidad de absorción de las soluciones alcalinas, en especial de la de la cal, debido a la alta concentración de ácido aconítico presente en el jugo. La disminución del pH del jugo claro es producida por los polietilenos que absorben oxígeno durante la clarificación del mismo.

La cantidad de fosfatos presentes en el jugo es importante porque durante el proceso de clarificación ellos son los responsables de promover una buena floculación, sobre todo si se encuentran en concentraciones entre 300 y 600 mg/L.

El potasio es indispensable para la asimilación del carbono y la síntesis de proteínas. Cuando hay déficit de éste se reduce el porcentaje de sacarosa y aumentan los niveles de azúcares reductores y se producen altas cantidades de materiales coloreados a causa de su descomposición térmica, mientras que aplicaciones excesivas provocan problemas en la fábrica ya que el cloruro potásico cristaliza primero que la sacarosa, lo que hace que se produzcan incrustaciones en los evaporadores.

1.5 Purificación química de los jugos de caña

Clark, (1978) señala que la purificación química de los jugos consiste en obtener un jugo claro y brillante a partir de las diferentes subetapas que a continuación se muestran (ver anexo 4):

1. Alcalización.
2. Calentamiento.
3. Adición de floculante.

Según Domínguez, (2007) el área de purificación del jugo tiene como función principal eliminar las impurezas presentes en el mismo al menor costo posible y con el mínimo de pérdidas de azúcar. En esta área, el jugo de caña crudo o mezclado es sometido a procesos de alcalización y calentamiento, para desechar del jugo las sustancias indeseables tales como: bagacillo, tierra y un conjunto de no-azúcares en forma de cachaza, y así poder entregar al área de evaporación el jugo clarificado.

De acuerdo con lo planteado por Domínguez, (2007) la autora opina que la etapa de purificación tiene una importancia relevante en el proceso de

obtención de azúcar crudo pues en la misma son eliminadas todas las impurezas que se encuentran contenidas en el jugo. Además, la disciplina tecnológica y el buen funcionamiento de los equipos que componen la etapa son de suma importancia para la eficiencia de la misma.

1.5.1 Relación entre los coloides y la carga iónica del jugo mezclado

El término coloide se emplea para describir las partículas que tienen un tamaño inferior a 1 μm y cuya dispersión en un fluido es relativamente extensa.

La separación de este tipo de partículas presenta más dificultades que las partículas de mayor tamaño; por este motivo, se han desarrollado diferentes técnicas que son relativamente sencillas y en las que se involucra la aglomeración de las mismas.

Las dispersiones coloidales se pueden desestabilizar mediante la alteración de la superficie de los coloides en el sistema sólido-líquido. Esto es posible lograrlo al ajustar condiciones físicas que permitan aumentar el tamaño y el área superficial de las partículas o mediante la adición de electrolitos y agentes activadores en el sistema. Tal es el caso de los procesos de coagulación y floculación.

En el caso del jugo mezclado, la presencia de los coloides provocará efectos desfavorables en la clarificación del mismo, debido a que los coloides pueden evitar la unión de las partículas y por ende interferir en su precipitación.

Se ha comprobado que la cantidad de materia coloidal aceptable que existe en el jugo es de 0,02% – 0,29% aproximadamente. Esta cantidad varía de acuerdo con el grado de eliminación que se obtenga en el proceso de molienda y tamizado, (Documento Coagulación y Floculación del agua, 2011).

1.5.2 Características de los coloides del jugo mezclado

Los coloides del jugo de la caña son de dos tipos:

1. Coloides Liofílicos: son aquellas partículas que tienen gran afinidad por los medios acuosos, propiedad que los hace tener un alto grado de hidratación y ser de carácter viscoso. En el jugo mezclado, las principales sustancias liofílicas son las pectinas, pentosas y las proteínas.

2. Coloides Liofóbicos: son partículas que no tienen tanta afinidad por los medios acuosos y por lo tanto poseen menor grado de hidratación. Esta propiedad hace que sus dispersiones sean inestables y poco viscosas. Las ceras, grasas y materia extraña son algunas de las sustancias que se incluyen dentro de este tipo de coloides.

Durante el proceso de purificación del jugo se pueden formar coloides con la precipitación de las sales inorgánicas y la descomposición de diversas sustancias orgánicas. Por esto, el porcentaje de remoción de estas partículas también determina el grado de eficiencia de la clarificación.

La mayoría de las partículas coloidales presentes en el jugo transportan cargas negativas debido a la adsorción de iones sobre su superficie, haciendo que el jugo se encuentre cargado electronegativamente (ver anexo 5). Esta razón hace que los coloides en el jugo no se atraigan electrostáticamente unos a otros, evitando su unión y consecuentemente, su precipitación, (Smith, *et.al*, 1982).

1.5.3 Desestabilización del sistema sólido-líquido

Los coloides del jugo mezclado están sujetos a dos fuerzas:

1. Fuerzas de Van der Waals: son fuerzas de atracción por la interacción mutua entre electrones y núcleo de la molécula.
2. Fuerza de Repulsión Electroestática: fuerza entre partículas cargadas que tiende a mantener las cargas iguales separadas. Esta repulsión es causada por el "Potencial Zeta" (PZ), debido a la diferencia de potencial entre la partícula y la solución. La estabilidad de las partículas dispersas depende de la magnitud del potencial zeta.

Para que se presente la máxima aglomeración y precipitación de las impurezas, es necesario que el PZ de las partículas sea nulo, denominándose punto isoeléctrico.

Por lo tanto, para que ocurra una precipitación de estas partículas diminutas se requiere que como mínimo su carga sea neutralizada o desestabilizada. Existen tres métodos mediante los cuales se hace posible la desestabilización de las partículas coloidales:

1. Neutralización de su carga electronegativa: se logra con la adición de sustancias catiónicas, como la cal o lechada de cal. Las proteínas que

posean el punto isoeléctrico por encima del correspondiente al jugo mezclado se pueden desnaturalizar por el cambio de pH, las pectinas también se desestabilizan por la acción de la cal, precipitando como pectato de calcio.

2. Reducción del grado de hidratación: se puede lograr la aglomeración de las partículas mediante el calentamiento del jugo hasta un punto cercano al de ebullición. Este método se denomina efecto de deshidratación o desnaturalización y hace posible que el sistema se vuelva más inestable. La adición de cal también puede reducir el grado de hidratación. El tipo de coloides que se logra desestabilizar con el calentamiento son los liofílicos como las albúminas y otras proteínas.
3. Mediante la formación de mecanismos de unión a causa de la adición de sustancias con elevados pesos moleculares como las poliácridamidas (floculantes), la cual se estudiará en el epígrafe 1.8.

Una vez que las partículas están desestabilizadas actúan sobre las mismas las fuerzas Brownianas.

1. Fuerzas Brownianas: Imparten el movimiento oscilatorio a los coloides dispersos en un medio líquido, ocasionado por colisiones de partículas y moléculas del medio en suspensión para lograr la aglomeración, (Svarovsky, 2011).

1.5.4 Relevancia de la desestabilización del sistema sólido-líquido

Cardel, et.al, (2007) plantea que debido a que los coloides evitan la unión de las partículas en suspensión del jugo mezclado y por tanto su precipitación y posterior separación, es importante desestabilizar el sistema coloidal por las siguientes razones:

1. Los coloides tienden a incrementar la hidratación de varias sustancias, esto hace que adquieran un carácter gelatinoso que hará lento el proceso de sedimentación y producirá lodos voluminosos.
2. Las sustancias coloidales incrementan la viscosidad de las meladuras y melazas haciendo más lento el proceso de filtración.
3. La presencia de los coloides ocasiona la formación de espumas y el incremento de color.

4. Los coloides interfieren en la cristalización de la sacarosa, proceso indeseable en cualquier industria azucarera.

1.5.5 Aspectos físico-químicos de la purificación del jugo de caña

Según el artículo Coagulación y Floculación del Agua, (2011) físicoquímicamente, la clarificación del jugo comprende dos procesos elementales: coagulación y floculación de las impurezas.

La coagulación de las impurezas comprende los procesos de calentamiento y alcalización. La floculación es alcanzada tras el suministro de una sustancia polimérica llamada floculante, cuya función más práctica es envolver los coágulos de impurezas formados para que estos obtengan mayor peso molecular y como consecuencia precipiten al fondo de los clarificadores en un tiempo considerablemente corto que sea benéfico para la fábrica.

1.5.6 Coagulación de las impurezas del jugo de caña

Evangelista, (2012) menciona que el proceso de coagulación es definido como el fenómeno de desestabilización de las partículas coloidales, mediante la neutralización de sus cargas eléctricas para permitir un mayor acercamiento entre las mismas. Esto se logra fundamentalmente con la adición de electrolitos químicos denominados coagulantes los cuales mediante diversos mecanismos de adsorción, anulan las fuerzas repulsivas o actúan sobre la capa hidrofílica (liofílica) de los coloides.

Para la desestabilización de las cargas negativas de los coloides se deben usar coagulantes catiónicos, los de mayor importancia son las especies que están asociadas al aluminio (Al), plata (Pt), silicio (Si), magnesio (Mg) y calcio (Ca).

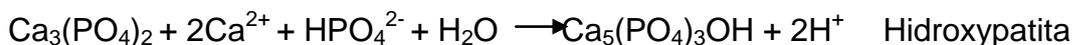
En las industrias azucareras, el metal catiónico que se emplea para coagular las impurezas del jugo es el calcio, el cual se encuentra asociado a la sustancia química denominada comúnmente lechada de cal (Hidróxido de Calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$).

Es importante para cualquier fábrica que el tiempo de coagulación sea breve (cuestión de segundos), ya que la utilización óptima del coagulante exige que la neutralización de los coloides sea total antes de que el coagulante comience a precipitar en forma de hidróxido metálico, por ejemplo.

Como ya se ha mencionado en varias ocasiones, la coagulación de las impurezas en las fábricas azucareras, depende del trabajo conjunto de dos factores:

1. Encalado o alcalización del jugo mezclado o diluido (factor químico).
2. Calentamiento del jugo mezclado o diluido (factor físico).

Con la coagulación de las impurezas se desencadenan una serie de reacciones químicas que son las que fundamentan y hacen posibles las colisiones entre partículas. Estas tienen lugar más que todo tras la adición de la cal, la cual reacciona con las sustancias cargadas negativamente presentes en el jugo para formar compuestos insolubles o macromoléculas de lodos, que finalmente son las que se pretenden extraer para que el jugo quede claro. La velocidad de la reacción entre los fosfatos y la cal es muy lenta. Sin embargo, las velocidades se incrementan con temperaturas cercanas a las de ebullición debido a que la solubilidad de las sustancias formadas con la adición de cal disminuye. Las reacciones de precipitación inician con la formación del fosfato monocálcico ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) y dicálcico (CaHPO_4), (Greenwood, 2010). Doherty y Rackemann, (2009) aclaran que la inestabilidad de los compuestos formados conlleva a la reversibilidad de las reacciones, por lo que de forma instantánea se producirán otras reacciones con el objetivo de formar compuestos más estables. Las principales reacciones que tienen lugar en el encalado son:



Una vez que las impurezas son coaguladas, es necesaria la introducción de un proceso que permita que estas sedimenten en el menor tiempo posible para poder producir un jugo claro y proseguir con el proceso de elaboración del azúcar. El proceso que ayuda a la anterior acción es la floculación, la cual puede ser inducida de diversas formas, pero se usa comúnmente los productos denominados floculantes.

1.5.7 Alcalización del jugo de caña

El método más antiguo de clarificación de jugo y de hecho uno de los más eficientes y empleados a nivel mundial, involucra óxido de calcio y calor como agentes clarificantes y es conocido como proceso simple de alcalización.

Caballero, (2013) considera que la alcalización consiste en adicionar cal al jugo mezclado para cumplir dos objetivos fundamentales: neutralizar el jugo y coagular las impurezas del mismo mediante reacciones químicas con las sustancias contenidas en él.

El jugo mezclado tiene un pH ácido de aproximadamente cinco, es conveniente elevar dicho pH debido a que la sacarosa se desdobla en sus monómeros glucosa y fructosa cuando se encuentra en medios ácidos, produciéndose la denominada inversión ácida.

Debido al riesgo constante que representa la inversión de la sacarosa, desde hace muchos años el jugo mezclado es expuesto a la alcalización mediante un reactivo químico que ha demostrado ser el más adecuado, la lechada de cal.

La alcalización se realiza para que el calcio reaccione con los fosfatos libres y se formen fosfatos tricálcicos, estos contribuyen en la reacción de la acrilamida con la materia orgánica en el proceso de clarificación, (Gil, 2008).

El proceso de alcalización ha tenido modificaciones a lo largo de la historia con el propósito de mejorar la clarificación y darle un tratamiento especial a los jugos difíciles de tratar que produzcan ciertas variedades de caña, conservando siempre su principio base.

Honing citado por Díaz, (1999) aclara que las modificaciones que se han realizado al proceso de alcalización simple como método de clarificación de jugo, involucran la cal y la secuencia del calor:

1. Alcalización en frío.

También conocido como método cal-calor es el método que se utiliza originalmente. Se adiciona cal al jugo (usualmente entre 2,5 – 7,5 % de calcio) hasta obtener un pH de 7,2 – 8,6. Posteriormente se calienta a 100 – 102 °C, y se deja asentar. Normalmente se desea un jugo alcalizado aproximadamente neutro. Este método se dejó de utilizar cuando los jugos de la caña comenzaron a ser más difíciles de tratar.

2. Alcalización en caliente (ver anexo 6).

También conocido como método calor-cal muestra mejores resultados en la clarificación del jugo que la alcalización en frío, debido a que se forman flóculos de mayor tamaño y peso. El método consiste en calentar el jugo a 100 – 102 °C, añadir lechada de cal hasta un pH de 7,6 – 8,0 y posteriormente dejar asentar.

3. Alcalización fraccionada.

También conocido como método cal – calor – cal consiste en añadir cal hasta un pH de 5,8 – 6,4. Se calienta el jugo a 100 – 102 °C y nuevamente se adiciona cal hasta un pH de 7,4 – 7,8, lo cual produce una clarificación satisfactoria en los jugos de caña que no maduraron completamente.

4. Alcalización con doble calentamiento.

También conocido como método calor – cal – calor consiste en calentar y que la temperatura no sobrepase los 60°C, se adiciona cal y se eleva la temperatura hasta unos 100°C aproximadamente. Se dice que este método elimina mejor los no azúcares y produce lodos más compactos.

5. Alcalización fraccionada y doble calentamiento.

También conocido como método cal – calor – cal – calor consiste en alcalizar el jugo hasta un pH de 6,0 – 6,4, se calienta hasta 93°C, se alcaliza nuevamente hasta un pH de 7,6 – 7,8, se calienta a 100 – 102°C y se deja asentar. Con este método se alcanzan sedimentaciones más rápidas, elevación de la pureza, disminución en el consumo de cal, lodos más compactados, eliminación de coloides, entre otros.

Aunque con la acción conjunta de la cal y el calor se forma un precipitado denso de composición compleja, que arrastra consigo la mayor parte del material en suspensión del jugo y promueve la clarificación, si se desea incrementar de manera relevante la eficiencia y la velocidad de la clarificación de jugo, se requiere de un proceso alterno denominado floculación que involucra la aplicación de polielectrolitos como agentes floculantes. Esta fue la innovación más reciente que tuvo el proceso de defecación.

A criterio de la autora la alcalización es una de las subetapas más importantes dentro de la etapa de purificación, ya que en ella es donde comienza el proceso de coagulación de las impurezas mediante la reacción entre el óxido de calcio y los fosfatos presentes en el jugo. De todos los métodos que involucran la cal y el calor el que considero más eficiente es la alcalización fraccionada y doble calentamiento porque se obtiene un jugo mucho más brillante, la cachaza filtra mejor, produce cachaza seca y porosa y elimina un 90% de ceras.

1.5.7.1 Influencia de la cal. Importancia

A pesar de que se emplean un sin número de sustancias para purificar el jugo, en la práctica se ha tomado a la cal como la sustancia de mayor relevancia para la alcalización, debido a que es posible obtenerla en cualquier lugar, es económica y se ha estudiado de forma profunda las reacciones que tiene con los constituyentes del jugo, (Larrahondo, 2009).

El constituyente activo de la cal es el óxido de calcio (CaO) que es el encargado de formar sales al reaccionar con el ácido fosfórico del jugo; la cal tiene además otros elementos como magnesio y sílice (2%), sulfato (0,2%), óxido de hierro y aluminio (2%), agua y dióxido de carbono (2%), materias insolubles en ácido clorhídrico (2%), y un (91%) de óxido de calcio; la presencia excesiva de elementos no óxidos de calcio resultan perjudiciales para el proceso, (Posada, 1987).

Domínguez, (2007) opina que la calidad en la preparación de la cal es un factor muy importante que las industrias deben controlar, debido a que ésta tiene un efecto significativo en el tamaño del flóculo que se produzca, la velocidad de sedimentación y la claridad del jugo producido, además, el grado de incrustaciones que puede tener en los equipos si se adiciona de forma excesiva.

Según Marín. L.V, (2012) la cal se puede adicionar al jugo de varias formas, pero generalmente las industrias prefieren adicionarla en una suspensión acuosa debido a que por este método es posible conocer la densidad de la misma y permite cuantificar la cantidad de calcio necesaria a adicionar según un volumen determinado de jugo.

Según Estenoz, (2011) la cal eleva el pH con el objetivo de minimizar las posibles pérdidas de sacarosa. El pH ideal es de 8,0 – 8,5, lo cual nos da un jugo claro y brillante, un mayor volumen de cachaza, aumento de la temperatura entre el jugo mezclado y el clarificado y se evita la destrucción de la glucosa e inversiones posteriores. Para una buena clarificación se necesita que la cantidad de cal sea correcta ya que con esto puede variar la calidad de los jugos que se obtienen.

La cal ayuda a precipitar impurezas orgánicas e inorgánicas que vienen en el jugo y para aumentar su poder coagulante se eleva la temperatura del jugo mediante un sistema de tubos calentadores.

1.5.7.2 Acción del fósforo en el proceso de alcalización

Morales, (2005) opina que los fosfatos son las sales inorgánicas aniónicas que se encuentran en mayor proporción en el jugo, con una cantidad aproximada de 0,14% – 0,4%. Ellos están presentes en el jugo en forma de pentóxido de difósforo (P_2O_5), los cuales reaccionan con los iones calcio que se adicionan en el proceso de alcalización obteniéndose un precipitado llamado fosfato de calcio.

En el anexo 7 se muestra el mecanismo físico químico de la clarificación del jugo, el mismo depende de la precipitación del fosfato de calcio que se obtiene de forma primaria en el proceso de coagulación y que finaliza completamente con el proceso de floculación.

Según Honig, (1974) el precipitado de fosfato de calcio es un precipitado floculento que remueve ciertos coloides por adsorción superficial y que al irse asentando arrastra mecánicamente algunos de los coágulos de calcio y algunas otras impurezas en suspensión.

La cantidad de fosfatos que debe tener un jugo para que su posterior clarificación sea eficiente, debe oscilar entre las 300 y 600 ppm. Cuando los jugos poseen una cantidad mayor a los 600 mg/L de fosfatos se forma un precipitado grueso que sedimenta apresuradamente. Si la cantidad de fosfatos en el jugo es menor a las 300 mg/L, el precipitado se forma gelatinoso, en forma de flóculos frágiles y con menor tamaño que se asientan lentamente.

1.5.8 Calentamiento del jugo de caña. Influencia de la temperatura

Según Caballero, (2013) esta operación tiene por objetivo calentar el jugo desde la temperatura a la que sale del tanque de alcalización hasta la temperatura de ebullición normal a la presión atmosférica del lugar. El calentamiento tiene por función fundamental acelerar la velocidad de la reacción de los fosfatos tricálcicos. El calentamiento de los jugos puede efectuarse antes, después o durante la alcalización del jugo; se realiza como complemento de la misma, facilitando la precipitación de las impurezas presentes para obtener jugos más puros. Esta operación se realiza con la ayuda de calentadores de tubos, y si el rango de calentamiento es muy grande, el calentador requiere un mayor número de pasos. Para aumentar la

temperatura del jugo, se utiliza vapor proveniente de las calderas o de la etapa de evaporación, (Cruz, 2012).

Es importante que la temperatura del jugo a la salida de los calentadores (Ver anexo 8) alcance valores entre 102–105⁰C con el fin de asegurar la coagulación de las proteínas. Las variaciones en la temperatura del jugo producirán gradientes de temperatura en el clarificador, los cuales causan que los lodos, en lugar de sedimentarse, presenten tendencia a subir, (Steindl, 2008).

Pedrosa Puertas, (1983) señala que es buena práctica elevar la temperatura del jugo en unos 4⁰C porque de esa forma al producirse el flasheo y quedar el jugo a la presión atmosférica, ayuda a eliminar todo el aire que pudiera traer incluido, debido a bombes, mezcla de cal, etc.

Honing, (1974) agrega que los cambios en la temperatura afectan profundamente la viscosidad de las soluciones de azúcar, la que disminuye rápidamente con el aumento de la temperatura. Este es uno de los principales factores que influye sobre la velocidad de hidrólisis de la sacarosa, así como en la descomposición de los azúcares reductores.

Con el calentamiento se descomponen una serie de sustancias coloidales, lo que ocasiona que se aglomeren y disminuyan su solubilidad en el jugo; ocurre la destrucción enzimática y microbiológica de las impurezas del jugo; algunos constituyentes orgánicos se coagulan, lo que facilita la remoción de las impurezas durante el proceso de sedimentación; acelera la formación de partículas de mayor tamaño y densidad debido a que incrementa la velocidad del movimiento, ocasionando que el número de oportunidades con la que las partículas pueden colisionar aumente; y provoca que el jugo disminuya de densidad y viscosidad, (Rocasolano, 1917).

1.5.9 Floculación de las impurezas del jugo de caña

El documento Coagulación y Floculación del agua, (2011) expresa que el proceso de floculación consiste en la agrupación de las partículas coaguladas y desestabilizadas iónicamente para formar masas de mayor tamaño (flóculos) y peso molecular, las cuales por medio de la fuerza de gravedad sedimentan al fondo del clarificador y se produce un jugo claro. Lo anterior se consigue con el

uso de una sustancia química denominada floculante que posee cargas iónicas a lo largo de su estructura.

El principio de este proceso es el fenómeno de adsorción en el cual se extrae materia de una fase para concentrarla sobre la superficie de otra fase (generalmente sólida), dicho de otra forma, el adsorbato (sustancia que se concentra en otra fase) o impureza se mueve desde la fase líquida para acumularse en la fase sólida por la acción del adsorbente (sustancia que se encarga de hacer el trabajo de adsorción).

El tipo de adsorción que tiene lugar en la floculación es eléctrico (adsorción por intercambio), en el cual la carga positiva de las impurezas coaguladas se concentran en la superficie del floculante a causa de la atracción electrostática en sus lugares cargados.

Aunque el proceso de floculación es sencillo, su eficiencia depende de una serie de condiciones que conviene hacer cumplir:

1. Una coagulación previa tan perfecta como sea posible.
2. Agitar de forma homogénea y lenta el jugo y el floculante para proporcionar mayor superficie de contacto.
3. Emplear de forma adecuada el floculante. Es decir, que el floculante que se prepare sea de excelente calidad. Esta es una de las condiciones más relevantes necesarias para lograr una adecuada clarificación de jugo.

1.6 Descripción del proceso de clarificación del jugo de caña

La clarificación de jugo es el proceso en el cual son eliminadas las impurezas aptas para la coagulación y floculación por medios mecánicos y químicos, que implican el asentamiento y remoción por sedimentación de las mismas, para producir un jugo claro, (Rein, 2007).

La clarificación de los jugos tiene como propósito obtener un pH de jugo claro adecuado para evitar inversión de la sacarosa o descomposición de las sustancias que puedan producir color; formar flóculos que atrapen la materia suspendida, para que pueda ser precipitada en un rango satisfactorio; lograr precipitaciones y coagulaciones tan completas como sean posibles; que la

velocidad de sedimentación sea rápida para minimizar tiempos de residencia en los clarificadores o pérdidas de sacarosa por inversión u otros mecanismos y obtener lodos lo más compactos posibles, (Manual de Operaciones del Azúcar Crudo, 2005).

La sedimentación debe ser rápida y completa para evitar incrustaciones en los evaporadores y en los tachos; cuando la separación de la materia en suspensión no es completa durante la clarificación, se producen azúcares de baja calidad y con un gran contenido de cenizas. La clarificación depende de la coagulación, del volumen de sedimentos, del tamaño, forma y densidad de las partículas, del área disponible para la sedimentación y de la velocidad del jugo en el clarificador, (Payne, 1953).

