



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

**CUANTIFICACIÓN DE PÉRDIDAS INDETERMINADAS DE
SACAROSA POR INVERSIÓN QUÍMICA EN LA SECCIÓN DE
CLARIFICADORES PARA DOS TECNOLOGÍAS DE
CLARIFICACIÓN**

Itzam Adrián Morales

Asesorado por el Ing. Qco. Byron de Jesús López Maldonado

Guatemala, enero de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CUANTIFICACIÓN DE PÉRDIDAS INDETERMINADAS DE SACAROSA POR INVERSIÓN
QUÍMICA EN LA SECCIÓN DE CLARIFICADORES PARA DOS TECNOLOGÍAS DE
CLARIFICACIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ITZAM ADRIÁN MORALES

ASESORADO POR EL ING. QCO. BYRON DE JESÚS LÓPEZ MALDONADO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, ENERO 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian De León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
EXAMINADOR	Ing. David Ricardo Cerezo Toeldo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

CUANTIFICACIÓN DE PÉRDIDAS INDETERMINADAS DE SACAROSA POR INVERSIÓN QUÍMICA EN LA SECCIÓN DE CLARIFICADORES PARA DOS TECNOLOGÍAS DE CLARIFICACIÓN

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 23 de febrero de 2016.


Itzam Adrián Morales

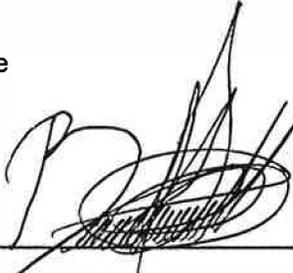
Ingeniero Carlos Wong
Director de Escuela Ingeniería Química
Universidad San Carlos de Guatemala
Presente.

Estimado Ingeniero Wong

Es un gusto poder saludarle y a la vez informarle que el Informe Final de trabajo de graduación titulado **“CUANTIFICACIÓN DE PÉRDIDAS INDETERMINADAS DE SACAROSA POR INVERSIÓN QUÍMICA EN LA SECCIÓN DE CLARIFICADORES PARA DOS TECNOLOGÍAS DE CLARIFICACIÓN”** presentado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química ITZAM ADRIÁN MORALES con carnet No. 2006 19875 y número de DPI 1958 26906 0101, fue revisado y aprobado en toda su extensión.

Sin otro particular

Atentamente



Ing. Qco. Byron De Jesús López Maldonado

Colegiado No. 1066

Asesor



Guatemala, 04 de septiembre de 2017.
Ref. EIQ.TG-IF.039.2017.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **013-2015** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Itzam Adrián Morales**.
Identificado con número de carné: **2006-19875**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

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

**CUANTIFICACIÓN DE PÉRDIDAS INDETERMINADAS DE SACAROSA POR
INVERSIÓN QUÍMICA EN LA SECCIÓN DE CLARIFICADORES PARA DOS
TECNOLOGÍAS DE CLARIFICACIÓN**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Byron de Jesús López Maldonado**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Estuardo Edmundo Monroy Benítez
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Nueva Guatemala de la Asunción, 6 de noviembre de 2017

Unidad de Lingüística
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

A quien corresponda:

Por este medio informo que he leído el trabajo de graduación: CUANTIFICACIÓN DE PÉRDIDAS INDETERMINADAS DE SACAROSA POR INVERSIÓN QUÍMICA EN LA SECCIÓN DE CLARIFICADORES PARA DOS TECNOLOGÍAS DE CLARIFICACIÓN correlativo No. 60-17, presentado por Itzam Adrián Morales, estudiante de la Escuela de Ingeniería Química, adscrita a la Facultad de Ingeniería. En dicha tesis he realizado las correcciones de redacción y estilo.