Los factores que más influyen en la eficiencia de clarificación son la estabilidad en el flujo de jugo alcalizado que entra al clarificador, el pH del jugo y su temperatura, la correcta operación del tanque de evaporación instantánea (tanque flash) y el tipo de floculante, su dosis y calidad, (Jenkins, 1971).

Lamasares. A, (2013) aclara que a pesar de que la clarificación de jugo es una operación unitaria, sus resultados afectarán el resto del proceso de producción de azúcar y finalmente su calidad como producto comercial. Por tal motivo, se debe tener especial cuidado en la estación de clarificación, pues muchas de las actividades que pertenecen a las etapas posteriores de la fábrica dependen de su buen desempeño.

1.7 Características generales de los equipos de clarificación

1.7.1 Tanque amortiguador flash

Según el documento Concepto de la Clarificación, (2010) el tanque flash (ver anexo 9) es un tanque que se sitúa justo antes de la entrada de jugo alcalizado al clarificador. Dentro de sus funciones fundamentales se encuentran:

1. Reducir la velocidad lineal con la que viene el jugo después de los procedimientos anteriores de encalado y calentamiento.
2. Permitir que la temperatura del jugo al entrar al clarificador sea constante.
3. Arrastrar las burbujas de aire ocluido por medio de la emisión de vapor para evitar corrientes convectivas dentro del clarificador.

1.7.2 Clarificadores de jugo

Según Hugot, (1986) el clarificador o decantador continuo es un tanque al que se hace llegar de manera regular y continua el jugo por decantar y que es lo suficientemente grande para que la velocidad de escurrimiento y de circulación del jugo por decantar sea de un valor tan bajo que no impida que la decantación se realice.

Según el Manual de Clarificadores de Bajo Tiempo de Retención, (2010) en el clarificador se resumen todas las operaciones de calentamiento y alcalización de los jugos, con la separación en dos corrientes:

1. Jugo clarificado: es el jugo que sale del clarificador por la parte superior, este debe cumplir con ciertos parámetros fisicoquímicos para considerarse de buena calidad. Una vez que sale del clarificador se hace pasar por el colador plano con el objetivo de remover las partículas que pudieran quedar en suspensión y posteriormente pasa a la etapa de evaporación.
2. Lodos precipitados: son extraídos de la parte inferior del clarificador por medio de bombas de diafragma cuya acción fundamental consiste en transportarlos hacia la estación de filtración. Debido a su gran porcentaje de azúcar se filtran para obtener dos productos: cachaza (la cual es una masa seca que se envía para compostaje en el campo) y jugo filtrado que contiene la sacarosa recuperada y por ello se retorna al proceso justo antes de que el jugo sea alcalizado. Como se observa, son procesos cíclicos y de aquí radica la importancia de una buena clarificación para que se produzcan lodos compactos.

Existen varios tipos de clarificadores acorde con los resultados que los ingenios quieren obtener. Periódicamente aparecen nuevos diseños de clarificadores, lo que hace que existan muchos modelos de estos tanques. De forma elemental, existen dos tipos de clarificadores:

1. Clarificadores sin bandejas.
2. Clarificadores con bandejas.

1.7.3 Clarificadores con bandejas

Este tipo de clarificador era el más empleado para la clarificación de jugo antes de la introducción de floculantes en la industria azucarera. De hecho, los

ingenios prefieren este diseño en vez de unos más modernos por los excelentes resultados que se obtienen del jugo claro.

El ejemplo clásico de este tipo de clarificador son los RapiDorr (ver anexo 10), el cual se describe a continuación por Morales. C, (2005).

Este clarificador tiene un eje central que gira lentamente y que lleva láminas raspadoras que barren el fondo de los compartimientos. El jugo por decantar llega tangencialmente a la parte superior de un compartimiento llamado de "floculación". En éste lugar sobrenada un poco de espuma que se elimina por medio de un raspador especial que la empuja hacia un pequeño canal lateral de evacuación. Los compartimientos se comunican entre sí. En cada uno, los lodos que se depositan, se empujan lentamente hacia el centro en donde caen, por un orificio anular, al fondo del aparato descendiendo a lo largo y al exterior del tubo central. El tubo central comunica a las partes superiores de los diversos compartimientos. El jugo por decantar pasa del tubo central a los compartimientos por medio de ductos que atraviesan el espacio anular por el que descienden los lodos. El jugo claro decantado sale de cada compartimiento por varios tubos conectados con la zona más clara de él, es decir, con la circunferencia situada en la parte superior de cada compartimiento, cerca de la parte exterior del clarificador. Estos tubos descargan el jugo en una caja en la que su gasto se ajusta con la ayuda de un tubo que corre sobre la extremidad de la tubería, fijando el nivel de derrame, que es evidentemente, con diferencia de pocos milímetros, el nivel del jugo del tanque. Los lodos se toman de la parte inferior y por ser tan espesos, se emplean preferiblemente bombas de diafragma, de válvulas y membranas, de carrera muy pequeña y ajustable, que las hace subir a una caja de lodos opuesta a la caja de jugo, de donde pasan a la estación de filtración de cachaza.

Gracias a sus dimensiones que le dan una relación superficie exterior a capacidad, muy pequeña, el jugo claro sale a unos 100°C hacia la estación de evaporación. El tiempo de residencia del jugo en estos clarificadores es de aproximadamente tres horas.

1.7.4 Clarificadores sin bandejas

En el Manual de Clarificadores de Bajo Tiempo de Retención, (2010) se plasma que la introducción de la clarificación de bajo tiempo de retención en la

industria azucarera trae consigo la introducción de nuevos conceptos en cuanto a la operación de esta tecnología, que cuenta como equipamiento fundamental de clarificador (ver anexo 11), tanque flash, mezclador de jugo floculante acondicionador de flóculos, estación de floculantes y recipientes para almacenar cachazas en paradas.

Este clarificador fue desarrollado por el Sugar Research Institute de McKay, Australia en 1988, por tal motivo se distingue con el nombre de clarificador SRI y se reconoce actualmente como el más avanzado sistema de clarificación de jugo en las industrias azucareras.

A diferencia de los clarificadores con bandejas, el tiempo de residencia de los clarificadores SRI es tan solo de 45 minutos. Su funcionamiento se describe a continuación:

El jugo proveniente del Tanque Flash entra a una cámara de alimentación y se reparte en las dos direcciones en el canal anular de alimentación. El jugo fluye por medio de vertederos en forma de "V" al pozo de alimentación y se defleca lateralmente en la interface de separación del aparato. El jugo clarificado se extrae por medio de dos canales anulares provistos de vertederos localizados por dentro y por fuera del sistema interno de alimentación.

El empleo de clarificadores de bajo tiempo de retención implica una menor flexibilidad de la operación y un mayor rigor en el trabajo de los equipos periféricos del proceso de purificación. Estos equipos son sensibles a cambios en el flujo de jugo, en su temperatura, en el contenido de sólidos insolubles (especialmente bagacillo), el valor de pH, etc., requiere un control y una atención más eficiente en estos parámetros.

Las ventajas de este sistema son: alto manejo de flujo por unidad de volumen, sistema simple de extracción de lodos, facilidad para la extracción del jugo claro, bajo tiempo de residencia lo cual implica menores pérdidas de calor en el jugo, mejor suministro de flujo de jugo a los evaporadores (flujo más continuo), menor caída de pH el jugo que entra sale con una caída promedio de 0,2-0,3, extracción continua y controlada de cachaza, correcto aislamiento del equipamiento lo cual influye de forma importante en la operación al determinar la existencia o no de corrientes convectivas en el jugo dentro del clarificador que interfieren la sedimentación.

Los tiempos de residencia menores condicionan también un menor desarrollo de reacciones indeseables, incluyendo las relacionadas con aspectos microbiológicos en los lodos del clarificador que incrementan su importancia por la recirculación del jugo de filtro.

A criterio de la autora los clarificadores de bajo tiempo de retención son superiores a los clarificadores convencionales porque manejan continuamente mayores flujos de jugo en un menor tiempo, esto implica menor posibilidad de inversión de la sacarosa, menor destrucción de las sustancias que producen color y menores pérdidas de calor. Además, de proporcionar un mayor desendulzado de los lodos y lograr una mayor compactación de los mismos.

1.8 Floculantes

Según NTC 2369, (2006) los floculantes, también llamados ayudantes de coagulación, de floculación o de filtración son sustancias poliméricas de elevado peso molecular, solubles en agua, que se clasifican por su naturaleza (mineral u orgánica), su origen (natural o sintético) o según su carga iónica (no iónico, catiónico, aniónico) y se encuentran en presentaciones líquidas o sólidas.

Para la clarificación de jugo las industrias azucareras utilizan floculantes sintéticos aniónicos o catiónicos sólidos, por lo general se inclinan más por el uso de floculantes aniónicos debido a que ellos poseen una gran afinidad con las superficies sólidas, El uso de este tipo de floculantes comenzó a finales de la década de 1950. Desde entonces, los estudios están encaminados a la resolución de problemas tecnológicos relacionados con la aceleración y aumento de eficacia del polímero en procesos de separación de sistemas sólido-líquido.

Hasta el momento, investigaciones realizadas han comprobado que no existe un polímero que se desempeñe igual en todas las industrias azucareras. Esto indica que cada fábrica deberá hacer la selección del producto que aplicarán a su proceso, según sean sus condiciones de operación, (Cifuentes, *et.al*, 2009).

El uso de floculantes o polímeros ha tenido grandes aplicaciones industriales diferentes a la fabricación del azúcar, tales como:

1. En el tratamiento de aguas potables e industriales de proceso.
2. Depuración de aguas residuales, específicamente en tratamientos físico – químicos.
3. Tratamiento de fangos, para mejorar el rendimiento de centrífugas y filtros prensa.
4. Procesos industriales en papeleras, petroquímica, tratamiento de minerales, conserveras, etc.

Según la Ficha Técnica del floculante Kebofloc 402, (2013) adicionar floculante en el proceso de clarificación de jugo trae las siguientes ventajas:

1. Incremento en la velocidad de sedimentación de los lodos.
2. Disminución del volumen de lodos como consecuencia de una producción más compacta.
3. Producción de jugo con valores menores de turbiedad (jugo más claro) como resultado del arrastre de las impurezas.
4. Disminución de la pol en la torta de cachaza producida en la estación de filtración de cachaza.

1.8.1 Características de los floculantes aniónicos

Los componentes principales de este grupo de polímeros son las poliacrilamidas (PAM), las cuales desde los últimos cincuenta años se han convertido en la unidad base sobre la que se fundamenta toda la química de los floculantes sintéticos aniónicos, produciendo de esta forma más del 95% de los floculantes existentes a nivel mundial, (Fernández, 2007).

1.8.2 Físicoquímica de la formación de los flóculos

Es importante recordar que durante la floculación existen una serie de compuestos con carga iónica. Se encuentra, por ejemplo el fosfato tricálcico precipitado anteriormente en el proceso de coagulación, el cual posee una carga positiva por la presencia del ion calcio; y se encuentra ahora una solución que contiene enlaces negativos en su estructura: el floculante.

Varios investigadores han atribuido la formación del flóculo al contacto electrostático entre estas dos sustancias. Se dice que el ion Ca^{2+} el encargado de realizar la unión entre la impureza coagulada y el floculante (Ver anexo 12).

En una molécula de floculante en solución, los grupos acrilato se disocian y sus cargas negativas se activan en la cadena del polímero, con el objetivo de unir varios coágulos a dicha molécula hasta constituir una extensa red denominada flóculo, (Morales, 1975).

El documento Caracterización y Evaluación de algunos floculantes industriales utilizados para la clarificación de jugos de caña de azúcar en Colombia, (2009) los dos criterios más importantes a la hora de elegir un floculante son su peso molecular y su grado de hidrólisis, sin embargo esta información se la proporciona el proveedor a la industria azucarera tras realizar una serie de experimentos *in situ* que evalúen las necesidades de la industria según su capacidad de proceso.

El grado de hidrólisis de un floculante cuantifica sus radicales activos (es decir sus especies iónicas) para determinar qué tan eficiente podría ser el mismo. En el caso de los floculantes aniónicos, el grado de hidrólisis denota la cantidad de fracciones acrilato que posee una molécula de floculante. Esto se hace basándose en la siguiente fórmula.

$$\text{Grado de hidrólisis(\%)} = (100y) / (x+y)$$

Dónde:

Y = Radicales $-\text{COOH}$ ó $-\text{COONa}$

X = Radicales $-\text{CONH}_2$

Se ha comprobado experimentalmente que un grado de hidrólisis entre 25% y 40% (ver anexo 13) asegura un adecuado funcionamiento del floculante, que es donde se obtienen valores menores de turbiedad en el jugo, (Sassia, 2010).

1.8.3 Preparación del floculante

Según el documento Preparación de Polímeros Aniónicos en Polvo para su Uso en la Industria Azucarera, (2006) los floculantes sólidos deben ser aplicados al proceso de clarificación de jugo en forma de disolución, la cual debe ser preparada bajo unas condiciones controladas para obtener los rendimientos admisibles, esperados por la industria y por el proveedor.

Dado que se ha establecido experimentalmente que la calidad del floculante afecta directamente la clarificación de jugo, es necesario que las industrias

azucareras tengan especial cuidado con el cumplimiento de sus condiciones de preparación.

Es importante aclarar que las condiciones de preparación son, de forma global, iguales para todos los floculantes aniónicos utilizados en la clarificación de jugo de las industrias azucareras. Sin embargo, como se ha venido mencionando, las variables fisicoquímicas a las cuales se debe realizar la preparación deben ser establecidas por cada industria tras hacer pruebas de laboratorio, para llegar a conclusiones numéricas a nivel industrial según sea la capacidad de proceso característica de la fábrica, para obtener los niveles más exitosos de eficiencia en el floculante que emplee, (Rodríguez, *et.al*, 2009).

1.8.4 Dosificación de la solución floculante

Según Rein, (2007) la ventaja de los floculantes aniónicos sintéticos es que se aplican en dosis mínimas al tener elevada afinidad con las superficies sólidas, lo que produce que se eliminen casi todos los sólidos presentes en el jugo.

Cuando una industria tiene una serie de procesos que son continuos, y más aún cuando la industria trabaja las veinticuatro horas continuas del día, los productos que se adicionan a los procesos también deben ser constantes para garantizar una transformación continua. Por eso, para controlar la cantidad que se debe adicionar de un insumo, se relaciona el mismo con la variable tiempo y/o con la cantidad del material que esté en el proceso.

La dosis del polímero la decide la industria según como esté obteniendo los resultados, pero éste sí es un concepto fácilmente modificable según sean las condiciones de entrada del material al proceso porque si el jugo contiene grandes cantidades de impurezas, sencillamente la fábrica puede decidir aumentar el flujo de floculante, y por tanto la dosis del mismo y viceversa.

La cantidad de floculante va referida al producto en polvo y no en solución. Por este motivo la industria debe hacer los cálculos necesarios para determinar el flujo de la solución floculante que aplique a su proceso.

La autora considera que la utilización de floculantes en el área de clarificación trae consigo que se alcancen velocidades de sedimentación superiores, esto implica mayor remoción de impurezas en un menor tiempo y manejo de mayores volúmenes de flujo.

1.9 Conclusiones parciales.

1. La purificación del jugo de caña constituye la etapa fundamental del proceso de obtención de azúcar crudo porque en ella son eliminadas todas las impurezas presentes en el jugo.
2. El coagulante catiónico más utilizados en la industria azucarera es el óxido de calcio debido a su eficiencia y bajo costo en la purificación de jugos de caña.
3. Los floculantes o ayudantes de floculación son una herramienta clave en el proceso de clarificación, los más utilizados son los sintetizados a base de poliacrilamidas.

Capítulo 2: Materiales y Métodos

En el presente capítulo se abordan los métodos y técnicas que se utilizaron para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto en esta investigación.

2.1 Descripción de la etapa de purificación de los jugos de caña en la Unidad Empresarial de Base Jesús Rabí

La empresa azucarera Jesús Rabí se encuentra ubicada en la parte más oriental del municipio de Calimete, sus límites alcanzan al municipio Jagüey Grande hacia la porción Sur de la llanura centro occidental de la provincia. Está conformada con la revinculación de las áreas cañeras del desactivado Complejo Agroindustrial Australia (CAI) enclavado en el municipio de Jagüey Grande y por las áreas cañeras tradicionales del CAI Jesús Rabí.

En la UEB Jesús Rabí se realiza el tiro de la materia prima (caña de azúcar) directamente hacia el basculador, esto conlleva a la eliminación de los centros de acopio o de limpieza y por tanto se logra mayor frescura en la caña, menor acción microbiana y un ahorro considerable de combustible.

Una vez que la caña es basculada comienza la etapa de preparación de la caña, dicha etapa anticipa a la extracción y en ella se rompe la resistencia de la corteza y los nudos de la caña, se abren las células de los tejidos de la misma y disminuye el volumen de caña por la eliminación de espacios vacíos mediante los niveladores y los juegos de cuchillas.

Las fibras de caña pasan al tándem de molinos, en el central se cuenta con cuatro molinos que mediante compresiones sucesivas le extraen la mayor cantidad de jugo a la caña. Para una mayor extracción de jugo se le suministra agua de imbibición a la entrada del cuarto molino y como resultado se obtiene bagazo y jugo mezclado. El bagazo se envía a la estación de hornos y calderas para la producción de vapor, y el jugo mezclado pasa por un colador rotatorio con el objetivo de eliminar las impurezas suspendidas en el mismo.

El jugo mezclado contiene sacarosa y un conjunto de impurezas que son necesarias eliminar. Para ello se procede a la etapa de purificación pues en ella se remueven los no azúcares que contiene el jugo mezclado con el objetivo de posibilitar la máxima recuperación de azúcar de alta calidad y evitar las incrustaciones en la superficie de los equipos. Además tiene como importancia fundamental alcanzar la mayor separación posible de impurezas presentes en

el jugo para lograr que en su mayoría salgan en forma de cachaza seca a partir de las operaciones de alcalización, calentamiento y adición de floculante.

El jugo mezclado se lleva al tanque de alcalización en frío, donde se eleva el pH del jugo entre (7,2 – 7,9) tras la adición de lechada de cal para neutralizar el pH del jugo y evitar la inversión de la sacarosa. Además, ocurre la reacción entre el hidróxido de calcio y el pentóxido de difósforo para propiciar el proceso de coagulación de las impurezas.

El jugo alcalizado se bombea hacia los calentadores. El área de calentadores está formada por los calentadores de jugos primario, secundario y rectificador, su función es calentar el jugo para acelerar las reacciones químicas entre la cal y el jugo. A través del calor se optimiza la coagulación de las proteínas y otros coloides, se aceleran las reacciones químicas, se evita el desarrollo de microorganismos, entre otros. De los calentadores el jugo sale a una temperatura entre 102 – 106⁰C. Después se conduce el jugo hacia el tanque flash, se eliminan los gases incondensables y se homogeniza la temperatura a 100⁰C con el objetivo de evitar corrientes convectivas dentro del clarificador.

Una vez que ocurre el flasheo se le suministra el floculante al jugo antes de entrar al clarificador. El floculante propicia que ocurra el proceso de floculación de las partículas coaguladas tras la adición de la lechada de cal en el tanque de alcalizar y que la sedimentación de las mismas dentro del clarificador ocurra a una velocidad lo mayor posible.

La clarificación es una de las etapas más importantes dentro del proceso, en ella se procede a la separación de la mayor parte de las impurezas que acompañan al jugo. Esto ocurre por el fenómeno de sedimentación de las impurezas en el clarificador de bajo tiempo de retención, en el cual se extrae el jugo claro por la parte superior y cachaza por la parte inferior. El jugo clarificado pasa por el colador plano para eliminar el bagacillo que se queda en suspensión y continúa hacia la etapa de cristalización. La cachaza pasa a la estación de filtros al vacío donde se le extrae el jugo a la cachaza, este jugo se denomina jugo de los filtros y se recircula al proceso, la cachaza sólida se utiliza como alimento animal.

2.2 Caracterización de los jugos que se procesan

Para la caracterización de los jugos se toma durante diez días dos muestras diarias (mañana y tarde) de jugo alcalizado y jugo clarificado a una misma hora (8:00am y 2:00pm).

A dichos jugos se les determina parámetros de calidad para conocer la estabilidad en el comportamiento de la materia prima aún cuando se procesan diferentes variedades de la misma.

Los parámetros a determinar son: pH, brix, pol y pureza. Dichos parámetros se determinan mediante las técnicas analíticas que Pérez y Fernández, (2006) proponen en el Manual de Métodos Analíticos para Azúcar Crudo.

2.3 Determinación de los parámetros que caracterizan los jugos

2.3.1 Determinación del Potencial Hidrogeniónico (pH)

El pH es el logaritmo del recíproco de la concentración molar de hidrógeno en solución. Se determina mediante la medición de la diferencia de potencial entre dos electrodos sumergidos en la solución desconocida. Un sistema de electrodos adecuado consiste en un electrodo de cristal y uno de referencia.

Se recomienda un medidor de pH preciso y confiable equipado con un electrodo de medición de cristal adecuado y un electrodo de calomel que tenga un puente salino lleno con solución saturada de cloruro de potasio (KCl).

2.3.2 Determinación de sólidos refractométricos disueltos en jugos (°Brix)

El Brix es un parámetro que tiene singular importancia en la industria azucarera, ya que permite determinar la pureza de los productos y subproductos (iniciales, intermedios y finales) involucrados en el proceso agroindustrial. El refractométrico es uno de los tres métodos utilizados para determinar los sólidos disueltos en los productos azucareros y se emplea en distintas fases del proceso industrial gracias a la rapidez y sencillez con que se obtienen los resultados. Según la ICUMSA este método mantiene *status* aceptado.

Fundamento del método.

En principio, el Brix refractométrico se basa en el fenómeno que experimenta un rayo de luz, con longitud de onda definida, cuando atraviesa dos fases con

diferente densidad óptica. La relación entre el seno del ángulo incidente y el refractado se denomina índice de refracción y constituye una constante física confiable para identificar sustancia y/o determinar la concentración de soluciones. Por otro lado, aunque la escala refractométrica se define a 20° C existen tablas para corregir los valores obtenidos a otra temperatura. (Tabla 4 del Manual de Métodos Analíticos para Azúcar Crudo, 2006).

2.3.3 Determinación del pol en productos azucareros. Método de la masa normal utilizando hidróxido de aluminio formado *in situ*

El ICINAZ ha desarrollado un método basado en la masa normal, que permite clarificar todos los productos del proceso agroindustrial azucarero para la ulterior determinación del pol. El método de la masa normal, aunque es más laborioso produce un ahorro sustancial de reactivos. A continuación se describe el procedimiento para aplicar el método de la masa normal, utilizando hidróxido de aluminio formado en el seno de la solución como agente clarificante.

Fundamento del método.

El método de clarificación se basa en la propiedad que tiene el hidróxido de aluminio, formado en el seno de la solución que se clarifica, de eliminar color y turbiedad para rendir soluciones aptas para determinarles el pol.

La determinación del pol se fundamenta en la propiedad que presenta la sacarosa de rotar el plano de la luz polarizada en una magnitud directamente proporcional a su concentración en solución acuosa. En realidad, el pol viene dado por la sumatoria algebraica de todas las sustancias ópticamente activas contenidas en la solución clarificada, por lo tanto, en mayor o menor grado, siempre se determina el contenido de sacarosa aparente en el producto analizado.

2.3.4 Determinación de Pureza al jugo de caña

La pureza de los jugos expresa la cantidad de sólidos solubles que son sacarosa, se determina mediante la ecuación siguiente:

$$P = (\text{Pol}/\text{Bx}) \cdot 100 \quad \text{ec. 2.1}$$

Donde:

P; es la pureza del jugo (%)

Pol; cantidad de sacarosa aparente (%)

Bx; cantidad de sólidos solubles (%)

2.4 Procedimiento a seguir para la determinación de los parámetros de calidad del jugo

El procedimiento a seguir para la determinación de los ensayos de laboratorio son los siguientes:

1. Preparación de los floculantes Quimifloc 400, Kebofloc 402 y Zukerfloc 400 C Plus con las condiciones fisicoquímicas recomendadas por el proveedor (son las utilizadas en la industria) dentro de las que se encuentran concentración al 0.1%, temperatura del agua menor de 50⁰c, pH del agua entre 7- 9, agitación de la solución lenta y constante aproximadamente una hora, tiempo de reposo entre 4 y 6 horas para la estabilización de la solución.
2. La toma de muestras del jugo alcalizado se realiza a la misma hora durante quince días con un total de tres réplicas diarias, con el objetivo de demostrar la variabilidad que posee el jugo de caña que entra al proceso a una misma hora, en diferentes días.
3. Garantizar que el volumen de jugo extraído del toma muestras alcance para la realización de todos los ensayos y de esta manera tener como blanco un jugo alcalizado con iguales características para todas las dosis empleadas.
4. Garantizar el control de las variables propias del proceso como pH del jugo alcalizado entre 7.9 - 8 y temperatura final del jugo alcalizado de 100⁰c antes de comenzar la clarificación para que la única variable determinante en la calidad del jugo clarificado (obtenido a escala) fuera la dosis de floculante empleada en cada ensayo.
5. Clarificaciones de jugo a escala de laboratorio donde se utiliza como agente de floculación la solución de floculante adicionada a 2, 4, 6, y 8 mg/L.
6. Determinación analítica de diferentes parámetros de calidad tanto al jugo clarificado como al jugo alcalizado para obtener a escala de laboratorio la dosis más recomendada para cada uno de los floculantes en estudio.

2.5 Determinación de los parámetros de calidad de los jugos

Los parámetros de calidad que se determinan al jugo clarificado y al jugo alcalizado son: velocidad de sedimentación, compactación de lodos, color, turbidez, porcentaje de remoción de turbidez y porcentaje de decoloración.

Los parámetros mencionados anteriormente se estipulan mediante las técnicas analíticas que Pérez y Fernández, (2006) proponen en el Manual de Métodos Analíticos para Azúcar Crudo.

2.5.1 Determinación de la velocidad de sedimentación

Este método se emplea para determinar la velocidad con la cual los jugos logran sedimentar la mayor cantidad de impurezas, con o sin la utilización de floculantes. En Cuba los jugos muestran una velocidad de sedimentación natural de 1,5 a 2,5 cm/min. En Jesús Rabí con el uso del clarificador de bajo tiempo de retención se reportan velocidades de 6 cm/min y los floculantes aportan un volumen de sedimentos del orden del 20 al 30 %.

Estas pruebas se efectúan al jugo alcalizado y calentado hasta 100⁰c, condición que se logra al tomar las muestras a la salida del tanque flash. Es posible también simular este proceso en el laboratorio a partir del jugo mezclado y de los filtros para así reproducir las operaciones de alcalización y calentamiento. Se utilizan probetas de 1000 ml de capacidad, preferiblemente aforadas. En caso de no existir se podrá emplear una regla graduada para sustituir la escala.

2.5.2 Determinación del porcentaje de compactación de lodos

La determinación del porcentaje de compactación de lodos se basa en determinar la cantidad de impurezas que logran sedimentar al cabo de 30 minutos.

A continuación se explica la técnica a utilizar según el Instituto Científico de la Caña de Azúcar (ICIDCA).

1. Ajustar el cronómetro en ceros.
2. Comenzar a contabilizar desde el momento en que entren en contacto el jugo alcalizado y el floculante.
3. Se evalúa el comportamiento del descenso de los lodos durante 30 minutos.

4. Pasados los 30 minutos se toma lectura de la altura que tienen los lodos en la probeta.

5. El porcentaje de compactación de lodos se determina por la siguiente ecuación:

$$\% CL = (h_L/100) \quad \text{ec. 2.2}$$

Donde:

% CL; es el porcentaje de compactación de lodos (%)

h_L ; es la altura de los lodos al cabo de los 30 minutos (cm)

2.5.3 Determinación espectrofotométrica de la turbidez en jugos

Las principales impurezas contenidas en los jugos de caña están constituidas por sales disueltas, sustancias coloreadas y partículas en suspensión. Quizás la principal ventaja de la clarificación con hidróxido de calcio es la sensible eliminación de la turbiedad y la consecuente obtención de jugos transparentes (brillantes), operación que reviste capital importancia dentro del proceso industrial. La determinación de la turbiedad en los jugos clarificados y de filtros provee una guía para evaluar la eficiencia del proceso de clarificación. El método para determinar dicho parámetro, que se describe a continuación, es útil y a la vez sencillo.

Fundamento del método.

Se basa en la medición espectrofotométrica de la turbiedad del jugo antes y después de filtrarse.

La determinación del porcentaje de remoción de turbidez se calcula por la siguiente ecuación:

$$\% RT = [(\% T_{\text{jugo alcalizado}} - \% T_{\text{jugo clarificado}}) / (\% T_{\text{jugo alcalizado}})] \cdot 100 \quad \text{ec.2.3}$$

Donde:

%RT; es el porcentaje de remoción de turbidez (%)

% $T_{\text{jugo alcalizado}}$; es el porcentaje de turbidez del jugo alcalizado (%)

% $T_{\text{jugo clarificado}}$; es el porcentaje de turbidez del jugo clarificado (%)

2.5.4 Determinación espectrofotométrica del color del azúcar crudo en solución

El color constituye uno de los parámetros más importantes en la determinación de la calidad de los azúcares. En el caso de los crudos según crece la

intensidad del color aumenta el costo de refinación. Por esta razón el color es una de las características priorizadas por la ICUMSA y otras organizaciones similares. La determinación espectrofotométrica del color presenta ciertas dificultades, ya que a pesar de ser cuantitativa carece de patrones de referencia, lo que podría provocar diferencias instrumentales significativas y alterar dramáticamente la reproducibilidad.

Fundamento del método.

Se basa en la medición de la absorbancia, a 420 nm, de una solución de azúcar, cuyo pH se ha ajustado a $7,0 \pm 0,1$ unidades, y después de filtrarla a través de una membrana de $0.45 \mu\text{m}$, se le determina la concentración de SRD. El resultado se expresa en unidades de color ICUMSA (UI).

La determinación del porcentaje de decoloración se calcula por la siguiente ecuación:

$$\%D = [(\% \text{Color}_{\text{jugo alcalizado}} - \% \text{Color}_{\text{jugo clarificado}}) / (\% \text{Color}_{\text{jugo alcalizado}})] \cdot 100 \quad \text{ec. 2.4}$$

Donde:

%D; es el porcentaje de decoloración (%)

2.6 Proceder para realizar el análisis estadístico a los resultados que se obtienen de los ensayos de laboratorio

Con el objetivo de determinar el efecto de diferentes factores sobre un conjunto de variables de respuesta que miden la efectividad de los floculante, se realiza un diseño factorial con diferentes números de niveles por cada factor (diseño factorial multinivel).

Los factores considerados son:

1. Tipo de floculante
2. Concentración de floculante

Los niveles son:

Tipo de floculante con tres niveles:

1. Floculante Quimifloc.
2. Floculante Kebofloc.
3. Floculante Zukerfloc.

Concentración de floculante con cuatro niveles:

1. Concentración a 2 mg/L.
2. Concentración a 4 mg/L.

3. Concentración a 6 mg/L.

4. Concentración a 8 mg/L.

Se construye una matriz de diseño octogonal que tiene en cuenta todas las combinaciones de los factores y los niveles donde se realizan 14 réplicas de esta matriz, correspondiente a diferentes días, con el objetivo de evaluar el efecto de la variable materia prima sobre los resultados.

En total se realizan 180 corridas experimentales que consisten en prueba de probeta para evaluar la efectividad de los floculantes.

Diseño: $3^1 \times 4^1 = 12$ condiciones experimentales

Las variables de respuestas analizadas son:

1. Velocidad de sedimentación (cm/min).
2. Porcentaje de compactación de lodos (%).
3. Turbidez (%).

Capítulo 3. Análisis de los Resultados

En este capítulo se obtiene la dosis más efectiva de cada uno de los floculantes objeto de estudio, mediante un análisis costo–beneficio a partir de la determinación de los parámetros de calidad del jugo alcalizado y clarificado. Previamente se realiza una caracterización de los jugos que se procesan para conocer si los mismos presentan estabilidad. Se selecciona el floculante que mejores resultados aporta al proceso en una prueba industrial, y se verifica si dichos resultados corresponden con los obtenidos experimentalmente a escala de laboratorio. Para efectuar lo antes expuesto se tiene en cuenta la metodología planteada en el capítulo dos.

3.1 Caracterización de los jugos que se procesan

Para poder hacer la caracterización de los jugos que se procesan en el central azucarero Jesús Rabí es preciso conocer las diferentes variedades de caña que se emplean como materia prima, pues cada una presenta características diferentes.

En la empresa se cuenta con 11 variedades de caña las cuales ocupan un área de 93896 hectáreas (ha), de ellas la variedad C86-12 es la que más área ocupa con un 33,2%; a nivel nacional se destaca dentro de las variedades líderes foráneas y ocupa el 20 % del área plantada. En el anexo 14 se muestra la distribución de variedades de cañas plantadas en la UEB Jesús Rabí.

La caracterización de los jugos es de gran importancia para la posterior experimentación pues son ellos los que definen la calidad del producto final. Las características esenciales de cada producto involucrado en el proceso permiten tomar las medidas que conduzcan a incrementar el rendimiento y la eficiencia fabril, es por ello que es necesario conocer cuan estables son los parámetros que los caracterizan.

En el anexo 15 se muestran los datos obtenidos de los diferentes parámetros (pH, Bx, Pol, Pureza) que caracterizan a los jugos alcalizado y clarificado que se procesan en el central azucarero Jesús Rabí.

La tabla 3.1 reporta promedios de los diferentes parámetros previamente mencionados.

Tabla 3.1: Promedio de los parámetros calculados

Jugo alcalizado				Jugo clarificado			
pH	Bx	Pol	Pza	pH	Bx	Pol	Pza
7,93	13,60	11,43	84,00	6,95	13,49	11,59	85,83

Fuente: Elaboración propia

La caída de pH entre el jugo alcalizado y el clarificado es aproximadamente la unidad, el brix se mantiene alrededor de los 13^oBx, valor que al ser comparado con el brix del jugo mezclado(12,50 - 13^oBx por ajuste de la fábrica) se considera como aceptable porque no sobrepasa las 1,5 unidades como está normado, la pol varía en un 0,16 y la pureza aumenta en 1,83 unidades, lo cual corresponde con lo planteado por Arca, *et.al*, (2004), lo anterior demuestra la estabilidad que presentan los parámetros que caracterizan dichos jugos la variabilidad de la materia prima difiere notablemente.

3.2 Análisis de los resultados experimentales

La experimentación consiste en obtener valiosos datos para el desarrollo del trabajo. Este es un paso que obviamente resulta de gran importancia para la obtención de la dosis a recomendar y para lograr definir cuál de los tres floculantes (Quimifloc 400, Kebofloc 402, Zukerfloc 400 C Plus) ofrece mejores resultados industrialmente, ya que no se cuenta con abundante información experimental previa a este trabajo que permita tener conocimiento del comportamiento de dichos floculantes.

En los anexos 16, 17 y 18 se observan los promedios de los parámetros de calidad determinados al jugo clarificado obtenido tras la adición de los tres floculantes, dosificados a 2, 4, 6 y 8 mg/L con la utilización del jugo alcalizado como blanco de comparación.

3.2.1 Velocidad de sedimentación.

Una velocidad de sedimentación considerable es clave en el proceso de sedimentación para que el tiempo de permanencia del jugo en el clarificador sea cada vez menor y aumente la capacidad del proceso.

Se analiza a continuación el comportamiento de la velocidad de sedimentación de los floculantes objeto de estudio durante los quince días de pruebas experimentales.

En la figura 3.1 se observa que la velocidad de sedimentación del jugo clarificado para todas las dosis empleadas fue mayor que la velocidad de sedimentación del jugo alcalizado o blanco durante los quince días en estudio, este comportamiento demuestra la efectividad que trae la utilización de floculantes. También se puede observar que el comportamiento de este floculante es estable ya que la velocidad de sedimentación para cada dosis se mantuvo alrededor de un valor lógico durante el tiempo en estudio a pesar de la variabilidad de la composición de los jugos que entran a fábrica.

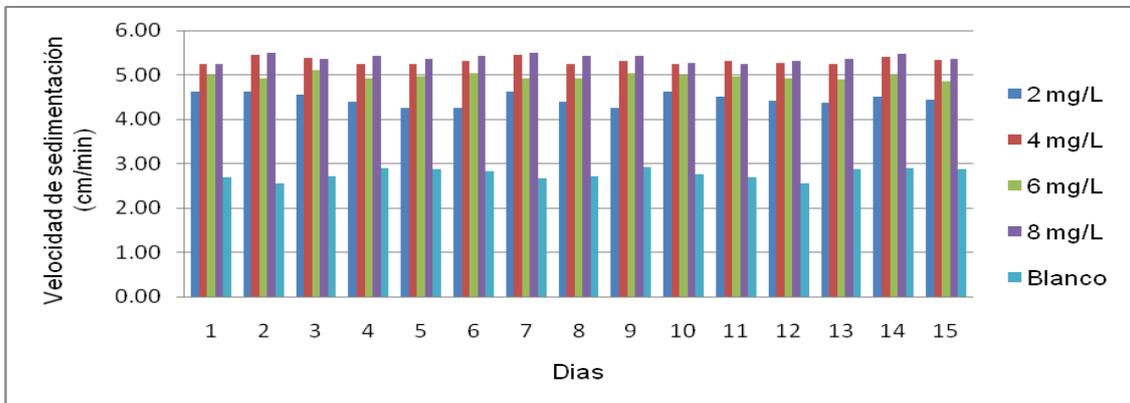


Figura 3.1. Comportamiento de la velocidad de sedimentación del floculante Quimifloc 400.

Se puede notar que a la concentración de 2 mg/L se logra la menor velocidad de sedimentación (4,45 cm/min), mientras que para 8 mg/L la mayor velocidad (5,38 cm/min), para las restantes dosis se destacan velocidades por encima de los 4.5 cm/min, donde la concentración de 6 mg/L es la de menor velocidad. Todas las dosis tienen una velocidad de sedimentación ≥ 4 cm/min valor mínimo admisible para que una dosis se considere aceptable según Pérez y Fernández, (2006), lo cual demuestra que todas están dentro de la norma por lo que pueden considerarse efectivas.

En la figura 3.2 se muestra la velocidad de sedimentación del jugo clarificado frente al floculante Kebofloc 402, esta es mayor que la velocidad de sedimentación del jugo alcalizado o blanco para todas las dosis empleadas y a su vez menor que las logradas por el floculante Quimifloc 400 (ver figura 3.1); no obstante este floculante posee una mayor estabilidad en su comportamiento

ya que la velocidad de sedimentación para cada dosis se mantuvo alrededor de un valor lógico durante el tiempo en estudio a pesar de la variabilidad de la composición de los jugos que entran a fábrica.

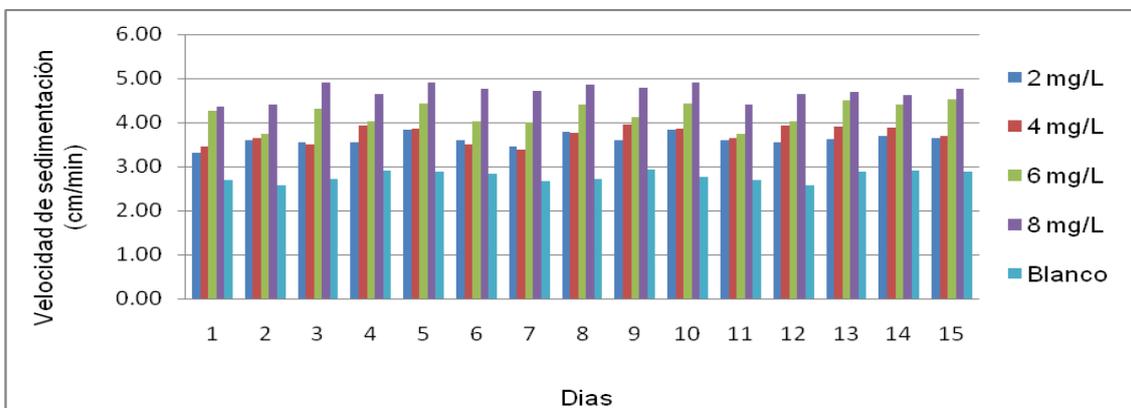


Figura 3.2. Comportamiento de la velocidad de sedimentación del floculante Kebofloc 402.

En correspondencia con lo planteado por Pérez y Fernández, (2006) se demuestra que para las dosis de 2 mg/L y 4 mg/L no se cumple con la norma de calidad establecida (≥ 4 cm/min) debido a que presentan velocidades de sedimentación de 3,61 cm/min y 3,72 cm/min por lo que pueden descartarse como dosis de poca efectividad. Las dosis consideradas como efectivas son 6 mg/L y 8 mg/L porque tienen velocidades de sedimentación que cumplen con la norma establecida (4,20 cm/min y 4,69 cm/min), se destaca la dosis de 8 mg/L como la de mayor garantía al mostrar la mayor velocidad alcanzada por el floculante Kebofloc 402.

En la figura 3.3 se pudo observar que la estabilidad en el comportamiento del floculante Zukerfloc 400 C Plus es mucho mejor que la reportada por los floculantes Quimifloc 400 y Kebofloc 402 (ver figuras 3.1 y 3.2), lo cual demuestra que a pesar de la variabilidad de la composición de los jugos que entran a fábrica este floculante tiene características que hacen que su velocidad de sedimentación para las diferentes dosis se mantenga alrededor de un valor lógico y en un orden creciente a medida que aumenta la dosis de floculante. La velocidad de sedimentación del jugo clarificado con la utilización del floculante Zukerfloc 400 C Plus es mayor que la velocidad de sedimentación del jugo alcalizado o blanco y que las alcanzadas por el floculante Kebofloc 402 (ver figura 3.2) para todas las dosis empleadas y a su vez menor que las logradas por el floculante Quimifloc 400 (ver figura 3.1).

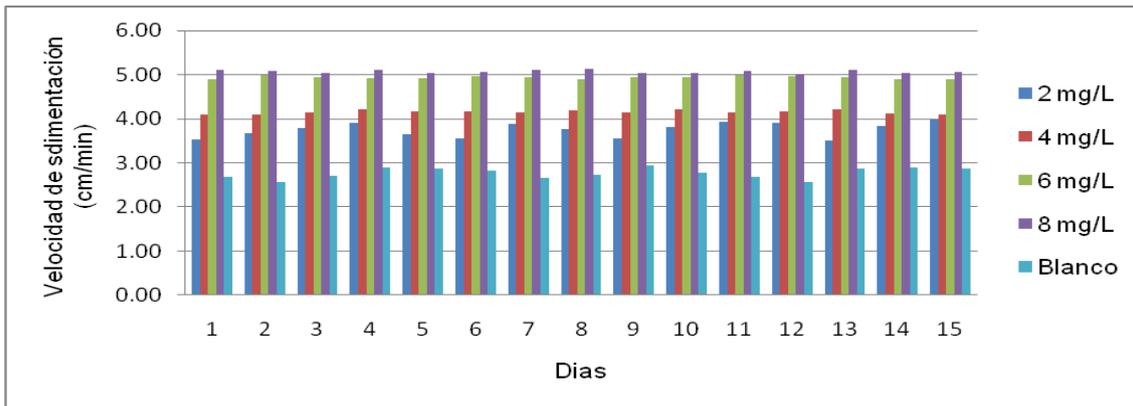


Figura 3.3. Comportamiento de la velocidad de sedimentación del floculante Zukerfloc 402.

Se muestra en dicha figura que las dosis correspondientes a los 4 mg/L, 6 mg/L y 8 mg/L, poseen una velocidad de sedimentación ≥ 4 cm/min (4,15 cm/min, 4,93 cm/min y 5,07 cm/min), por ser estas las dosis más efectivas de las cuatro utilizadas, donde 8 mg/L es la que representa la mayor velocidad de sedimentación y por tanto se convierte en la dosis de mayor efectividad. La dosis de 2 mg/L no cumple con la norma establecida por presentar una velocidad de sedimentación de 3,75 cm/min, por tanto queda exenta a tener en cuenta.

De todo lo expuesto anteriormente se puede afirmar que los floculantes Quimifloc 400 y el Zukerfloc 400 C Plus son los que reportan mayores velocidades de sedimentación. Para el Quimifloc 400 pueden resultar efectivas todas las dosis empleadas mientras que para el Zukerfloc 400 C Plus se obtendrían velocidades aceptables cuando se emplee 4 mg/L, 6 mg/L y 8 mg/L de floculante. El floculante Kebofloc 402 muestra resultados inferiores con respecto a los dos restantes porque sus dosis más efectivas (6 mg/L y 8 mg/L) no exceden los 5 cm/min.

3.2.1.1 Análisis estadístico para velocidad de sedimentación

Para determinar qué factores tienen un efecto significativo sobre las variables de respuesta analizadas, se realiza un análisis de varianza y se evalúa también la significancia de las interacciones entre los factores.

En la tabla 3.2 se refleja que tienen un efecto significativo con un 95 % de confianza sobre la velocidad de sedimentación, los días, el tipo de floculante y

la concentración de los floculantes, además las interacciones entre el tipo de floculante con los días y con la concentración de floculante.

Tabla 3.2. Análisis de varianza para velocidad de sedimentación (cm/min).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A:Días	0,38	14	0,02	2,13	0,01
B:Floculante	2,36	2	14,18	1112,48	0,00
C:Concentración Floculante (mg/L)	29,74	3	9,91	777,60	0,00
Interacciones					
AB	1,13	28	0,04	3,17	0,00
AC	0,61	42	0,01	1,14	0,30
BC	7,19	6	1,19	93,99	0,00
Residuos	1,07	84	0,01		
Total (corregido)	68,49	179			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual.

En la figura 3.4 y 3.5 se muestran los gráficos de interacción. De la figura 3.4 se infiere que el floculante Kebofloc 402 (2) tiene menor velocidad de sedimentación independientemente de la concentración a la que se aplique. Además el floculante Quimifloc 400 (1) logra las mejores velocidad de sedimentación, siendo la más alta a concentraciones de 4 mg/L y 8 mg/L. Para el floculante Zukerfloc 400 C (3) Plus la mayor velocidad de sedimentación se alcanza a 6 mg/L y 8 mg/L.

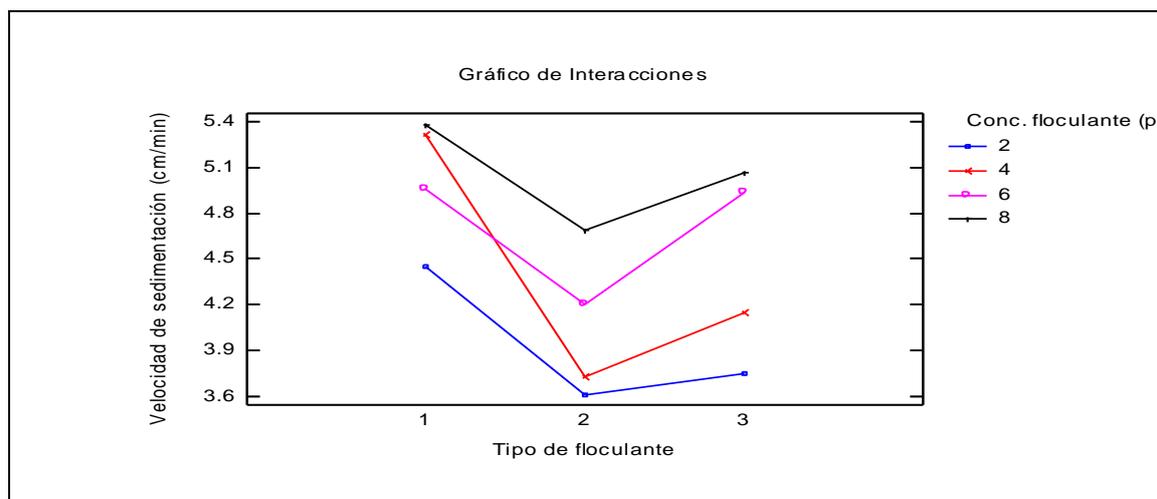


Figura 3.4. Interacción de los días con tipo de floculante según la velocidad de sedimentación, (una concentración de 1 ppm equivale a 1 mg/L).

En la figura 3.5 se observa que el floculante Quimifloc 400 tiene mayor velocidad de sedimentación y que la variabilidad de los floculantes Quimifloc 400 y Zukerfloc 400 C Plus es menor entre los días comparados con el floculante Kebofloc 402, por lo que dicho floculante es más inseguro frente a la inestabilidad de la materia prima la cual se refleja por los días.

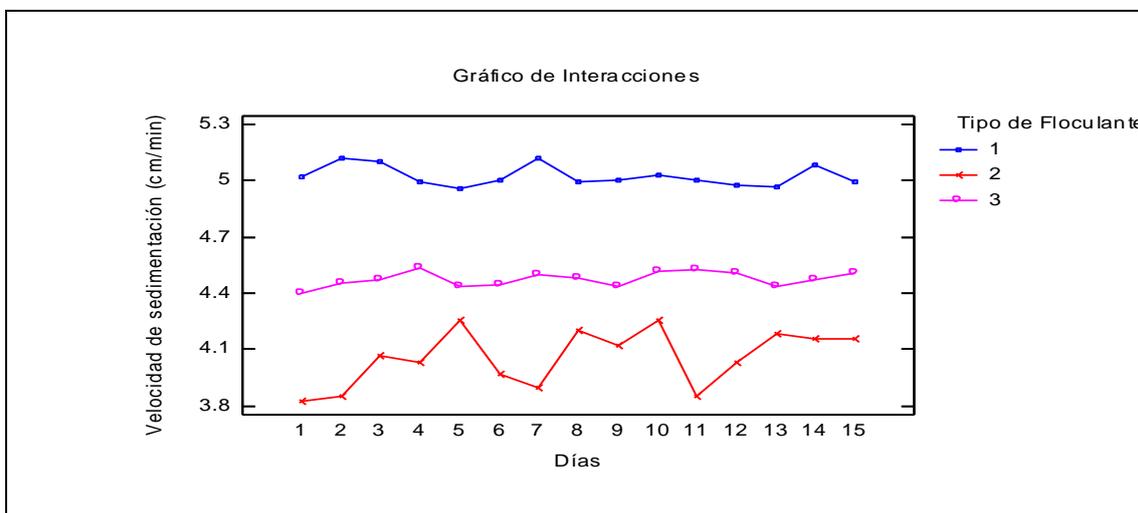


Figura 3.5. Interacción entre el tipo de floculante y la concentración aplicada según la velocidad de sedimentación.

Prueba de comparación múltiple (prueba de Duncan)

En las tablas 3.3, 3.4 y 3.5 se muestran la prueba de Duncan para la velocidad de sedimentación por tipo de floculante, concentración de floculante y por días. De la tabla 3.3 se infiere que existen diferencias significativas entre los tres tipos de floculante en cuanto a la velocidad de sedimentación y que el floculante Quimifloc 400 posee como media la mayor velocidad de sedimentación.

Tabla 3.3. Pruebas de múltiples rangos para velocidad sedimentación por floculante.

Floculante	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
2	60	4,05	0,014	X
3	60	4,47	0,014	X
1	60	5,02	0,014	X

En la tabla 3.4 se muestra que existen diferencias significativas entre las concentraciones de aplicación de los floculantes y la velocidad de sedimentación y que como promedio a medida que se aumenta la concentración de floculante, aumenta la velocidad de sedimentación.

Tabla 3.4. Pruebas de múltiple rangos para velocidad de sedimentación por concentración floculante.

Concentración Floculante	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
2 mg/L	45	3,93	0,016	X
4 mg/L	45	4,39	0,016	X
6 mg/L	45	4,69	0,016	X
8 mg/L	45	5,04	0,016	X

La tabla 3.5 revela que existen diferencias significativas entre la velocidad de sedimentación respecto a los días, ya que los días reflejan la variación en la calidad de la materia prima y por lo tanto se refleja una diferenciación significativa en la velocidad de sedimentación.

Tabla 3.5. Pruebas de múltiples rangos para velocidad de sedimentación por días.

Días	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
1	12	4,42	0,033	X
11	12	4,46	0,033	XX
2	12	4,47	0,033	XXX
6	12	4,48	0,033	XXX
7	12	4,50	0,033	XXXX
12	12	4,51	0,033	XXXX
4	12	4,52	0,033	XXXX
9	12	4,52	0,033	XXXX
13	12	4,53	0,033	XXX
3	12	4,55	0,033	XXX
15	12	4,55	0,033	XXX
5	12	4,55	0,033	XXX
8	12	4,56	0,033	XXX
14	12	4,57	0,033	XX
10	12	4,61	0,033	X

Estimación por intervalo de confianza.

La tabla 3.6 muestra la estimación por intervalo de confianza de los valores promedios de velocidad de sedimentación para cada tipo de floculante y a las diferentes concentraciones de aplicación. Se infiere que para el floculante Quimifloc 400 independientemente de la concentración, siempre se alcanza valores de velocidad de sedimentación buenos, mientras que para el floculante Kebofloc 402 es necesario ir a concentraciones de 6 mg/L y 8 mg/L para tener valores de velocidad de sedimentación superiores a 4 cm/min. Para el floculante Zukerfloc 400 C Plus con valores de concentración de floculante superiores o iguales a 4 mg/L se obtienen velocidades de sedimentación catalogadas como buenas.

Tabla 3.6. Estimación por intervalo de confianza al 95 % de valores de velocidad de sedimentación para cada tipo de floculante a las diferentes concentraciones.

Floculante por Concentración (mg/L)	Velocidad de Sed. Media	Error Estándar	LIC	LSC
1,2	4,45	0,029	4,39	4,51
1,4	5,31	0,029	5,26	5,37
1,6	4,96	0,029	4,90	5,02
1,8	5,38	0,029	5,32	5,43
2,2	3,61	0,029	3,55	3,67
2,4	3,72	0,029	3,67	3,78
2,6	4,20	0,029	4,14	4,28
2,8	4,69	0,029	4,63	4,75
3,2	3,75	0,029	3,69	3,81
3,4	4,15	0,029	4,09	4,21
3,6	4,93	0,029	4,88	4,99
3,8	5,07	0,029	5,01	5,13

3.2.2 Porcentaje de turbidez y porcentaje de remoción de turbidez

El porcentaje de turbidez del jugo clarificado es un parámetro de calidad clave en el proceso de clarificación, el mismo demuestra cuán efectiva es la dosis de floculante empleada ya que dicho parámetro está estrechamente relacionado

con el contenido de impurezas presente en el jugo alcalizado; de ahí que una alta remoción de este parámetro nos da idea de la cantidad de impurezas que es capaz de remover un floculante.

En la figura 3.6, se observa que el porcentaje de turbidez del jugo clarificado obtenido después de un proceso de clarificación con Quimifloc 400, para todas las dosis empleadas fue menor que la norma establecida para este parámetro (25%) durante los quince días en estudio. Este parámetro al igual que la velocidad de sedimentación se comporto inestable a concentraciones de 6 mg/L. Por otra parte este floculante tiene un comportamiento estable ya que el porcentaje de turbidez para cada dosis se mantiene alrededor de un valor lógico durante el tiempo en estudio a pesar de la inestabilidad de la materia prima que entra a fábrica.

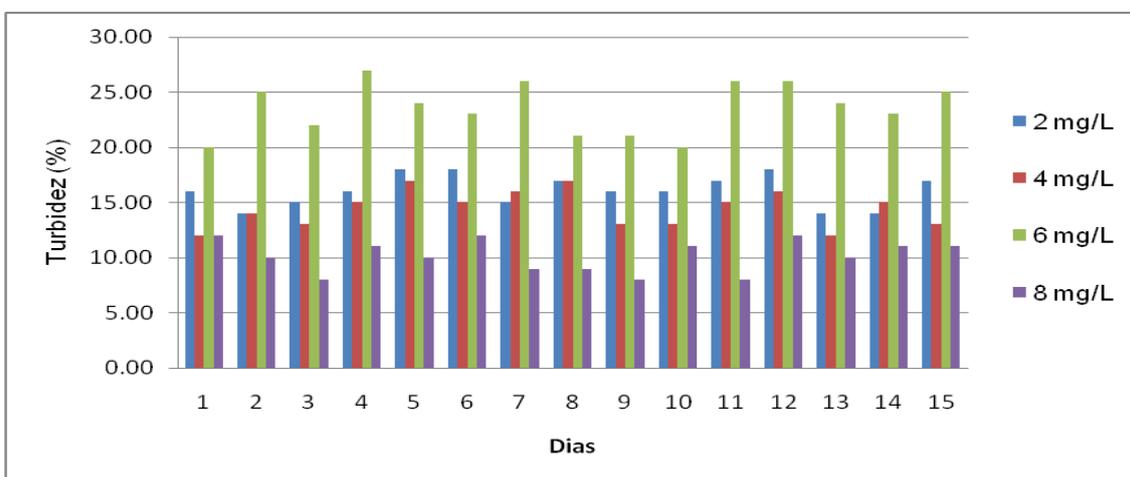


Figura 3.6. Comportamiento del porcentaje de turbidez del floculante Quimifloc 400.

Se observa en la figura anterior inestabilidad en el comportamiento del porcentaje de turbidez ya que para una concentración de 6 mg/L aumenta la turbidez mientras que a las concentraciones de 2, 4 y 8 mg/L al aumentar la dosis disminuye la misma, comportamiento este dado por la disminución en la velocidad de sedimentación que ocurre a esta concentración. Los menores valores de turbidez se obtienen a las dosis de 4 mg/L y 8 mg/L, es de destacar que todos los valores de porcentaje de turbidez se encuentran por debajo de la norma establecida para este parámetro ($\leq 25\%$).

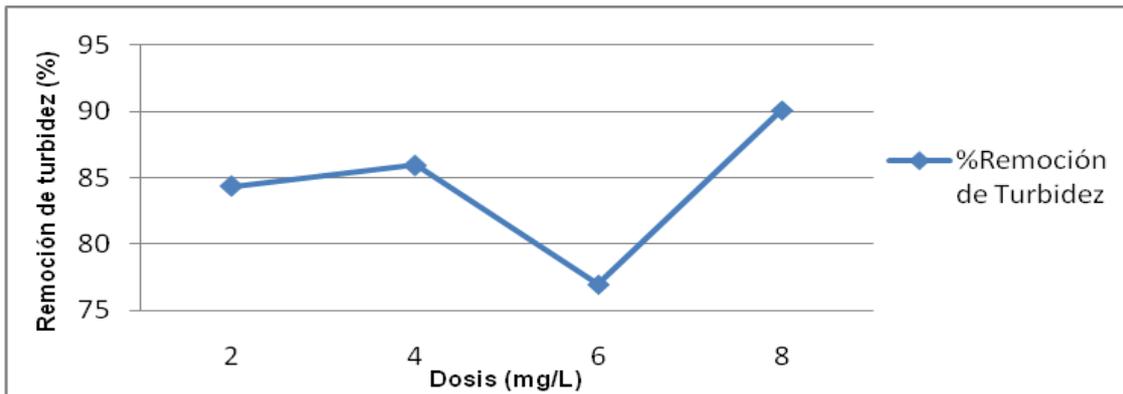


Figura 3.7. Porcentaje de remoción de turbidez promedio para las dosis empleadas de flocculante Quimifloc 400.

La figura anterior muestra que el flocculante Quimifloc 400 para todas las dosis presenta un porcentaje de remoción de turbidez mayor del 70%, valor que esta normado para este parámetro, por ser la dosis de 6 mg/L la que presenta una menor remoción debido a que es la que menor velocidad de sedimentación logra y por ende una mayor cantidad de impurezas remueve. Por otra parte a 8 mg/L se logra una mayor velocidad de sedimentación y como resultado una mayor remoción de las impurezas presentes en el jugo.

En la figura 3.8 se observa que el porcentaje de turbidez del jugo clarificado con el uso del flocculante Kebofloc 402, para todas las dosis empleadas fue mayor que la norma establecida para este parámetro ($\leq 25\%$) durante los quince días en estudio. Este parámetro al igual que la velocidad de sedimentación se comporta estable a todas las concentraciones, aunque cabe destacar que ambos parámetros no cumplen con las normas establecidas.

En la figura se puede observar la irregularidad que existe en el comportamiento de este parámetro a las diferentes dosis, ya que a 2 mg/L es donde se encuentra el menor porcentaje de turbidez (30,47 %), sin embargo para este flocculante es a esa dosis a la que se obtiene la menor velocidad de sedimentación. Las dosis restantes mantienen un comportamiento decreciente del porcentaje de turbidez lo cual concuerda con el comportamiento de sus velocidades de sedimentación, por ser los 8 mg/L la dosis que presenta el valor más bajo (42,40 %). En correspondencia con lo planteado por Pérez y Fernández, (2006) ninguna dosis cumple con la norma establecida ($\leq 25\%$).

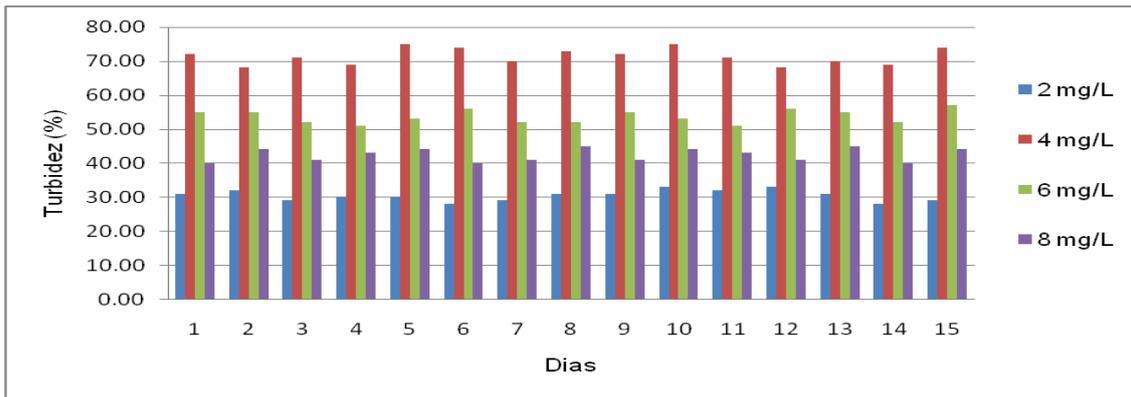


Figura 3.8. Comportamiento del porcentaje de turbidez del floculante Kebofloc 402.

El comportamiento irregular del floculante Kebofloc 402 trae consigo que la menor dosis remueva la mayor cantidad de impurezas presentes en el jugo, esta muestra el valor más elevado de remoción (70,25 cm/min), ya que como se menciona anteriormente posee el menor porcentaje de turbidez. A pesar de este comportamiento la efectividad del floculante viene dada por ser 2 mg/L la única dosis que se encuentra bajo norma (Figura 3.9).

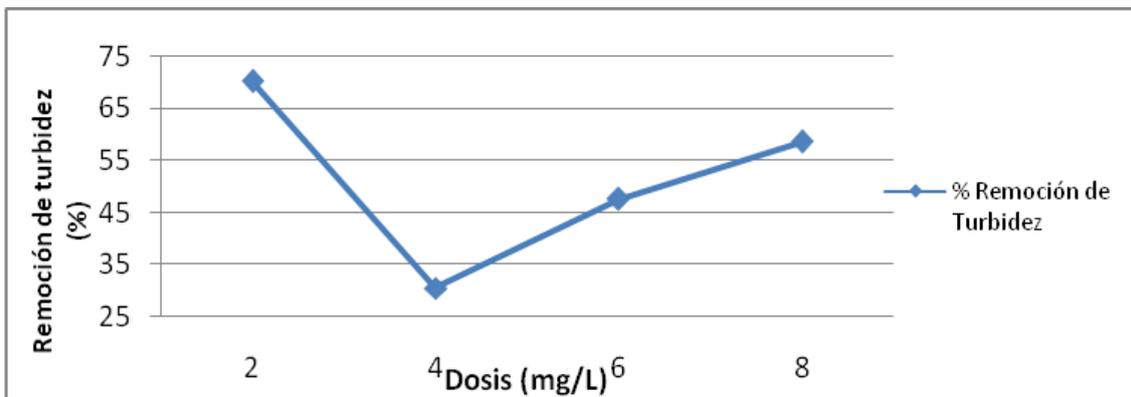


Figura 3.9. Porcentaje de remoción de turbidez promedio para las dosis empleadas de floculante Kebofloc 402.

En la figura 3.10 se muestra que la utilización del floculante Zukerfloc 400 C Plus mantiene un comportamiento estable del porcentaje de turbidez del jugo clarificado para todas las dosis empleadas durante los quince días de estudio, esto se debe al comportamiento creciente de la velocidad de sedimentación, lo que permite que para todas las dosis este parámetro se encuentre dentro de la norma establecida ($\leq 25\%$).

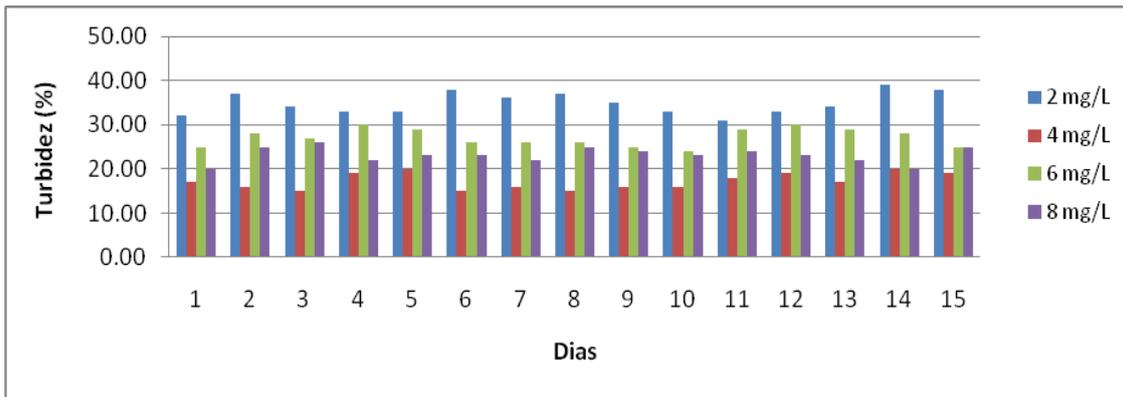


Figura 3.10. Comportamiento del porcentaje de turbidez del floculante Zukerfloc 400 C Plus.

En dicha figura existe un comportamiento regular del porcentaje de turbidez porque al aumentar la dosis disminuye la turbidez del jugo lo cual demuestra la efectividad del floculante con respecto al comportamiento de los demás. A pesar de que existe este comportamiento solamente las dosis de 6 mg/L y 8 mg/L cumplen con la norma (23,13% y 17,20%), donde se destaca 8mg/L por reportar el menor valor de porcentaje de turbidez.

En la figura 3.11 se observa el comportamiento lógico que presenta la remoción de turbidez para el floculante Zukerfloc 400 C Plus con respecto a las dosis aplicadas ya que a mayores concentraciones ocurre un incremento considerable de remoción; es de destacar que solamente las concentraciones (4 mg/L, 6 mg/L y 8 mg/L) pueden considerarse efectivas al cumplir con la norma ($\geq 70\%$). Se destaca la concentración de 8 mg/L por reportar el valor más alto de remoción (83,16 %) y la concentración de 2 mg/L queda fuera de toda posibilidad por tener un valor promedio de 65,98 %.

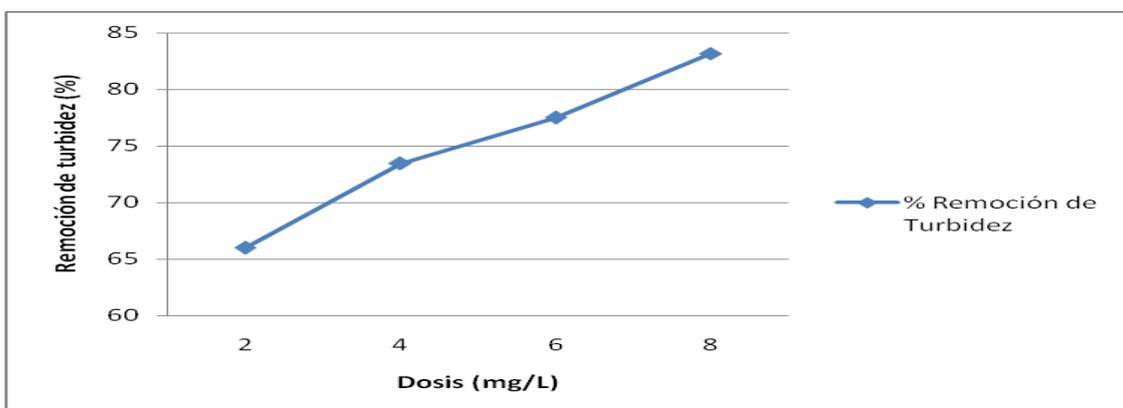


Figura 3.11. Porcentaje de remoción de turbidez promedio para las dosis empleadas de floculante Zukerfloc 400 C Plus.

3.2.2.1 Análisis estadístico para el porcentaje de turbidez

Tabla 3.7. Análisis de Varianza para el porcentaje de turbidez.

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A:Días	66,11	14	4,72	1,15	0,33
B:Floculante	35616,7	2	17808,4	4323,42	0,00
C:Concentración Floculante (mg/L)	5562,87	3	1854,29	450,17	0,00
Interacciones					
AB	113,42	28	4,05	0,98	0,50
AC	98,467	42	2,34	0,57	0,98
BC	11983,2	6	1997,19	484,87	0,00
Residuos	346,0	84	4,12		
Total (corregido)	53786,8	179			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual.

En la tabla 3.7 se manifiesta el análisis de varianza para determinar que factores tienen un efecto significativo, con un 95 % de confianza, sobre el porcentaje de turbidez y se evalúa la significancia de las interacciones entre los factores. Se infiere que el tipo de floculante y la concentración a la que se aplica, así como la interacción del tipo de floculante y la concentración, tienen un efecto significativo sobre el porcentaje de turbidez.

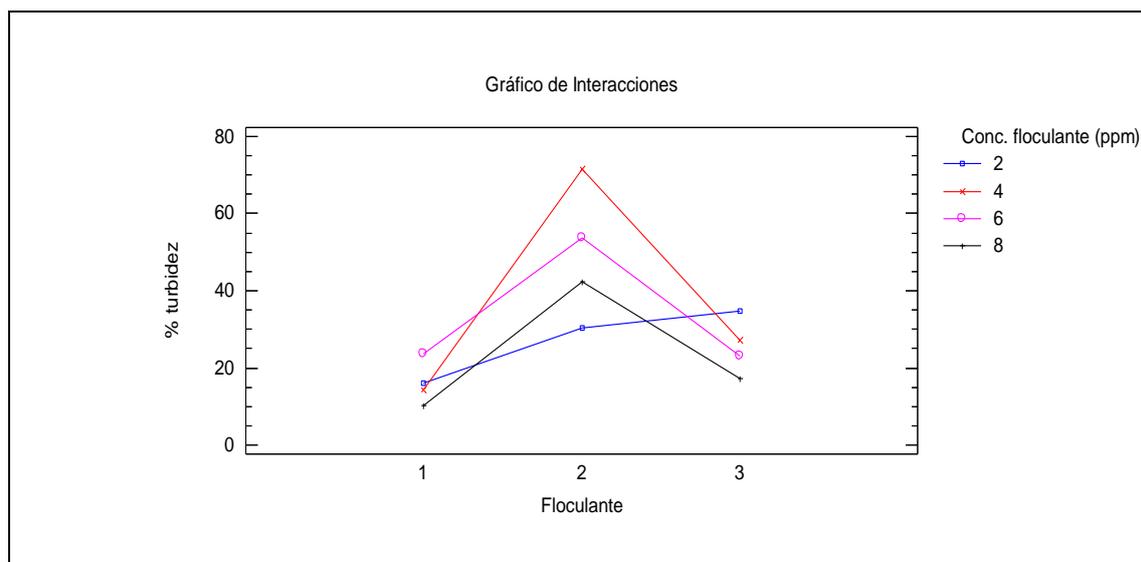


Figura 3.12. Interacción entre el tipo de floculante y la concentración aplicada según el porcentaje de turbidez.

La figura 3.12 muestra la interacción entre el tipo de floculante y la concentración con respecto al porcentaje de turbidez y se aprecia que los mayores porcentajes de turbidez se obtienen con el floculante Kebofloc 402 excepto a 2 mg/L. Los menores porcentajes de turbidez se obtienen con el floculante Quimifloc 400, por ser a concentraciones de 4 y 8 mg/L a las que se obtiene menor porcentaje de turbidez para este floculante.

Prueba de comparación múltiple (prueba de Duncan)

En las tablas 3.8 y 3.9 se muestran la prueba de Duncan para el porcentaje de turbidez por concentración de floculante y tipo de floculante. Se aprecia que existen diferencias significativas entre el porcentaje de turbidez y la concentración de los floculantes, así como el tipo de floculante. Los mejores porcentajes de turbidez se obtienen como media para el floculante Quimifloc 400, se tiene para el floculante Kebofloc 402 los valores de turbidez como media más altos.

Tabla 3.8. Pruebas de múltiple rangos para porcentaje de turbidez por concentración de floculante.

Concentración Floculante	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
8 mg/L	45	23,27	0,30	X
2 mg/L	45	27,16	0,30	X
6 mg/L	45	33,47	0,30	X
4 mg/L	45	37,67	0,30	X

Tabla 3.9. Pruebas de múltiple rangos para porcentaje de turbidez por tipo de floculante.

Floculante	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
1	60	16,05	0,26	X
3	60	25,62	0,26	X
2	60	49,5	0,26	X

Estimación por intervalo de confianza

En la tabla 3.10 se muestra la estimación por intervalo de confianza de los valores promedios de porcentaje de turbidez para cada tipo de floculante y a las diferentes concentraciones de aplicación. Se relaciona que para el floculante Quimifloc 400 independientemente de la concentración a la que se aplique los valores promedios de porcentaje de turbidez son buenos, mientras que para el floculante Kebofloc 402 no se obtiene valores de buenos para porcentaje de turbidez y los valores obtenidos entran en la categoría de aceptable solamente para 2, 6 y 8 mg/L. Para el floculante Zukerfloc 400 C Plus los valores buenos en porcentaje de turbidez, se obtienen para 6 y 8 mg/L de concentración de floculante.

Tabla 3.10. Estimación por intervalo de confianza al 95 % de valores de porcentaje de turbidez para cada tipo de floculante a las diferentes concentraciones.

Floculante por Concentración (mg/L)	Porcentaje de turbidez Media	Error Est.	LIC	LSC
1,2	16,13	0,52	15,09	17,18
1,4	14,4	0,52	13,36	15,44
1,6	23,53	0,52	22,49	24,58
1,8	10,13	0,52	9,09	11,18
2,2	30,47	0,52	29,42	31,51
2,4	71,47	0,52	70,42	72,51
2,6	53,67	0,52	52,62	54,71
2,8	42,4	0,52	41,36	43,44
3,2	34,87	0,52	33,82	35,91
3,4	27,13	0,52	26,09	28,18
3,6	23,2	0,52	22,16	24,24
3,8	17,27	0,52	16,22	18,31

3.2.3 Porcentaje de compactación de lodos

En la clarificación del jugo conviene obtener los lodos lo más compactos posible con el fin de facilitar su filtración y así recuperar la mayor cantidad posible de sacarosa durante el proceso de filtración de cachaza.

Para que una dosis de floculante arroje resultados favorables de compactación de lodos debe cumplir que los mismos sean $\leq 30\%$ según lo reportado por Pérez y Fernández, (2006). Las figuras 3.13, 3.14 y 3.15 muestran que para todas las dosis empleadas durante los quince días se cumple con lo planteado anteriormente. Todas las dosis se mantienen alrededor de un valor determinado de porcentaje de compactación de lodos propio, esto demuestra estabilidad en el comportamiento de las mismas.

El análisis del porcentaje de compactación de lodos es muy complejo porque a la fábrica entra constantemente materia prima con características diferentes que abarcan desde la variedad de la caña hasta la cantidad de materia extraña. Es por eso que unos jugos presentan mayor conjunto de impurezas que otros, a la hora de determinar la compactación de lodos hay que tener en cuenta este factor y no obviar que las menores dosis arrastran consigo menor cantidad de impurezas por eso va a ser depositado en el fondo de la probeta un porcentaje de lodos más pequeño con respecto a los demás. Por todo lo anteriormente expuesto es necesario analizar la compactación teniendo en cuenta el porcentaje de turbidez del jugo clarificado para las diferentes dosis.

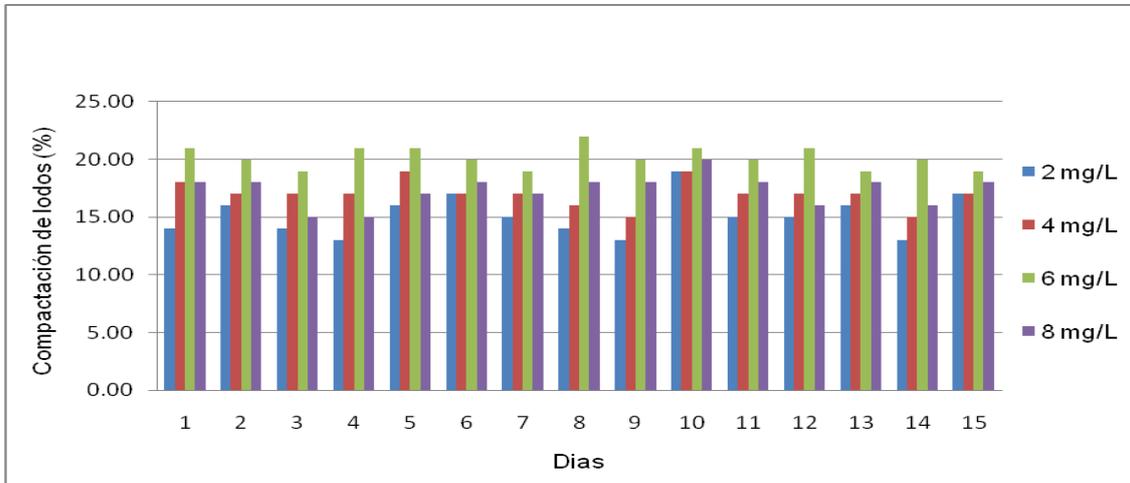


Figura 3.13. Comportamiento del porcentaje de compactación de lodos del floculante Quimifloc 400.

En la figura 3.13 se observa que las dosis empleadas de floculante Quimifloc 400 cumplen con la norma de calidad ($\leq 30\%$) de acuerdo. El mejor resultado se obtiene cuando se aplica 2 mg/L (16,07 %); a concentraciones de 4 mg/L y 8 mg/L se alcanzan resultados similares en cuanto a este parámetro, además a estas concentraciones se obtienen velocidades de sedimentación y remoción de turbidez aceptables; por el contrario a 6 mg/L los valores de porcentaje de

compactación de lodos son los más elevados, esto se debe a la baja velocidad de sedimentación que se logra al aplicar esta concentración.

En la figura 3.14 se muestra que el comportamiento del porcentaje de compactación de lodos del floculante Kebofloc 402 es muy similar al del Quimifloc 400 debido a que la menor dosis brinda el mejor valor de compactación, mientras que las dosis de 2 mg/L, 4 mg/L y 8 mg/L resultan ser las que mejores resultados brindan. Al igual que para el floculante Quimifloc 400 la concentración de 6 mg/L reporta los valores más elevados lo que provoca que esta dosis no cumpla con la norma requerida para este parámetro ($\leq 30\%$).

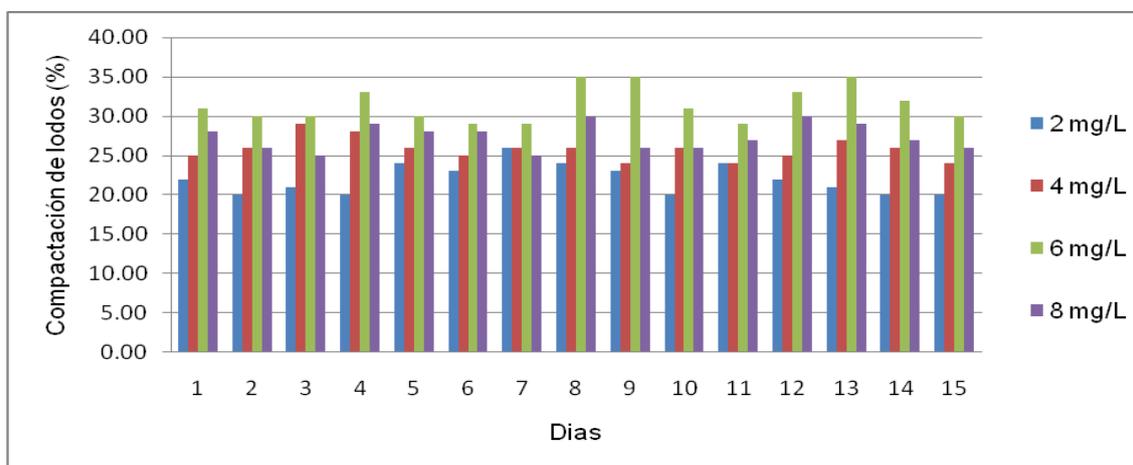


Figura 3.14. Comportamiento del porcentaje de compactación de lodos del floculante Kebofloc 402.

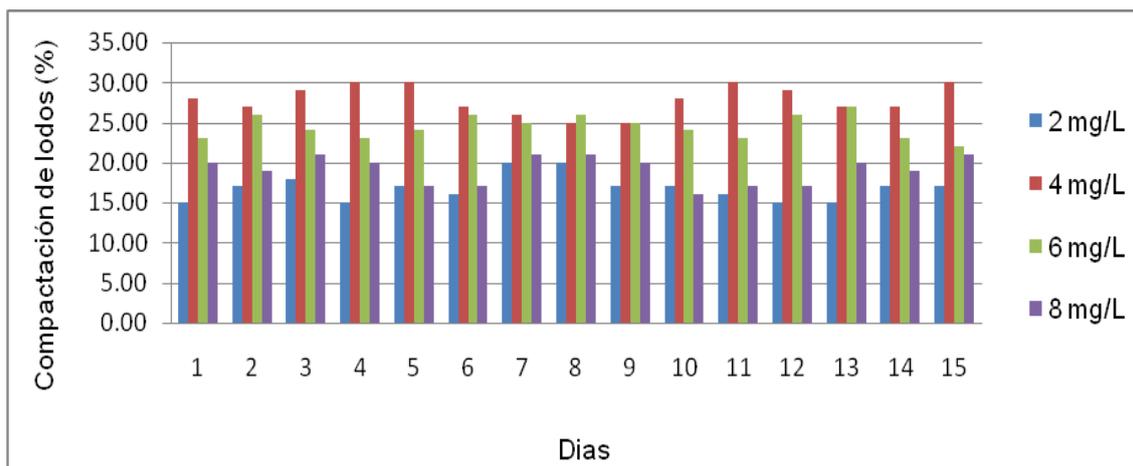


Figura 3.15. Comportamiento del porcentaje de compactación de lodos del floculante Zukerfloc 400 C Plus.

El floculante Zukerfloc 402 al igual que los otros logra la mejor compactación de lodos a la concentración de 2 mg/L, donde se alcanza un valor de 16,80%, por

lo que a esta concentración se alcanza la menor velocidad de sedimentación. Por otra parte la concentración de 4 mg/L reporta el valor más alto de porcentaje de compactación, esto se debe a que a esta concentración es donde se obtiene la mayor remoción de turbidez y por ende un mayor volumen de estas impurezas es sedimentado al fondo de la probeta. Valores aceptables se logran cuando se aplican 4 mg/L y 8 mg/L, cabe destacar que para este floculante todas las dosis en estudio cumplen con la norma establecida ($\leq 30\%$).

Los floculantes Quimifloc 400 y Kebofloc 402 tienen un comportamiento muy similar en cuanto al aumento del porcentaje de compactación hasta los 6 mg/L y la disminución que ocurre al aplicar 8 mg/L de floculante, su diferencia radica en que el Quimifloc 400 presenta la mejor compactación de lodos (15,13 %) y el Kebofloc 402 la peor (31,47 %). Las dosis que mejores resultados logran para el floculante Quimifloc 400 son 2 mg/L, 4 mg/L, 6 mg/L y 8 mg/L, al igual que para el Zukerfloc 402 C Plus, mientras que para el Kebofloc 402 son: 2 mg/L, 4 mg/L y 8 mg/L.

3.2.3.1 Análisis estadístico para porcentaje de compactación de lodos

Tabla 3.11. Análisis de Varianza para porcentaje de compactación de lodos.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A:Días	31,81	14	2,27	1,08	0,39
B:Floculante	2557,64	2	1278,82	606,10	0,00
C:Concentración Floculante (mg/L)	1375,75	3	458,58	217,35	0,00
Interacciones					
AB	91,52	28	3,27	1,55	0,065
AC	143,17	42	3,41	1,62	0,03
BC	653,6	6	108,93	51,63	0,00
Residuos	177,23	84	2,11		
Total (corregido)	5030,73	179			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

De la tabla anterior se infiere que el tipo de floculante y la concentración a la que se aplican, así como las interacciones entre el tipo de floculante y la concentración y tipo de floculante y los días, tienen un efecto significativo sobre el porcentaje de compactación con un 95 % de confianza.

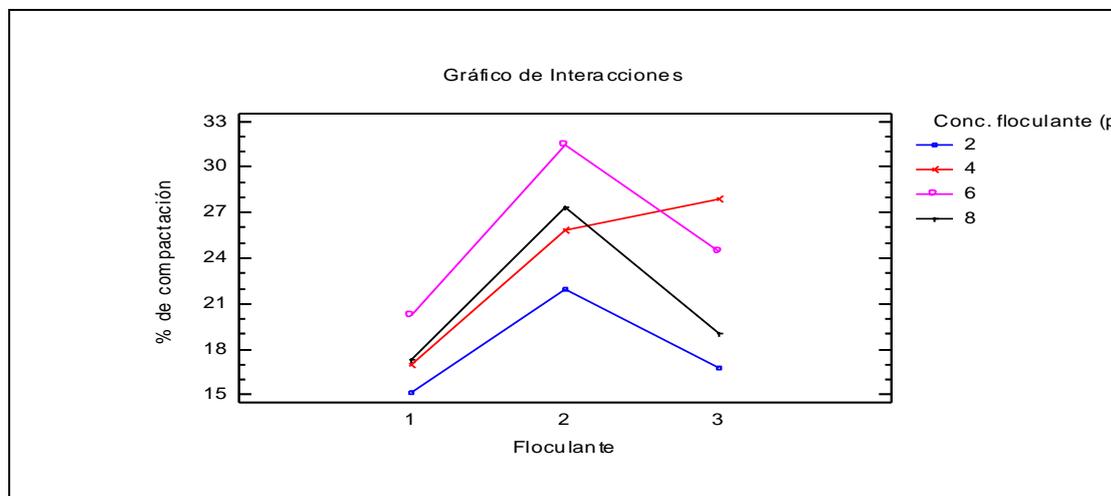


Figura 3.16. Interacción entre el tipo de floculante y la concentración aplicada según el porcentaje de compactación de lodos, (una concentración de 1 ppm equivale a 1 mg/L).

La figura 3.16 muestra la interacción entre el tipo de floculante y la concentración con respecto al porcentaje de compactación y se aprecia, que independientemente de la concentración a la cual se aplique el floculante, el floculante Quimifloc 400 tiene menor porcentaje de compactación, mientras que el floculante Kebofloc 402 posee los porcentajes de compactación más altos, excepto a concentraciones de 4 mg/L.

Prueba de comparación múltiple (prueba de Duncan)

En las tablas 3.12 y 3.13 se muestran la prueba de Duncan para el porcentaje de compactación por tipo de floculante y concentración de floculante y se aprecia que existen diferencias significativas entre el porcentaje de compactación y los tipos de floculante y la concentración a la que se aplique. En la tabla 3.12 se infiere que como media el floculante Quimifloc 400 alcanza los valores de porcentaje de compactación más bajo y de la tabla 3.13 se deduce que como media los valores de porcentaje de compactación más bajos es a la dosis de 2 mg/L de concentración de floculante.

Tabla 3.12. Pruebas de múltiple rangos para porcentaje de compactación por floculante.

Floculante	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
1	60	17,42	0,19	X
3	60	22,05	0,19	X
2	60	26,65	0,19	X

Tabla 3.13. Pruebas de múltiple rangos para porcentaje de compactación de lodos por concentración de floculante.

Concentración Floculante	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
2 mg/L	45	17,98	0,22	X
8 mg/L	45	21,24	0,22	X
4 mg/L	45	23,56	0,22	X
6 mg/L	45	25,38	0,22	X

Estimación por intervalo de confianza

Tabla 3.14. Estimación por intervalo de confianza al 95 % de valores de porcentaje de compactación de lodos para cada tipo de floculante a las diferentes concentraciones.

Floculante por Concentración floculante (mg/L)	Porcentaje de compactación Media	Error Est.	LIC	LSC
1,2	15,13	0,375	14,39	15,88
1,4	17,0	0,375	16,25	17,75
1,6	20,2	0,375	19,45	20,95
1,8	17,33	0,375	16,59	18,08
2,2	22,0	0,375	21,25	22,75
2,4	25,8	0,375	25,05	26,55
2,6	31,47	0,375	30,72	32,21
2,8	27,33	0,375	26,59	28,08
3,2	16,8	0,375	16,05	17,55
3,4	27,87	0,375	27,12	28,61
3,6	24,47	0,375	23,72	25,21
3,8	19,07	0,375	18,32	19,81

La tabla 3.14 muestra la estimación por intervalo de confianza de los valores promedios de porcentaje de compactación de lodos para cada tipo de floculante y a las diferentes concentraciones de aplicación. Se observa que los mejores valores medios de porcentaje de compactación se obtienen para el floculante Quimifloc 400, aunque los tres floculantes quedan en el rango de buenos, establecidos como premisas, para el análisis de esta variable.

3.2.4 Porcentaje de color y porcentaje de decoloración

La determinación del porcentaje de color en el jugo es de gran importancia porque nos da la medida de la brillantez del mismo, a su vez el porcentaje de decoloración es la cantidad de color que es capaz de eliminar una determinada dosis con respecto a otra o con respecto al blanco (jugo alcalizado).

En las figuras 3.17, 3.19 y 3.21 se muestra el comportamiento del porcentaje de color para cada dosis utilizada de los tres floculantes durante los quince días en estudio. Para que una dosis de floculante arroje buenos resultados debe cumplir que el porcentaje de color sea $\leq 50\%$ según lo reportado por Pérez y Fernández, (2006). Dichas figuras manifiestan que para todas las dosis empleadas se cumple con lo planteado anteriormente. Todas las dosis se mantienen alrededor de un valor determinado de porcentaje de color propio, esto demuestra estabilidad en el comportamiento de las mismas.

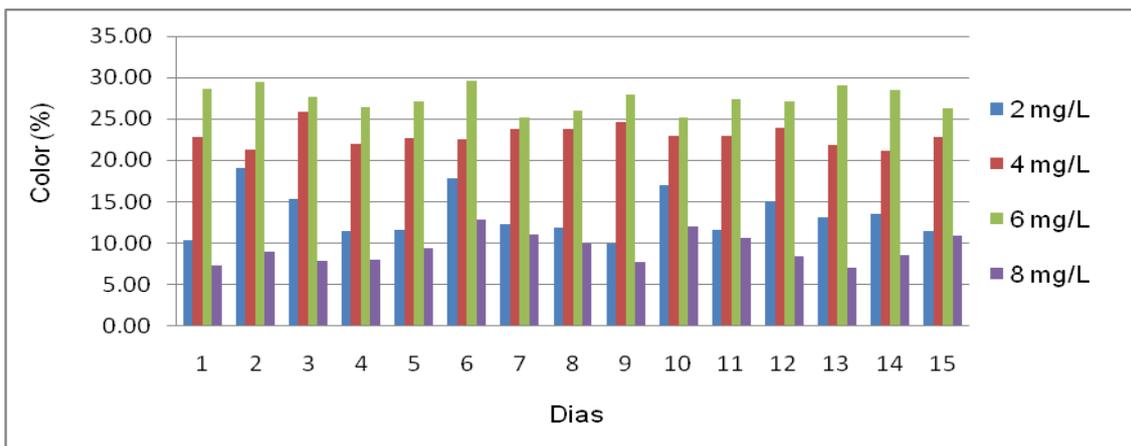


Figura 3.17. Comportamiento del porcentaje de color del floculante Quimifloc 400.

En la figura 3.17 se muestra que para el floculante Quimifloc 400 a medida que aumenta la dosis de 2 mg/L a 6 mg/L, aumenta considerablemente el color, el cual alcanza valores de (27,43 %) como máximo, mientras que al aplicar la

mayor dosis este parámetro disminuye notablemente (9,39 %). Sin embargo para todas las dosis se observa un porcentaje de color menor del 30%, esto demuestra la efectividad del floculante debido a que el mismo elimina un 20% más de lo normado.

En la figura 3.18 se observa que a medida que aumentan las dosis utilizadas de floculante Quimifloc 400 de 2 mg/L a 6 mg/L disminuye la remoción de color, mientras que cuando se aplica 8 mg/L ocurre un aumento del porcentaje de decoloración. Todas las dosis cumplen con la norma de calidad establecida (≥ 70 %). La dosis que reporta el mayor valor de porcentaje de decoloración (91,72 %) es la de 8 mg/L, por lo contrario la dosis de 6 mg/L ofrece el valor más bajo de de decoloración (75,83 %).

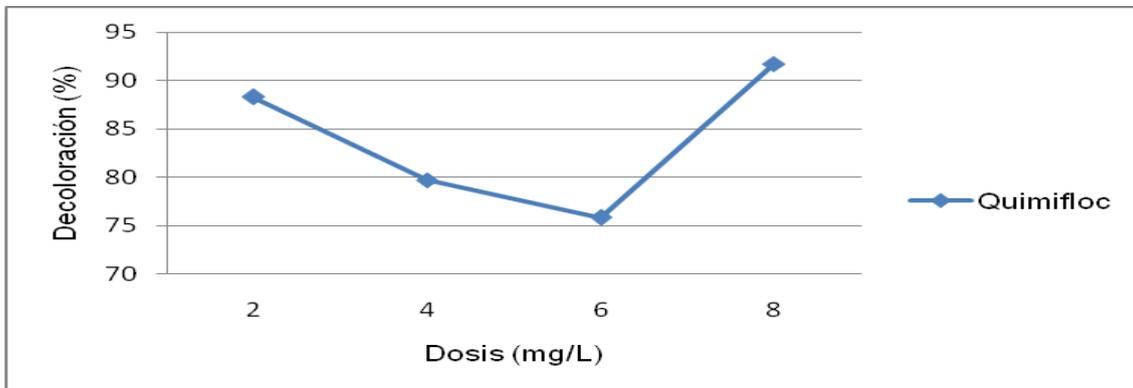


Figura 3.18. Porcentaje de decoloración promedio para las dosis empleadas de floculante Quimifloc 400.

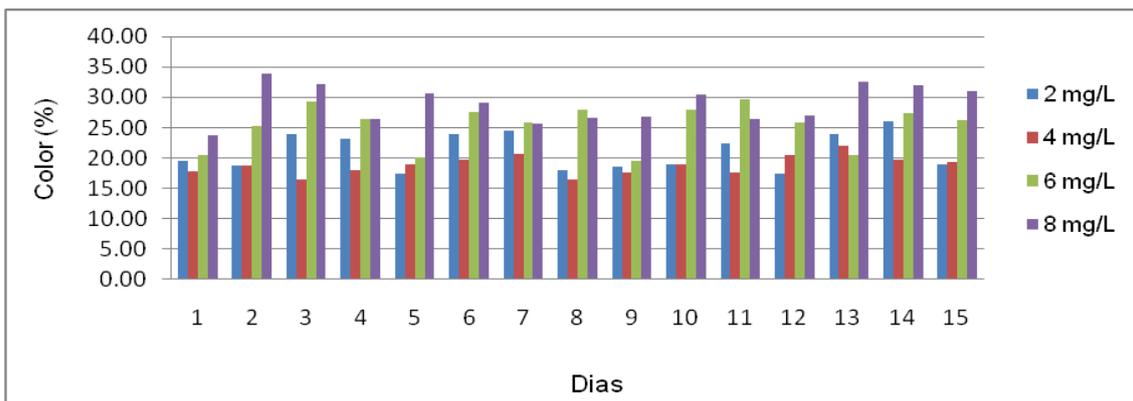


Figura 3.19. Comportamiento del porcentaje de color del floculante Kebofloc 402.

En la figura 3.19 se observa el comportamiento del floculante Kebofloc 402 para todas las dosis empleadas, las mismas cumplen con la norma de calidad establecida (≤ 50 %), sin embargo estas muestran valores superiores a los que reporta la utilización del floculante Quimifloc 400. Para este floculante

generalmente aumenta el color al crecer las dosis, esta vez es la dosis de 4 mg/L la que se destaca como la más efectiva al mostrar el menor valor de color (18,85 %) y 8 mg/L tiene el resultado más alto (28,94 %), lo cual la convierte en la que peor resultado brinda.

Para el floculante Kebofloc 402 todas las dosis aplicadas cumplen con la norma establecida (≥ 70 %). Este floculante tiene un comportamiento decreciente del porcentaje de decoloración cuando se aplica 2 mg/L, 6 mg/L y 8 mg/L. A la concentración de 4 mg/L se reporta el valor más elevado de decoloración (83,33 %) y a 8 mg/L se obtiene el menor valor (74,66 %).

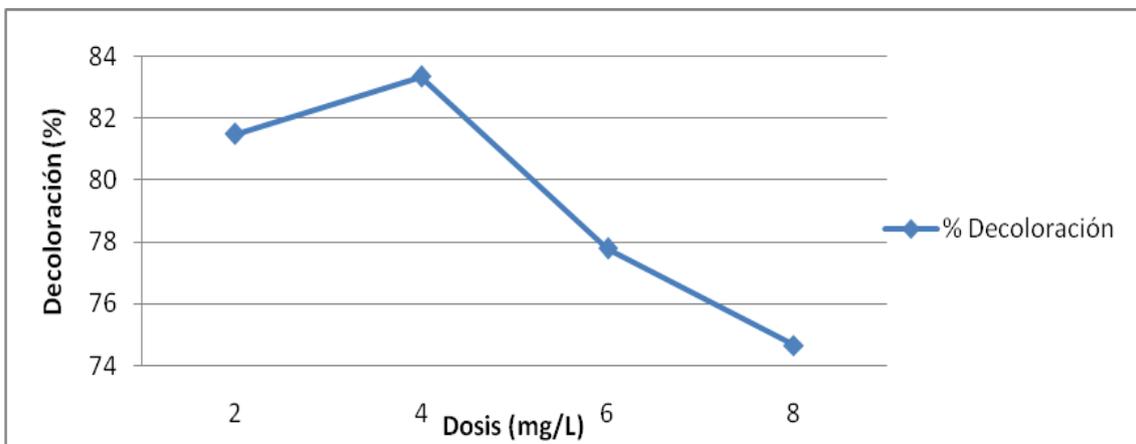


Figura 3.20. Porcentaje de decoloración promedio para las dosis empleadas de floculante Kebofloc 402.

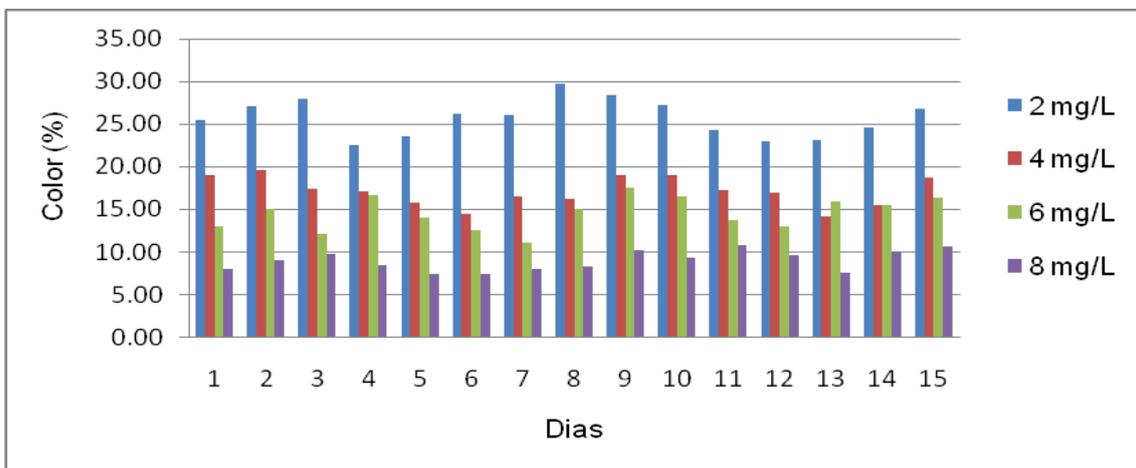


Figura 3.21. Comportamiento del porcentaje de color del floculante Zukerfloc 400 C Plus.

La figura 3.21 muestra un comportamiento diferente con respecto al comportamiento de los restantes floculantes, pues con el aumento de las dosis disminuye notablemente el color. Todas las dosis utilizadas cumplen con la norma de calidad establecida (≤ 50 %), por lo que se demuestra la efectividad

de las mismas. Los mejores valores lo aportan 6 mg/L y 8 mg/L (14,50 % y 8,89 %), por otra parte la concentración de 2 mg/L resulta ser la que propone el valor más alto (25,71 %), lo que la convierte en la que peor resultado ofrece. La figura 3.22 muestra un comportamiento creciente del porcentaje de decoloración ante el aumento de las dosis aplicadas de floculante Zukerfloc 400 C Plus, las mismas cumplen con la norma establecida (≥ 70 %) lo que demuestra la efectividad de dicho floculante. A la concentración de 2 mg/L se observa el menor valor de decoloración (77,39 %), por lo contrario a 8 mg/L se presenta el mejor resultado con un valor de 92,16 %.

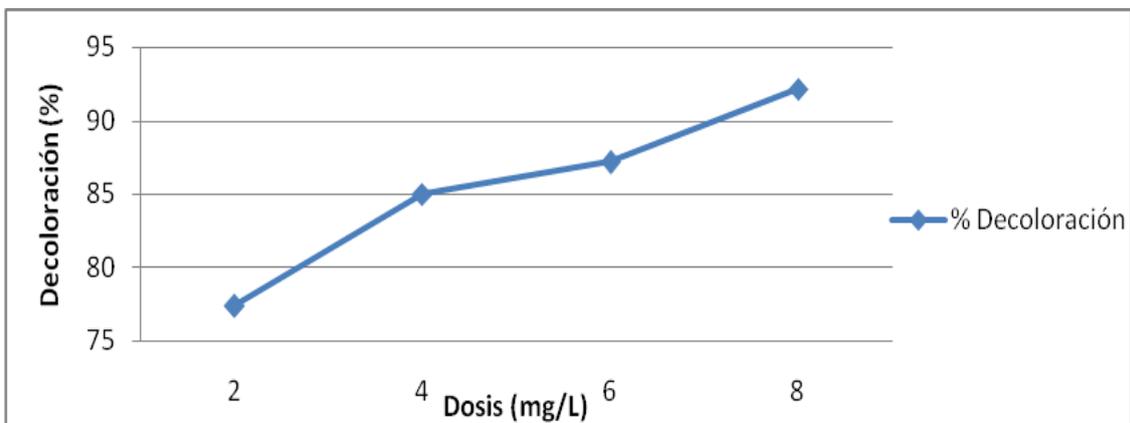


Figura 3.22. Porcentaje de decoloración promedio para las dosis empleadas de floculante Kebofloc 402.

3.3 Análisis Costo – Beneficio

A partir del análisis costo-beneficio se obtiene la dosis de cada floculante que mejores resultados ofrece al menor costo posible, esta debe cumplir con la mayor cantidad de normas de calidad para corroborar su efectividad y debe proporcionar un ahorro económico favorable con respecto a las demás.

Se tiene en cuenta que los parámetros de calidad del jugo clarificado que más influyen en la determinación de la eficiencia de una dosis de floculante establecida son: velocidad de sedimentación, compactación de lodos, porcentaje de remoción de turbidez del jugo y porcentaje de remoción de color, los cuales se toman como los parámetros significativos para el análisis costo-beneficio.

Los valores normados para que los parámetros de calidad se consideren con un comportamiento aceptable según Pérez y Fernández, (2006) son los siguientes:

1. Velocidad de sedimentación ≥ 4 cm/min.
2. Porcentaje de compactación de lodos $\leq 30\%$.
3. Porcentaje de remoción de turbidez $\geq 70\%$.
4. Porcentaje de remoción de color $\geq 70\%$.

De los parámetros mencionados anteriormente el de mayor importancia es la velocidad de sedimentación, ya que el uso de clarificadores de bajo tiempo de retención necesita de floculantes que en un menor tiempo logre sedimentar la mayor cantidad de impurezas a la mayor velocidad posible.

En el anexo 19 se muestra el análisis descriptivo que se realiza a los tres floculantes en estudio a partir del cual se efectúa el análisis beneficio.

Según el análisis descriptivo, el floculante Quimifloc 400 presenta una velocidad de sedimentación ≥ 4 cm/min para todas las dosis utilizadas; por tanto todas las concentraciones cumplen con el parámetro esencial de calidad, se destaca los 8 mg/L por reportar la mayor velocidad. A todas las concentraciones se presentan lodos compactados mayores del 30%, la concentración de 2 mg/L presenta el mejor valor. Para los parámetros restantes todas las dosis cumplen con la norma, se resalta la concentración de 8 mg/L por brindar los mejores resultados.

De acuerdo con lo anterior todas las concentraciones en estudio pueden ser posibles a utilizar de acuerdo con el análisis beneficio.

En el anexo 20 se muestran los precios de venta de cada floculante y se toma como base de cálculo 150 días de zafra y una molida de 3 500 t/d. A partir de dicho anexo se realiza el análisis costo del floculante Quimifloc 400 donde se infiere que aplicar la concentración de 2mg/L reporta un costo de 4 095 \$, mientras que la concentración de 8 mg/L implica que el costo se eleve cuatro veces con respecto a la menor dosis, se alcanza con su aplicación un costo de 16 380 \$. Por lo planteado anteriormente la concentración de 2 mg/L es la que mayor beneficio brinda a un menor costo, por lo que se recomienda utilizar dicha dosis como la más efectiva del floculante Quimifloc 400.

Por otra parte el floculante Kebofloc 402 toma efectividad cuando se aplican las concentraciones de 6 mg/L y 8 mg/L por ser estas las que cumplen con la norma de velocidad de sedimentación (≥ 4 cm/min). Las restantes dosis quedan fuera del análisis por no cumplir con las especificaciones de calidad. De las dosis seleccionadas los 8 mg/L son los que presentan lodos compactados

menores del 30%, a pesar de que ninguna ofrece un porcentaje de remoción de turbidez mayor del 70%. Las dos concentraciones cumplen con la calidad requerida para el porcentaje de decoloración.

Esto demuestra que a 8 mg/L se obtiene el mayor beneficio a pesar de que el costo aumentaría 4 830 \$ en comparación con la concentración de 6 mg/L. Por tanto se recomienda utilizar la concentración de 8 mg/L porque a pesar de que su uso implica mayor costo se obtendría un mejor beneficio, sobre todo si se tiene en cuenta que de los tres floculantes es el Kebofloc 402 el que reporta los peores resultados.

Para el floculante Zukerfloc 400 C Plus las concentraciones que presentan una velocidad de sedimentación ≥ 4 cm/min son: 4 mg/L, 6 mg/L y 8 mg/L, la concentración de 2 mg/L queda fuera del análisis por no cumplir con el parámetro esencial de calidad. Para los restantes parámetros todas las dosis de floculante cumplen con la norma, donde se destaca la concentración de 8 mg/L por reportar los resultados más favorables.

A partir de lo planteado anteriormente se tiene en cuenta que económicamente aplicar la dosis de 4 mg/L presenta un ahorro de 12 915 \$ con respecto a la concentración de 8 mg/L, por tanto se recomienda utilizar la concentración de 4 mg/L por ser la que presenta mayor beneficio a un menor costo.

De los tres floculantes, el que mejores resultados aporta es el Quimifloc 400 sin embargo es el de mayor costo, pero al aplicar la dosis recomendada de dicho floculante se convierte en el de menor gasto. El floculante Kebofloc 402 brinda el menor costo y el menor beneficio, al aplicar su dosis recomendada se convierte en el de mayor costo. Por tanto se selecciona el floculante Quimifloc 400 como el más efectivo al menor costo.

3.4 Análisis de las pruebas industriales realizadas a los floculantes en estudio

Se realiza una prueba industrial a los floculantes Quimifloc 400 y Zukerfloc 400 C Plus por ser los que mejores resultados aportan experimentalmente, y de esa manera poder validar dichos resultados a escala industrial.

En el anexo 21 se muestran los resultados obtenidos durante seis días de los parámetros de calidad, determinados a los jugos alcalizado y clarificado con la aplicación de los floculantes mencionados y las concentraciones

recomendadas a partir del análisis de los resultados experimentales. Los parámetros son: porcentaje de turbidez, porcentaje de color, porcentaje de remoción de turbidez y porcentaje de decoloración.

3.4.1 Porcentaje de turbidez

En la figura 3.23 se observa el comportamiento del porcentaje de turbidez de los floculantes Quimifloc 400 y Zukerfloc 400 C Plus durante los seis días en estudio. El floculante Quimifloc 400 presenta valores de porcentaje de turbidez muy semejantes a los que reporta experimentalmente y el floculante Zukerfloc 400 C Plus arroja mejores resultados industrialmente que los que presenta a escala de laboratorio. Se deduce que la cantidad de impurezas presentes en el jugo disminuye considerablemente del primer al tercer día y de éste en adelante comienza a aumentar, lo demuestra el comportamiento similar de ambos floculantes a pesar que no muestran los mismos resultados. Ambos floculantes cumplen con la norma de calidad planteada por Pérez y Fernández, (2006), porcentaje de turbidez $\leq 25\%$. El menor valor de porcentaje de turbidez (16,25%) lo muestra el floculante Quimifloc 400, sin embargo dicho floculante presenta el peor comportamiento, lo cual valida los resultados obtenidos experimentalmente. Se destaca el Zukerfloc 400 C Plus como el floculante más efectivo frente a este parámetro.

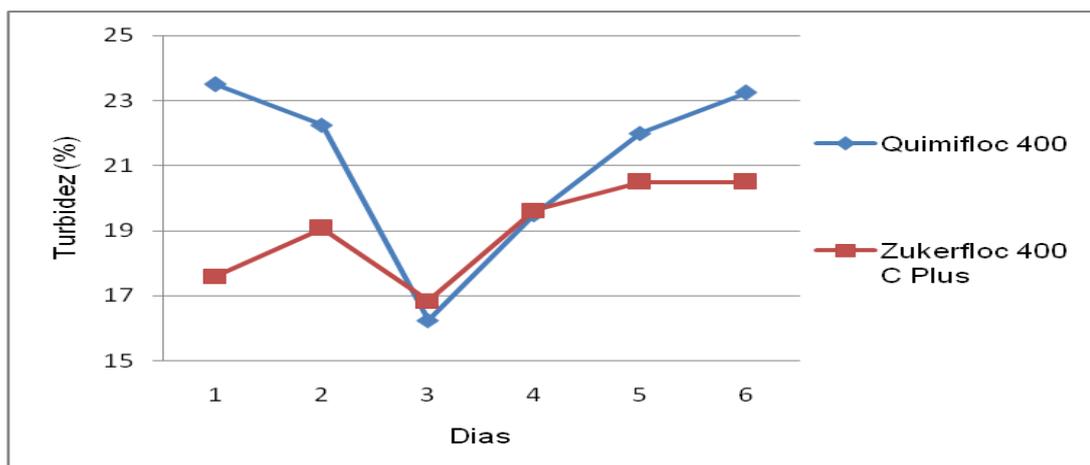


Figura 3.23. Promedio del porcentaje de turbidez para los floculantes Quimifloc 400 y Zukerfloc 400 C Plus.

3.4.2 Porcentaje de remoción de turbidez

En la figura 3.24 se observa el comportamiento del porcentaje de remoción de turbidez de los floculantes Quimifloc 400 y Zukerfloc 400 C Plus durante los seis días en estudio. Ambos floculantes presentan valores de porcentaje de remoción de turbidez dentro de la norma establecida ($\geq 70\%$) por Pérez y Fernández, (2006), se exceptúa el valor que alcanza el floculante Quimifloc 400 el primer día de estudio. Dicho floculante reporta valores inferiores con respecto al floculante Zukerfloc 400 C Plus, esto valida los resultados que se alcanzan experimentalmente. Los valores más altos de porcentaje de remoción de turbidez lo muestran el floculante Zukerfloc 400 C Plus lo que lo convierte en el más efectivo en cuanto a este parámetro.

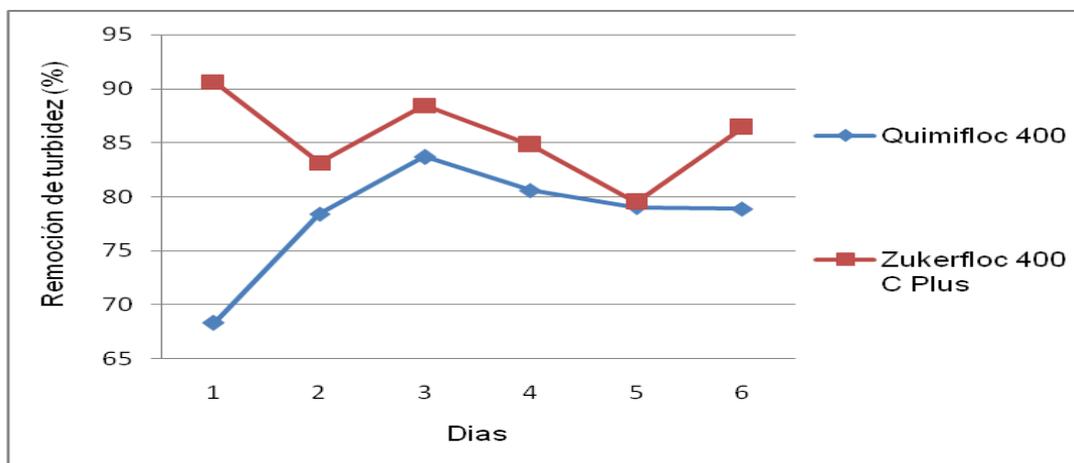


Figura 3.24. Promedio del porcentaje de remoción de turbidez para los floculantes Quimifloc 400 y Zukerfloc 400 C Plus.

3.4.3 Porcentaje de color

En la figura 3.25 se observa el comportamiento del porcentaje de color de los floculantes Quimifloc 400 y Zukerfloc 400 C Plus durante los seis días en estudio. Ambos floculantes cumplen con la norma de calidad establecida por Pérez y Fernández, (2006), porcentaje de color $\leq 50\%$. El floculante Quimifloc 400 muestra valores semejantes a los que presenta a escala de laboratorio, su comportamiento industrialmente valida dichos resultados. Por otra parte el floculante Zukerfloc 400 C Plus tiene el mejor comportamiento industrial al obtener un menor porcentaje de color que el que muestra experimentalmente. Se destaca el floculante Zukerfloc 400 C Plus como el más efectivo al mostrar los menores valores de porcentaje de color.

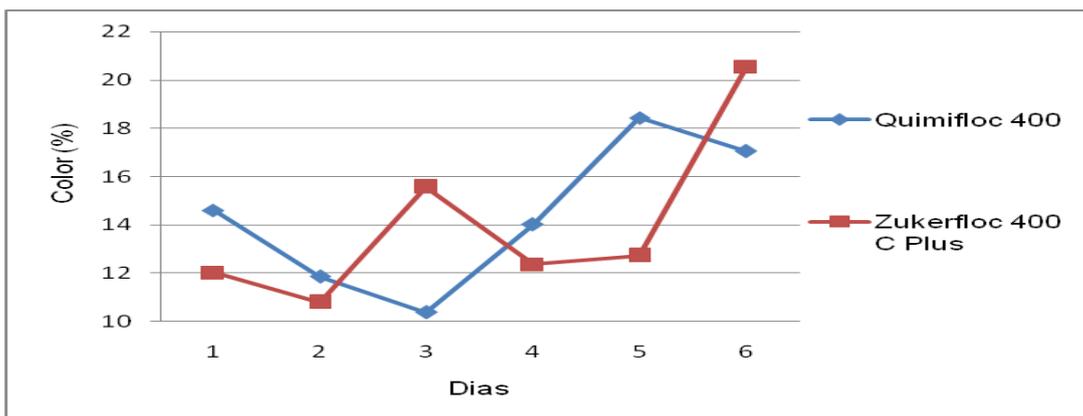


Figura 3.25. Promedio del porcentaje de color para los floculantes Quimifloc 400 y Zukerfloc 400 C Plus.

3.4.4 Porcentaje de decoloración

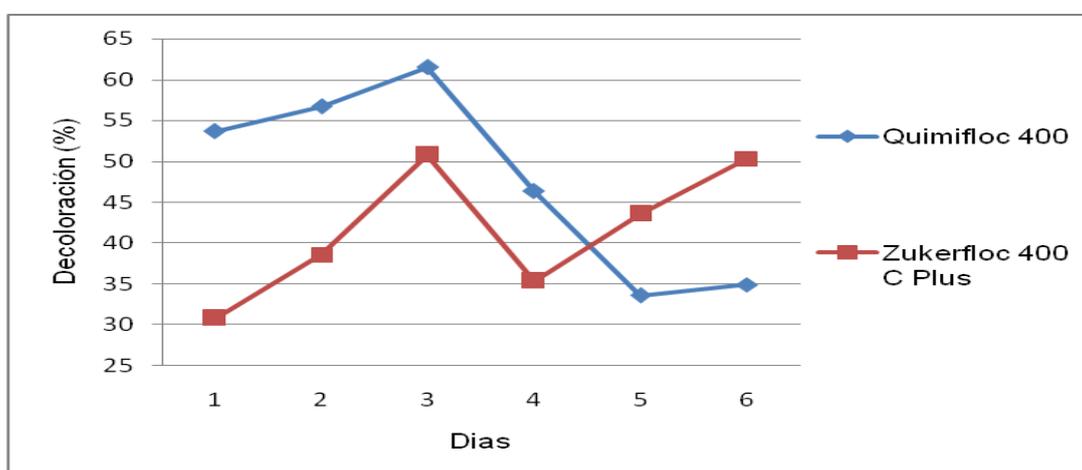


Figura 3.26. Promedio del porcentaje de decoloración para los floculantes Quimifloc 400 y Zukerfloc 400 C Plus.

En la figura 3.26 se observa el comportamiento del porcentaje de color de los floculantes Quimifloc 400 y Zukerfloc 400 C Plus durante los seis días en estudio. Ambos floculantes no cumplen con la norma de calidad establecida por Pérez y Fernández, (2006), porcentaje de decoloración $\geq 70\%$. Lo antes expuesto no pone en riesgo la efectividad de los floculantes, ya que el objetivo fundamental de los mismos es eliminar la mayor cantidad de impurezas presentes en el jugo. De los floculantes objeto de estudio el Zukerfloc 400 C Plus es el que presenta el mejor comportamiento, lo que lo convierte en el más efectivo en cuanto a este parámetro.

3.4.5 Análisis estadístico para porcentaje de remoción de turbidez y de color

Análisis descriptivo

Se realiza un análisis descriptivo de los valores de porcentaje de remoción de turbidez y porcentaje de remoción de color para los dos tipos de floculantes, donde se muestra en la tabla 3.15, los valores de media, desviación estándar y coeficiente de variación. El floculante 1 corresponde al Quimifloc 400 y el floculante 2 al Zukerfloc 400 C Plus.

Tabla 3.15 Análisis descriptivo para porcentaje de remoción de turbidez y porcentaje de remoción de color.

	Floculante 1		Floculante 2	
	remoción de turbidez %	remoción de color %	remoción de turbidez %	remoción de color %
Media	79,94	49,92	86,56	37,09
Des. Estándar	3,6	14,89	5,34	12,74
Coef. Variación	4,5	29,83	6,17	34,34

De la tabla anterior se infiere que el floculante Quimifloc 400 tiene menor porcentaje de remoción de turbidez y una dispersión relativa alrededor de la media, menor que el floculante Zukerfloc 400 C Plus. Con respecto a la remoción de color, la dispersión relativa de los datos para ambos tipos de floculantes está por encima de un 20%, lo que indica una gran variabilidad de los mismos alrededor de la media, por lo que la media no es representativa.

Prueba de Hipótesis para porcentaje de remoción de turbidez

Teniendo en cuenta estos resultados se realiza una prueba de hipótesis de comparación de media para la variable porcentaje de remoción de turbidez con el objetivo de demostrar estadísticamente que el promedio de remoción de turbidez del floculante Quimifloc 400 es menor que el promedio de porcentaje de remoción de turbidez del floculante Zukerfloc 400 C Plus.

Prueba de hipótesis para remoción de turbidez.

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2$$

$$H_a = \mu_1 < \mu_2$$

Donde:

μ_1 : es la media poblacional de remoción de turbidez para el floculante Quimifloc 400.

μ_2 : es la media poblacional de remoción de turbidez para el floculante Zukerfloc 400 C Plus.

Se trabaja para un 5 % de significación.

Pruebas de Hipótesis

Medias muestrales = 79,94 y 86,56

Desviaciones estándar muestrales = 3,6 y 5,34

Tamaños de muestra = 15 y 15

Intervalo aproximado del Límite superior de confianza del 95% para la diferencia entre medias: $-6,62 + 2,73514 [-3.88486]$.

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0.0

Alternativa: menor que

Estadístico Z calculado = -3,98114

Valor-P = 0,0000343085

Rechazar la hipótesis nula para alfa = 0,05.

Los resultados obtenidos en el programa de Statgraphics, indican que se rechaza la hipótesis nula (H_0), por lo que se puede afirmar que el porcentaje de remoción de turbidez promedio con el floculante Quimifloc 400 es menor al que se obtiene con el floculante Zukerfloc 400 C Plus con un 5 % de significación.

De lo analizado anteriormente se puede concluir que ambos floculantes presentan un comportamiento industrial semejante, por lo que a criterio de la autora ambos cumplen con la mayor cantidad de parámetros de calidad necesarios para ser utilizados en el proceso de clarificación. Lo que los convierte en candidatos de máxima prioridad para llevar a cabo dicho proceso en la UEB Jesús Rabí.

3.5 Conclusiones Parciales

1. Los parámetros que caracterizan los jugos que se procesan en la etapa de purificación en la UEB Jesús Rabí se comportan de forma estable, aún cuando las características de la materia prima varían notablemente.
2. Las dosis recomendadas para los tres floculantes objeto de estudio son: 2 mg/L para el Quimifloc 400, 4 mg/L para el Zukerfloc 400 C Plus, y 8 mg/L para el Kebofloc 402. Destacándose el floculante Quimifloc 400 el que mejores resultados aporta a escala de laboratorio.
3. La prueba industrial realizada demuestra que ambos floculantes son adecuados para tratar los jugos de caña que se procesan en la UEB Jesús Rabí.

Conclusiones

1. A través de la obtención de los parámetros adecuados en el proceso de clarificación, y tomados en cuenta los logros tecnológicos más recientes en la fabricación de azúcar crudo, se logra obtener la dosis más efectiva de cada uno de los floculantes objeto de estudio, lo que confirma la validez de la hipótesis enunciada.
2. A pesar de la variabilidad que presenta la calidad de la materia prima que se procesa en la UEB Jesús Rabí, los parámetros que caracterizan los jugos que se tratan en la etapa de purificación se comportan de forma estable.
3. Las dosis más efectivas a escala de laboratorio para cada uno de los floculantes objeto de estudio son: 2 mg/L para el Quimifloc 400, 4 mg/L para el Zukerfloc 400 C Plus, y 8 mg/L para el Kebofloc 402, de ellos se selecciona el floculante Quimifloc 400 como el que mejores resultados aporta experimentalmente.
4. A escala industrial se demuestra que los floculantes Quimifloc 400 y Zukerfloc 400 C Plus, aplicados a las concentraciones de 2 mg/L y 4 mg/L respectivamente, se reafirman como los más adecuados para tratar los jugos de caña que se procesan en la UEB Jesús Rabí.

Recomendaciones

1. Realizar el diseño de una nueva planta de preparación de floculantes en la UEB Jesús Rabí y evaluar la metodología de preparación de floculantes planteada por el proveedor y por la industria.
2. Evaluar al menos tres veces en zafra el comportamiento del floculante recomendado.
3. Continuar el estudio del comportamiento de otros floculantes en la UEB Jesús Rabí, para determinar si existe un floculante capaz de arribar a mejores resultados que el recomendado.

Bibliografía

1. Aparicio, Wilfredo. 2005. Proceso de obtención de la caña de azúcar. *Revisiones de la ciencia*. Colombia. Volumen V. Disponible en https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f9/Revista_Reciteia_v5.pdf. Consultado 11/1/2014.
2. Arca, Manuel; Esparza, Raúl. 2004. Consultor Azucarero. p 353.
3. Clark, J.A. 1978. Tecnología general de la producción de azúcar crudo. Departamento de capacitación del MINAZ. Tomo I.
4. Caballero, Carlos.2013.Industrialización del jugo de caña. Disponible en <http://industrializacionjugocaña.blogspot.es>. Consultado 11/1/2014.
5. Calidad de la Caña de Azúcar.2010. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. *CENICAÑA*. Colombia. p 337-354.
6. Cardel, J; Ramírez, R; Ragasol, V. 2007. Polímero floculante a base de acrilamida y coagulante a base de hidroxiclورو de aluminio y poliaminamelamina para el acondicionamiento de agua cruda. No de documento: NRF-200-PEMEX-2007.Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios. Disponible en <http://www.pemex.com//files/content/NRF-200-PEMEX-2007.pdf>. Consultado: 23/4/2014.
7. Cifuentes, O; Campaña, H; Kotik, D.2009.ENOHSa Floculación. Ingeniería Sanitaria. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Bahía Blanca. Argentina. Disponible en <http://www.frbb.utn.edu.ar/carreras/materias/ingsanitaria/ENOHSa%20Floculacion.pdf>. Consultado 26/04/2014.
8. Coagulación y Floculación del Agua. 2011. Tratamiento de agua. Disponible en http://cienciafyq.edumoot.com/pluginfile.php/823/mod_resource/content/1/coagulacion_floculacion_agua%20sencillo.pdf. Consultado: 26/04/2014.
9. Cruz, Alfredo. 2012. Etapas de la producción de azúcar crudo. Disponible en http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central/311801/311801_ee.htm#ETAPAS. Consultado 25/1/2014.

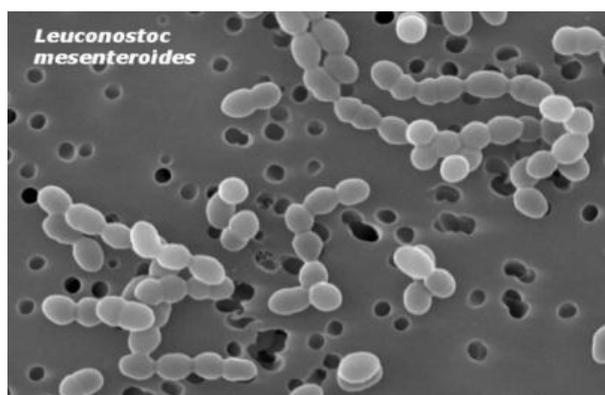
10. Díaz, Santiago. 1999. Comportamiento de los azúcares reductores en el proceso de obtención de azúcar crudo. Su influencia en el agotamiento de la miel final. Tesis de Maestría.
11. Caracterización y evaluación de algunos floculantes industriales utilizados para la clarificación de jugos de caña de azúcar en Colombia. 2009. *CENICAÑA*. p 150.
12. Concepto de la Clarificación. 2010. Disponible en el Ingenio Riopaila Castilla S.A., planta Riopaila. p 270.
13. Doherty, W; Rackemann, D. 2009. Some aspects of calcium phosphate chemistry in sugar cane clarification. *International Sugar Journal*. Disponible en <http://eprints.qut.edu.au/34335/1/c34335.pdf>. p 448-455.
14. Domínguez, José. 2007. Problemas de la purificación del jugo de caña. *Tecnología Química*. Universidad de Oriente. Volumen XXII. Disponible en <http://revistas.mes.edu.cu/greenstone/collect/repo/import/repo/20100113/00418420223042.pdf>. Consultado 10/1/2014.
15. Estenoz, Alberto. 2011. Situación hidroenergética actual de la Central Termoeléctrica "La Troncal". Tesis de grado.
16. Evangelista, Ignacio. 2012. Grupo de Investigación de Recursos Hídricos de la Universidad Jaume I de Castellón. *Hidrogeoquímica*. Procesos de Adsorción. Disponible en <http://www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ17.pdf>. Consultado 24/4/2014.
17. Fernández, S. 2007. Respuesta Tisular a Materiales de Relleno. Estudio Experimental. Tesis de grado. Universidad Santiago de Compostela. Facultad de Medicina y Odontología. España.
18. Fernández, F; Pérez, H. 2006. Manual de Métodos Analíticos para Azúcar Crudo. p 216.
19. Ficha técnica del floculante KEBOFLOC 402. 2013.
20. Gil, N. 2008. Consideraciones acerca del desempeño operacional de las estaciones de clarificación y filtración. *Carta Trimestral, CENICAÑA*. Volumen 30. Disponible en el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA). Santiago de Cali, Colombia. Consultado 25/4/2014. p15-19.
21. Giraldo, Manuel. 2005. Evaluación del efecto de materia extraña vegetal (hojas, cogollos, chulquines) en el proceso de clarificación de jugos de

- caña de azúcar. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. Ingeniería Agroindustrial.
22. Greenwood, J; Rainey, T; Doherty, W. 2011. Light scattering study on the size and structure of calcium phosphate/hydroxyapatite flocs formed in sugar solutions. *Revista Colloid and Interface Science*. Disponible en <http://eprints.qut.edu.au/14792/1/14792.pdf>. Consultado 23/4/2014. p66-71.
23. Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de la caña panelera. 2011. Disponible en <http://books.google.com.co/books?Id=HavGX8wguv4C&pg=PA50&dq=gomas+y+ceras++de+la+ca%C3%B1a+de+azucar&hl=es&sa=X&ei=rIsxT8SHDYv2gAe6m6CUBQ&sqi=2&ved=0CDMQ6AEwAA#v=onepage&q=gomas%20y%20ceras%20%20de%20la%20ca%C3%B1a%20de%20azucar&f=false>. Consultado 25/4/2014. p 100.
24. Honig, P. 1974. Principios de Tecnología Azucarera. Tomo I: Propiedades de los Azúcares y No-azúcares en la Purificación de los Jugos. Compañía Editorial: CONTINENTAL S.A.
25. Hugot, E. 1986. Manual para ingenieros azucareros. Tomo I.
26. Manual de Operaciones del Azúcar Crudo. 2005. *Ingemat*. Capítulo 5. Cuba. 51p.
27. Jenkins, G. 1971. Introducción a la Tecnología del Azúcar de Caña. Ediciones de Ciencia y Técnica. La Habana.
28. Lamasares, Ana. M. 2010. Informe presentado a la dirección de la UEB “Jesús Rabí “.
29. Lamasares, Ana. M. 2013. Informe presentado a la dirección de la UEB “Jesús Rabí “.
30. Larrahondo, J. 2009. Calidad de la Caña de Azúcar. *CENICAÑA*. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia, Cali. p 337 – 354.
31. Manual de Operaciones de Clarificadores de Bajo Tiempo de Retención. 2010.
32. Marín, Laura Viviana. 2012. Determinación de las condiciones apropiadas de preparación de un floculante como componente fundamental en el proceso de clarificación de jugo en Riopaila Castilla S.A, planta Riopaila. p170.

33. Morales, C. 2005. Análisis del porcentaje de remoción de turbidez como un Indicador de la eficiencia de los clarificadores de jugo tipo DORR de Ingenio San Carlos. Tesis de grado. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingenierías. Escuela de Ingeniería Química. Guatemala. p134.
34. Morales, S; Flores, P.1975. El Uso de Floculantes en la Industria Azucarera. *Cuba Azúcar*. p 43-53.
35. Morejón, Alfredo. 2012. Curso para tecnólogos azucareros. UEB “Jesús Rabí “.
36. Morrel, I. 1985. Tecnología Azucarera. Edición Pueblo y Educación.
37. Norma Técnica Colombiana, NTC 2369.2006. Industrias Alimentarias. Floculantes derivados de la acrilamida utilizados en la clarificación del agua potable y de los jugos y jarabes de la caña de azúcar. Bogotá D.C.
38. Ochoa, C. 2008. Propuesta para Automatización del Proceso de Clarificación del Jugo de Caña, por medio de Controladores de Lazos Múltiples. Tesis de grado. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Ingeniería Mecánica. Guatemala.
39. Payne, J.1953. Principles of Sugar Technology. Volumen I. Amsterdam.
40. Pedrosa Puertas. 1983. Fabricación de azúcar crudo.
41. Posada, E. 1987. Tecnología de la producción azucarera. ISPJAE.
42. Documento Preparación de Polímeros Aniónicos en Polvo para su Uso en la Industria Azucarera.2006. Limpiadores Industriales y Petroleros S.A (LIPESA).
43. Rein, P. 2007. Cane Sugar Engineering. Berlin: Editorial Bartens. Chapter 10: Clarification.
44. Rocasolano, A. 1917. El Calor como Agente de Coagulación. Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físico-químicas y Naturales de Zaragoza. Disponible en http://zaguan.unizar.es/revistas/acadCiencias/S1_T02_A1917/S1_T02_A1917_06.pdf. Consultado 24/4/2014. p 92-97.
45. Rodríguez, J; Gil, N; Castillo, E; Erazo, V. 2009. Caracterización y Evaluación de Algunos Floculantes Industriales Utilizados para la Clarificación de Jugos de Caña de Azúcar en Colombia. Documento de trabajo No. 670. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA). Santiago de Cali.

46. Romero, J, Torres, J.1996. Estudio de las variables en el proceso de clarificación de jugos diluidos de caña de azúcar. Tesis de grado. Universidad del Valle, Colombia. Facultad de Ingenierías. Ingeniería Química.
47. Smith, B; Romo, R; Molina, J; Chen, J. 1982. La Consistencia de la Performance de Floculantes Poliméricos en la Clarificación de Jugo de Caña. *Sugar y Azúcar*. Vol. 77. p 59-66.
48. Sassia, P. 2010. Polímeros de la Acrilamida y Copolímeros Derivados para el Tratamiento de Aguas. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. Disponible en <http://www.gedar.com/PDF/Residuales/GEDAR-Catalogo-Preparacion-Floculante.pdf>. Consultado: 24/04/2014.
49. Steindl, R.1998. Clarificación y Filtración. Convenio Asocaña –Sena. Cali.
50. Steindl, R.2008. Comunicación personal. Cali.
51. Svarovsky, L. 2011. Solid-Liquid Separation. Cuarta Edición. Londres: Editorial Elsevier.

Anexo 1: Bacteria *Leuconostoc mesenteroides* presente en la caña de azúcar



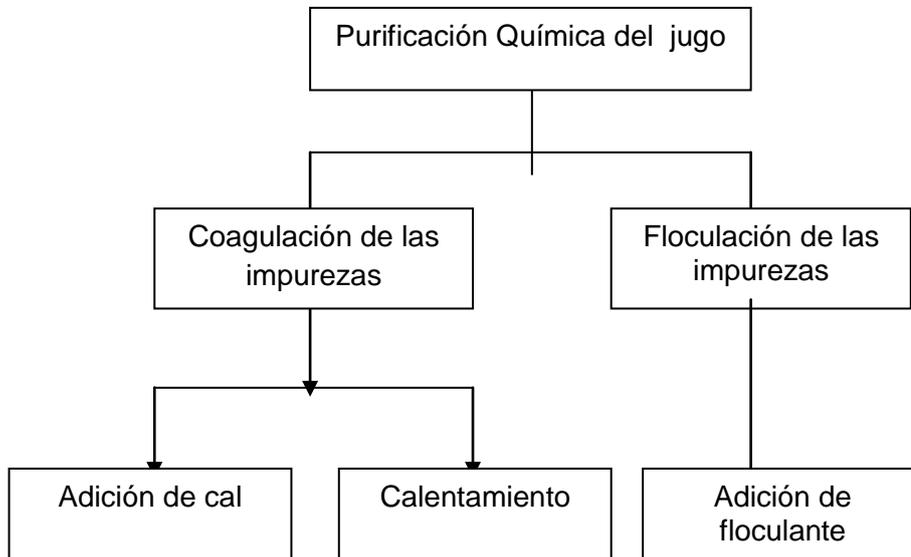
Anexo 2: Tamiz vibratorio



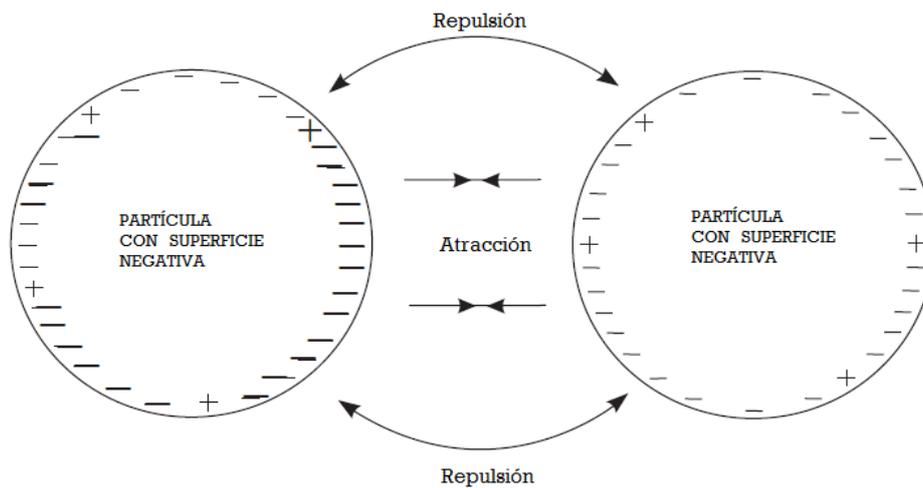
Anexo 3: Promedio de la composición química del jugo mezclado (%)

Constituyente	Porcentaje	Constituyente	Porcentaje	Constituyente	Porcentaje
sacarosa	75 - 92	Ácidos orgánicos	1 - 3	Sales orgánicas	1,5 – 4,5
glucosa	2 - 4	Aminoácidos	1,5 – 5,5	Gomas	0,3 – 0,6
fructosa	2 - 4	Proteínas	0,5 – 0,6	Ceras y grasas	0,15 – 0,50
Sales inorgánicas	3,0 – 3,4	Almidones	0,001–0,050	Compuestos fenólicos	0,10 – 0,80

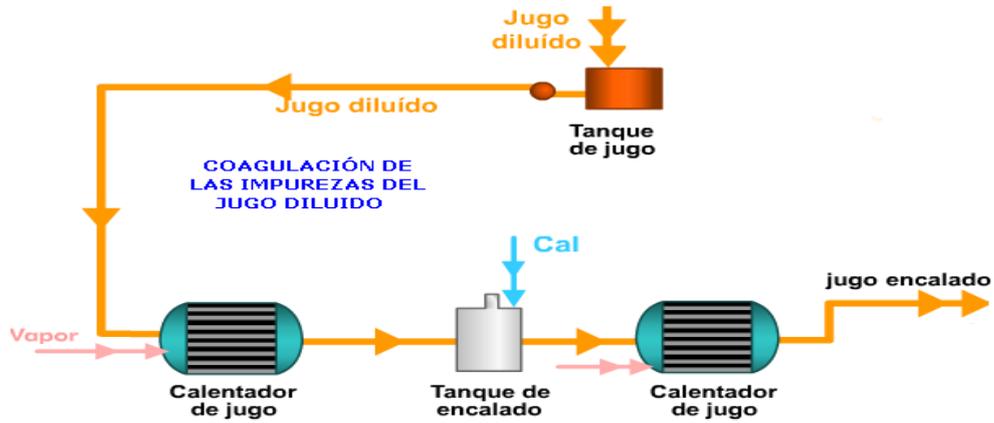
Anexo 4: Mecanismo de purificación química del jugo de caña



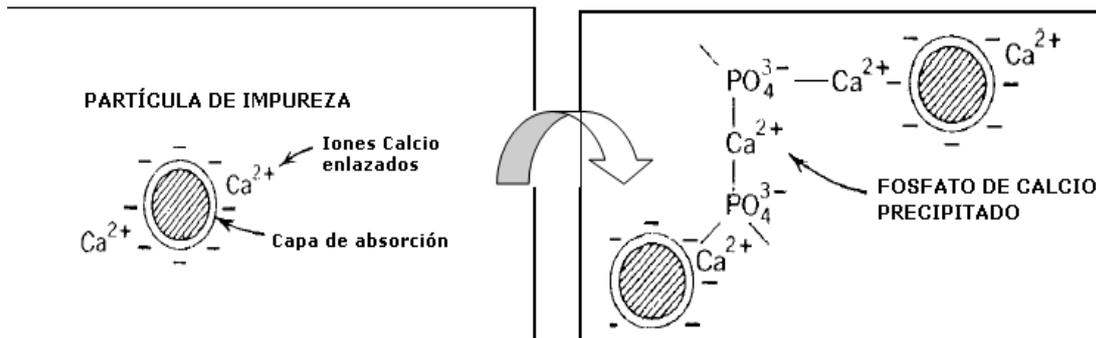
Anexo 5: Adsorción de iones sobre la superficie de la partícula coloidal



Anexo 6: Proceso de coagulación de las impurezas del jugo diluido utilizando la alcalización en caliente



Anexo 7: Formación del precipitado de fosfato de calcio



Anexo 8: Calentadores de jugo horizontales

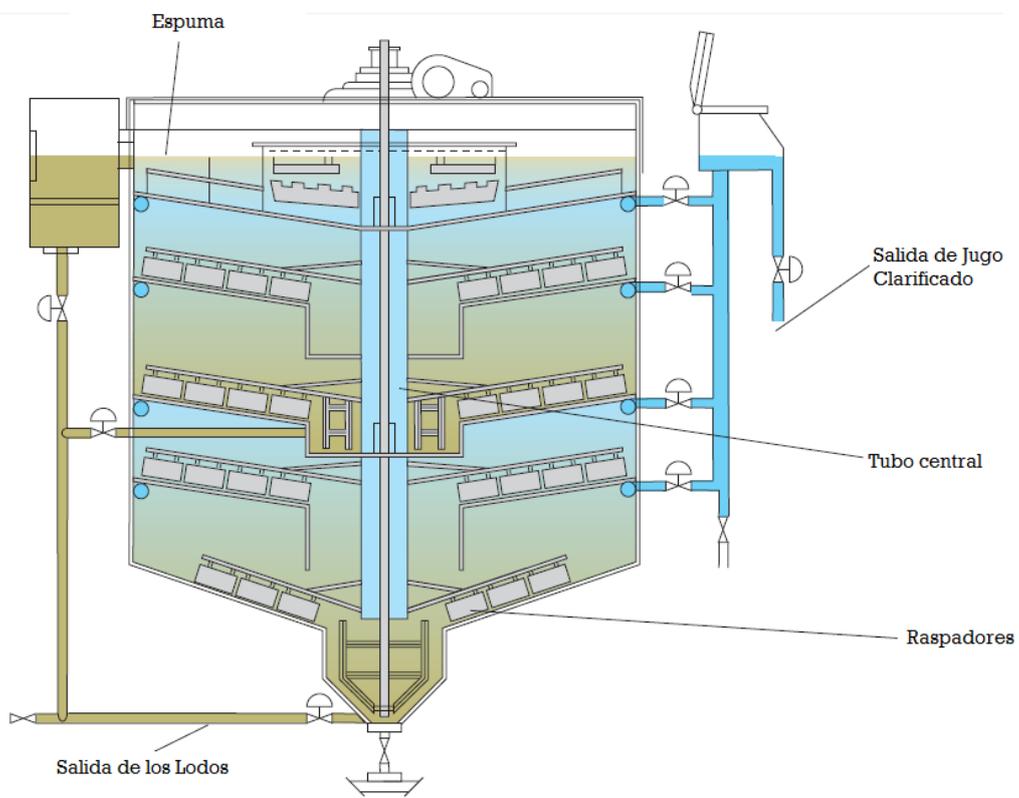


Anexo 9: Tanque Flash

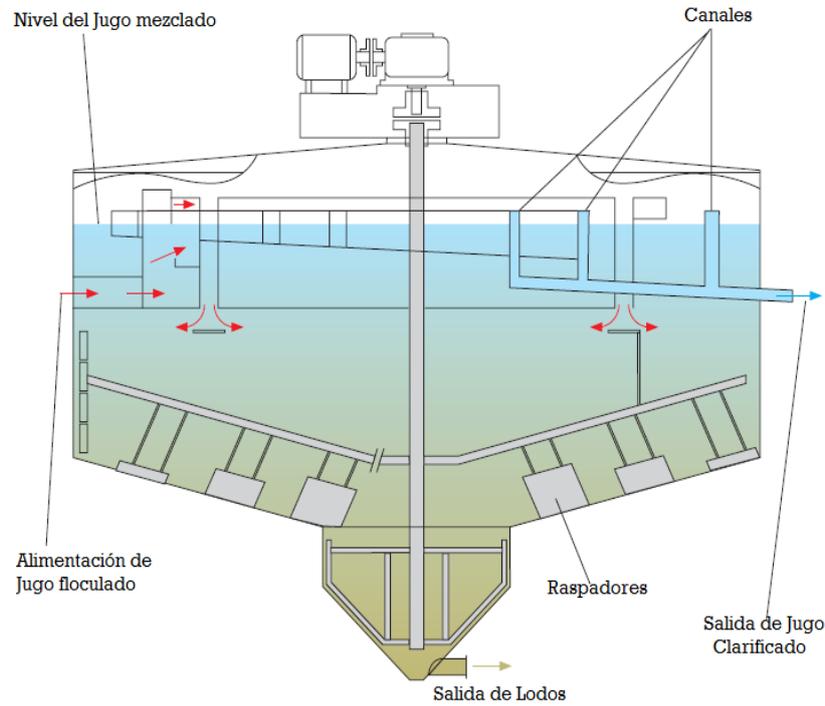


- Entrada Jugo mezclado al Tanque "Flash"
- Contacto del floculante con el Jugo mezclado
- Tanque "Flash"
- Jugo claro recién extraído del clarificador RapiDorr
- Clarificador RapiDorr

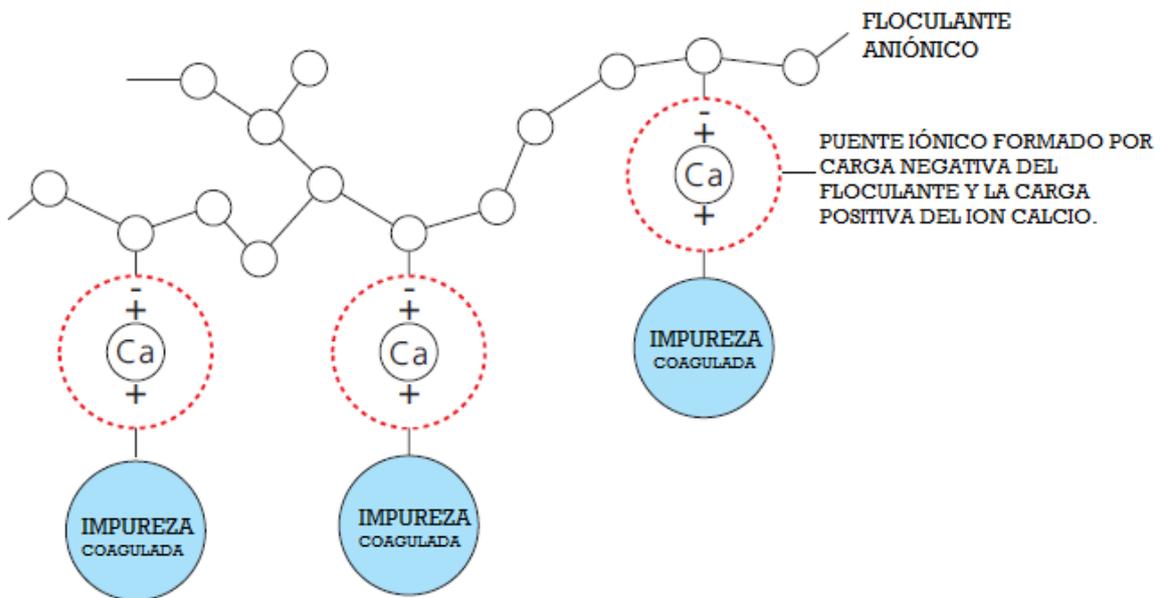
Anexo 10: Clarificador RapiDoor



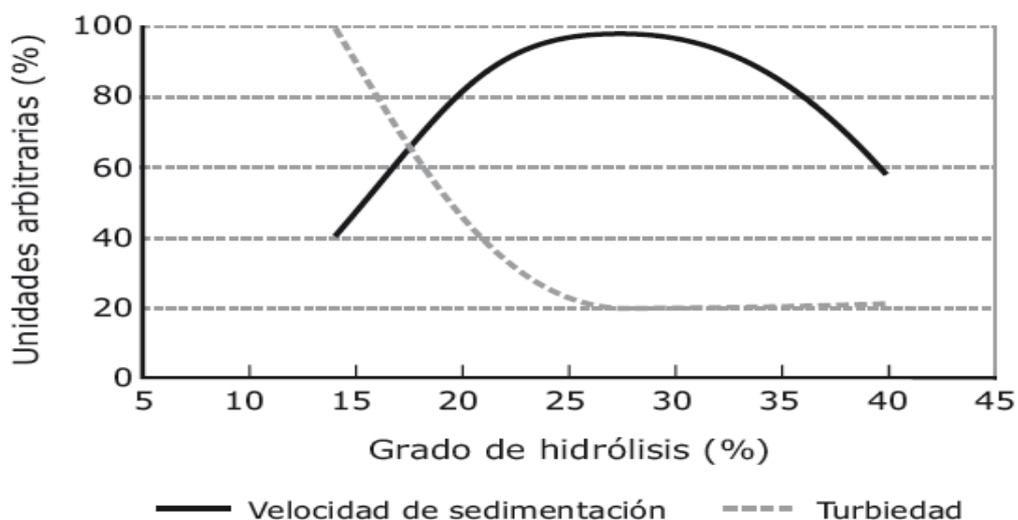
Anexo 11: Clarificador Rápido SRI, diseño original



Anexo 12: Entrelazamiento de los coágulos de impureza con la cadena del floculante a través del puente iónico de calcio



Anexo 13: Influencia del grado de hidrólisis del floculante en la velocidad de sedimentación del jugo claro y en su turbidez



Anexo 14: Variedades de caña que se procesan en la UEB Jesús Rabí

Variedad	Área (ha)	%
C86-12	3126,40	33,2
C323-68	2024,91	21,5
C85-102	1105,31	11,7
Co997	560,80	5,9
C89-147	1507,53	16,0
Cp52-43	314,48	3,3
C87-51	323,76	2,4
J64-19	100,62	1,0
C1051-73	210,63	2,2
C1324-74	135,89	1,4
C1616-76	55,54	0,6
otras	14,73	0,1

Anexo 15: Promedios de los parámetros que caracterizan los jugos

Dias	Jugo Alcalizado				Jugo Clarificado			
	pH	Bx	Pol	Pza	pH	Bx	Pol	Pza
1	7,95	13,70	11,47	83,71	7,05	13,41	11,44	84,85
2	8,10	13,70	11,45	83,57	6,95	13,50	11,57	85,71
3	7,95	13,23	11,01	83,18	6,85	13,56	11,60	85,54
4	8,00	13,78	11,60	84,21	6,80	13,48	11,60	86,05
5	7,90	13,47	11,34	84,16	7,05	13,58	11,71	86,23
6	7,95	13,71	11,56	84,35	6,85	13,39	11,55	86,25
7	7,85	13,48	11,37	84,34	7,00	13,57	11,67	85,95
8	7,90	13,22	11,06	83,64	6,95	13,58	11,65	85,74
9	7,80	13,79	11,64	84,41	6,95	13,35	11,56	86,63
10	7,90	13,95	11,79	84,48	7,05	13,54	11,56	85,38

Anexo 16: Promedios de los parámetros de calidad determinados al jugo clarificado con la utilización del floculante Quimifloc 400

Floculante Quimifloc 400												
Dias	Velocidad de sedimentación (cm/min)				Compactación de lodos (%)				Turbidez (%)			
	Dosis				Dosis				Dosis			
	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
1	4,62	5,25	4,98	5,25	14,00	18,00	21,00	18,00	16,00	12,00	20,00	12,00
2	4,62	5,45	4,91	5,50	16,00	17,00	20,00	18,00	14,00	14,00	25,00	10,00
3	4,56	5,39	5,10	5,35	14,00	17,00	19,00	15,00	15,00	13,00	22,00	8,00
4	4,38	5,25	4,93	5,42	13,00	17,00	21,00	15,00	16,00	15,00	27,00	11,00
5	4,26	5,25	4,96	5,36	16,00	19,00	21,00	17,00	18,00	17,00	24,00	10,00
6	4,26	5,30	5,04	5,43	17,00	17,00	20,00	18,00	18,00	15,00	23,00	12,00
7	4,62	5,45	4,91	5,50	15,00	17,00	19,00	17,00	15,00	16,00	26,00	9,00
8	4,38	5,25	4,93	5,42	14,00	16,00	22,00	18,00	17,00	17,00	21,00	9,00
9	4,26	5,30	5,04	5,43	13,00	15,00	20,00	18,00	16,00	13,00	21,00	8,00

10	4,62	5,25	4,98	5,26	19,00	19,00	21,00	20,00	16,00	13,00	20,00	11,00
11	4,50	5,32	4,96	5,23	15,00	17,00	20,00	18,00	17,00	15,00	26,00	8,00
12	4,41	5,27	4,93	5,30	15,00	17,00	21,00	16,00	18,00	16,00	26,00	12,00
13	4,36	5,24	4,90	5,36	16,00	17,00	19,00	18,00	14,00	12,00	24,00	10,00
14	4,50	5,40	4,98	5,46	13,00	15,00	20,00	16,00	15,00	15,00	23,00	11,00
15	4,43	5,34	4,85	5,36	17,00	17,00	19,00	18,00	17,00	13,00	25,00	11,00

Continuación del Anexo 16

Floculante Quimifloc 400												
Días	Remoción de Turbidez (%)				Color (%)				Decoloración (%)			
	Dosis				Dosis				Dosis			
	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
1	83,16	87,37	78,95	87,37	10,37	22,76	28,60	7,32	89,63	77,24	71,40	92,68
2	85,11	85,11	73,40	89,36	19,08	21,36	29,53	9,03	88,78	87,44	82,63	94,69
3	86,36	88,18	80,00	92,73	15,32	25,87	27,61	7,87	89,79	82,75	81,59	94,75
4	84,00	85,00	73,00	89,00	11,44	21,98	26,49	7,98	91,20	83,09	79,62	93,86
5	82,86	83,81	77,14	90,48	11,58	22,73	27,08	9,43	90,35	81,06	77,43	92,14
6	83,64	86,36	79,09	89,09	17,81	22,54	29,65	12,87	83,80	55,51	73,05	88,30
7	85,00	84,00	81,74	93,04	12,37	23,85	25,14	11,02	89,23	79,26	78,14	90,42
8	84,96	84,96	80,19	91,51	11,90	23,86	26,07	10,01	89,18	78,31	76,30	90,90
9	86,09	88,70	82,81	90,43	10,02	24,67	27,91	7,76	89,98	75,33	72,09	92,24
10	86,09	88,70	81,74	93,04	16,99	22,96	25,11	11,98	84,55	79,13	77,17	89,11
11	82,11	84,21	72,63	91,58	11,66	23,03	27,40	10,67	89,00	78,27	74,11	89,93
12	81,63	58,67	73,47	87,76	15,04	23,90	27,09	8,43	85,54	77,02	73,95	91,19
13	85,71	87,76	75,51	89,80	13,21	21,90	29,01	7,09	86,79	78,10	70,99	92,91
14	84,44	83,32	74,44	87,78	13,56	21,21	28,45	8,54	87,09	79,80	72,90	91,87
15	85,22	88,70	78,26	90,43	11,45	22,76	26,32	10,87	89,60	79,31	76,07	90,12

Anexo 17: Promedios de los parámetros de calidad determinados al jugo clarificado con la utilización del floculante Kebofloc 402

Floculante Kebofloc 402												
Dias	Velocidad de sedimentación (cm/min)				Compactación de lodos (%)				Turbidez (%)			
	Dosis				Dosis				Dosis			
	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
1	3,30	3,45	4,26	4,30	22,00	25,00	31,00	28,00	31,00	72,00	55,00	40,00
2	3,59	3,64	3,75	4,41	20,00	26,00	30,00	26,00	32,00	68,00	55,00	44,00
3	3,54	3,50	4,32	4,90	21,00	29,00	30,00	25,00	29,00	71,00	52,00	41,00
4	3,54	3,92	4,02	4,65	20,00	28,00	33,00	29,00	30,00	69,00	51,00	43,00
5	3,84	3,85	4,44	4,90	24,00	26,00	30,00	28,00	30,00	75,00	53,00	44,00
6	3,59	3,50	4,02	4,76	23,00	25,00	29,00	28,00	28,00	74,00	56,00	40,00
7	3,45	3,39	4,01	4,72	26,00	26,00	29,00	25,00	29,00	70,00	52,00	41,00
8	3,78	3,76	4,40	4,86	24,00	26,00	35,00	30,00	31,00	73,00	52,00	45,00
9	3,60	3,96	4,12	4,79	23,00	24,00	35,00	26,00	31,00	72,00	55,00	41,00
10	3,84	3,85	4,44	4,90	20,00	26,00	31,00	26,00	33,00	75,00	53,00	44,00
11	3,59	3,64	3,75	4,41	24,00	24,00	29,00	27,00	32,00	71,00	51,00	43,00
12	3,54	3,92	4,02	4,65	22,00	25,00	33,00	30,00	33,00	68,00	56,00	41,00
13	3,62	3,91	4,50	4,70	21,00	27,00	35,00	29,00	31,00	70,00	55,00	45,00
14	3,70	3,89	4,41	4,62	20,00	26,00	32,00	27,00	28,00	69,00	52,00	40,00
15	3,65	3,69	4,53	4,75	20,00	24,00	30,00	26,00	29,00	74,00	57,00	44,00

Continuación del Anexo 17

Floculante Kebofloc 402												
Días	Remoción de Turbidez (%)				Color (%)				Decoloración (%)			
	Dosis				Dosis				Dosis			
	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
1	67,37	24,21	42,11	57,89	19,45	17,83	20,47	23,80	80,55	82,17	79,53	76,20
2	65,96	27,66	41,49	53,19	18,70	18,76	25,32	33,90	89,00	88,96	85,11	80,06
3	73,64	35,45	52,73	62,73	23,90	16,54	29,35	32,07	84,07	88,97	80,43	78,62
4	70,00	31,67	49,00	57,00	23,21	17,93	26,32	26,40	82,15	86,21	79,75	79,69
5	71,43	28,57	49,52	58,10	17,43	19,02	20,14	30,67	85,48	84,15	83,22	74,44
6	74,55	32,73	49,09	63,64	23,87	19,76	27,54	29,10	78,30	82,04	74,96	73,55
7	71,00	30,00	48,00	59,00	24,51	20,71	25,90	25,71	78,69	81,99	77,48	77,64
8	70,75	31,13	50,94	57,55	17,91	16,54	28,00	26,54	83,72	84,96	74,55	75,87
9	73,04	37,39	52,17	64,35	18,52	17,65	19,56	26,78	81,48	82,35	80,44	73,22
10	71,30	34,78	53,91	61,4	18,93	18,90	27,90	30,34	82,79	82,82	74,64	72,42
11	66,32	25,26	46,32	54,4	22,43	17,52	29,65	26,32	78,84	83,47	72,03	75,17
12	66,33	30,61	42,86	58,6	17,45	20,54	25,87	26,98	83,22	80,25	75,13	74,06
13	68,37	28,57	43,m88	54,8	23,95	22,04	20,54	32,53	76,06	77,96	79,46	67,47
14	68,89	23,33	42,22	55,6	26,01	19,67	27,45	31,89	75,23	81,27	74,86	69,63
15	74,78	35,65	50,43	61,4	18,90	19,34	26,15	31,01	82,82	82,42	76,23	71,81

Anexo 18: Promedios de los parámetros de calidad determinados al jugo clarificado con la utilización del floculante Zukerfloc 400 C Plus

Floculante Zukerfloc 400 C Plus												
Dias	Velocidad de sedimentación (cm/min)				Compactación de lodos (%)				Turbidez (%)			
	Dosis				Dosis				Dosis			
	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
1	3,52	4,10	4,90	5,10	15,00	28,00	23,00	20,00	32,00	25,00	20,00	17,00
2	3,66	4,09	4,98	5,09	17,00	27,00	26,00	19,00	37,00	28,00	25,00	16,00
3	3,78	4,15	4,93	5,03	18,00	29,00	24,00	21,00	34,00	27,00	26,00	15,00
4	3,91	4,20	4,91	5,11	15,00	30,00	23,00	20,00	33,00	30,00	22,00	19,00
5	3,65	4,17	4,91	5,03	17,00	30,00	24,00	17,00	33,00	29,00	23,00	20,00
6	3,55	4,17	4,97	5,11	16,00	27,00	26,00	17,00	38,00	26,00	23,00	15,00
7	3,89	4,13	4,94	5,03	20,00	26,00	25,00	21,00	36,00	26,00	22,00	16,00
8	3,77	4,19	4,90	5,07	20,00	25,00	26,00	21,00	37,00	26,00	25,00	15,00
9	3,56	4,14	4,95	5,10	17,00	25,00	25,00	20,00	35,00	25,00	24,00	16,00
10	3,81	4,20	4,93	5,12	17,00	28,00	24,00	16,00	33,00	24,00	23,00	16,00
11	3,94	4,13	4,99	5,04	16,00	30,00	23,00	17,00	31,00	29,00	24,00	18,00
12	3,90	4,16	4,96	5,03	15,00	29,00	26,00	17,00	33,00	30,00	23,00	19,00
13	3,51	4,20	4,94	5,09	15,00	27,00	27,00	20,00	34,00	29,00	22,00	17,00
14	3,83	4,12	4,89	5,04	17,00	27,00	23,00	19,00	39,00	28,00	20,00	20,00
15	3,97	4,09	4,90	5,06	17,00	30,00	22,00	21,00	38,00	25,00	25,00	19,00

Continuación del Anexo 18

Floculante Zukerfloc 400 C Plus												
Dias	Remoción de Turbidez (%)				Color (%)				Decoloración (%)			
	Dosis				Dosis				Dosis			
	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
1	66,32	73,68	78,95	82,11	25,45	19,00	13,00	8,00	74,55	81,00	87,00	92,00
2	60,64	70,21	73,40	82,98	27,09	19,56	14,98	9,00	84,06	88,49	91,19	94,71
3	69,09	75,45	76,36	86,36	27,98	17,32	12,05	9,65	81,35	88,45	91,97	93,57
4	67,00	70,00	78,00	81,00	22,56	17,02	16,61	8,34	82,65	86,91	87,22	93,58
5	68,57	72,38	78,10	80,95	23,54	15,70	13,90	7,32	80,38	86,92	88,42	93,90
6	65,45	76,36	79,09	86,36	26,12	14,34	12,56	7,34	76,25	86,96	88,58	93,33
7	64,00	74,00	78,00	84,00	26,01	16,45	11,03	7,90	77,38	85,70	90,41	93,13
8	65,09	75,47	76,42	85,85	29,76	16,23	15,00	8,30	72,95	85,25	86,36	92,45
9	69,57	78,26	79,13	86,09	28,34	19,02	17,54	10,12	71,66	80,98	82,46	89,88
10	71,30	79,13	80,00	86,09	27,14	18,94	16,45	9,21	75,33	82,78	85,05	91,63
11	67,37	69,47	74,74	81,05	24,32	17,17	13,67	10,67	77,06	83,80	87,10	89,93
12	66,36	69,39	76,53	80,61	22,91	16,97	12,90	9,54	77,97	83,68	87,60	90,83
13	65,31	70,41	77,55	82,65	23,02	14,09	15,89	7,45	76,98	85,91	84,11	92,55
14	56,67	68,89	77,78	77,78	24,63	15,50	15,51	10,00	76,54	85,24	85,23	90,48
15	66,96	35,65	78,26	83,48	26,76	18,72	16,34	10,56	75,67	82,98	85,15	90,40

Anexo 19: Análisis descriptivo realizado a los resultados experimentales donde se muestra la media, desviación estándar y coeficiente de variación para las tres variables respuesta, según el tipo de floculante y sus concentraciones

Floculante: Quimifloc												
	Velocidad de sedimentación				% de turbidez				% de compactacion			
	2 ppm	4 ppm	6 ppm	8 ppm	2 ppm	4 ppm	6 ppm	8 ppm	2 ppm	4 ppm	6 ppm	8 ppm
Media	4,45	5,31	4,96	5,38	16,13	14,40	23,53	10,13	15,13	17,00	20,20	17,33
Desv. Std.	0,14	0,08	0,06	0,09	1,36	1,68	2,33	1,46	1,73	1,13	0,94	1,35
Coef. Var.	3,05	1,41	1,29	1,63	8,40	11,68	9,88	14,38	11,41	6,67	4,66	7,76
Floculante: Kebo												
	Velocidad de sedimentación				% de turbidez				% de compactacion			
	2 ppm	4 ppm	6 ppm	8 ppm	2 ppm	4 ppm	6 ppm	8 ppm	2 ppm	4 ppm	6 ppm	8 ppm
Media	3,61	3,72	4,20	4,69	30,47	71,40	53,67	42,40	22,00	25,80	31,47	27,33
Desv. Std.	0,14	0,19	0,26	0,19	1,64	2,41	1,99	1,88	1,93	1,42	2,23	1,68
Coef. Var.	3,93	5,22	6,24	4,02	5,39	3,38	3,70	4,44	8,76	5,52	7,09	6,13
Floculante: Zuker												
	Velocidad de sedimentación				% de turbidez				% de compactacion			
	2 ppm	4 ppm	6 ppm	8 ppm	2 ppm	4 ppm	6 ppm	8 ppm	2 ppm	4 ppm	6 ppm	8 ppm
Media	3,75	4,15	4,93	5,07	34,87	27,13	23,13	17,20	16,80	27,87	24,47	19,07
Desv. Std.	0,16	0,04	0,03	0,03	2,47	2,00	1,77	1,82	1,61	1,77	1,51	1,79
Coef. Var.	4,32	0,94	0,64	0,68	7,10	7,35	7,64	10,58	9,60	6,34	6,15	9,40

Nota: Las concentraciones expresadas en ppm equivalen a mg/L.

Anexo 20: Costos de cada floculante durante una zafra de 150 días

Dosis	2	4	6	8
Molida horaria	3 500	3 500	3 500	3 500
Floculante aplicado al día (g)	7 000	14 000	21 000	28 000
Floculante aplicado al día (kg)	7	14	21	28
Días de zafra	150	150	150	150
Floculante Zafra (kg)	1 050	2 100	3 150	4 200
Floculante Zafra (t)	1,05	2,1	3,15	4,2
Precio Quimifloc 400 (\$/t)	12 000	12 000	12 000	12 000
Gastos en Quimifloc 400 (\$)	12 600	25 200	37 800	50 400
Precio Kebofloc 402 (\$/t)	4 000	4 000	4 000	4 000
Gastos en Kebofloc 402 (\$)	4 200	8 400	12 600	16 800
Precio Zukerfloc 400 C Plus (\$/t)	6 000	6 000	6 000	6 000
Gastos en Zukerfloc 400 C Plus (\$)	6 300	12 600	18 900	25 200

Anexo 21: Parámetros determinados industrialmente al jugo con la aplicación de los floculantes Quimifloc 400 y Zukerfloc 402

Floculante Quimifloc 400 aplicado a 2 mg/L								
Dias	Turbidez (%)				Porcentaje de remoción de turbidez (%)			
1	17	21	23	33	79,76	77,41	54,06	62,06
2	22	31	17	19	78,21	75,20	80,89	79,34
3	15	21	16	13	85	81,57	82,97	85,22
4	13	17	21	27	87,12	85,65	75,86	76,72
5	19	14	30	25	77,90	86,27	75,80	76,89
6	23	37	12	21	77	72,59	88,46	77,41
Dias	Color(%)				Porcentaje de decoloración (%)			
1	15,41	12,32	10,57	20,14	44,56	59,73	77,22	33,11
2	14,17	13,50	9,70	10,10	44,90	56,64	59,80	65,49
3	8,34	11,91	8,14	13,10	68,99	61,12	63,83	52,08
4	11,40	15,62	21,04	8,03	54,41	43,24	34,53	53,31
5	21,04	19,51	23,13	10,08	36,51	39,79	14,55	52,43
6	21,59	23,17	8,11	15,33	31,67	17,33	59,59	31
Floculante Zukerflocfloc 400 C Plus aplicado a 4 mg/L								
Dias	Turbidez (%)				Porcentaje de remoción de turbidez (%)			
1	15	19	12	19	86,75	93	95	87,83
2	13	24	21	19	74,64	83,48	85,30	89,10
3	15	9	12	17	89,61	78,93	83,20	87,38
4	20	18	28	15	86,94	90,90	88,44	87,53
5	31	13	9	16	92,07	53,90	83,30	88,80
6	21	28	16	9	95,93	86,14	82	81,68
Dias	Color(%)				Porcentaje de decoloración (%)			
1	6,16	12,50	13,70	10,80	22,60	16,10	38,20	46,30
2	9,48	14,78	17,90	20,14	37,6	41,2	43,47	32,14
3	14,33	12,50	10,96	11,67	37,96	58,55	60,61	45,92

4	12,02	15,10	10,14	13,64	23,97	28,33	43,19	45,85
5	29,60	23,44	24,18	5,02	50,91	33,61	23,40	66,44
6	14,41	15,53	8,56	9,61	37,75	48,43	50,52	64,59