Atentamente,



Dra. Virsa Valenzuela Morales
Colegiada activa: 6,237

Virsa Valenzuela Morales
Licenciada en Letras
Colegiada No. 6237



Ref.EIQ.TG.003.2018

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **ITZAM ADRIÁN MORALES** titulado: **"CUANTIFICACIÓN DE PÉRDIDAS INDETERMINADAS DE SACAROSA POR INVERSIÓN QUÍMICA EN LA SECCIÓN DE CLARIFICADORES PARA DOS TECNOLOGÍAS DE CLARIFICACIÓN"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, enero 2018

Cc: Archivo
CSWD/ale



DTG. 027.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **CUANTIFICACIÓN DE PÉRDIDAS INDETERMINADAS DE SACAROSA POR INVERSIÓN QUÍMICA EN LA SECCIÓN DE CLARIFICADORES DE DOS TECNOLOGÍAS DE CLARIFICACIÓN**, presentado el estudiante universitario: **Itzam Adrián Morales**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, enero de 2018

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por darme el talento y la fuerza de cada día, que me permite llegar a la meta trazada. Es tu mano poderosa la que sostiene mi vida y me da la victoria.

Mis padres

Roberto Guillermo Monzón Morales (†) y María Lesbia Judith Morales Castillo (†), por dejarme un legado de perseverancia, talento, servicio y amor, que me guía cada día para dar lo mejor de mí. Siempre los llevaré en el corazón.

Mis tíos

Jesús Oliverio Arita Figueroa y Miriam Elisa Morales de Arita, que con su sublime amor guiaron mi camino, logrando forjar en mi vida el camino de la perseverancia, lucha y esfuerzo. Esta victoria es para ustedes.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Mi <i>alma mater</i> . Por enseñarme que lo mejor es siempre “ <i>id y enseñad a todos</i> ”.
Facultad de Ingeniería	Por darme las herramientas que me convierten en un profesional que puede aportar al país el progreso que se merece. En especial a la Escuela de Ingeniería Química que me instruyó en todos estos años de estudio y gracias a la cual alcanzo esta meta.
Jesús	Salvador de mi vida y de mi alma. La Gloria y la Honra sean para ti.
Ingenio Santa Ana	Por abrirme las puertas y brindarme la oportunidad de desarrollarme académica y profesionalmente. Con su apoyo logré esta meta.
Mis tíos	Padres amorosos que me guiaron con su amor y paciencia formaron en mí las virtudes que el día de hoy me permite alcanzar esta meta.

Mi hermano

Compañero de juegos, risas, travesuras, alegrías y tristezas. Por tus palabras de ánimo en medio de la confusión, ejemplo de esfuerzo y trabajo duro en medio de las derrotas y abrazos que siempre me llenarán de ánimo para seguir luchando.

Mi familia

Su ejemplo y palabras de ánimo, servicio y amor, las cuales me llenaban cada día para seguir luchando en todo momento.

Mis amigos

Por estar siempre compartiendo las victorias, afanes y fracasos de esta hermosa carrera. El café y nuestras pláticas hacían siempre la diferencia en el día. Y especialmente a Heydi Calderón, por tu inmensa ayuda en esta etapa final.

Ing. Byron Maldonado

Por su valiosa asesoría en este momento tan importante de mi carrera.

2.3.5.	Centrifugación	11
2.3.6.	Secado, enfriamiento y empaçado	11
2.4.	Proceso de clarificación	11
2.4.1.	Principales reacciones químicas en la clarificación.....	13
2.4.2.	Principales reacciones físicas en la clarificación	13
2.5.	Clarificadores	14
2.5.1.	Clarificadores multibandeja	14
2.5.1.1.	Clarificador Dorr	15
2.5.2.	Clarificadores rápidos.....	16
2.6.	Pérdidas de azúcar	18
2.6.1.	Clasificación de las pérdidas.....	18
2.6.2.	Estudio de pérdidas indeterminadas	19
2.6.3.	Pérdidas químicas de sacarosa	20
2.6.4.	Pérdidas de sacarosa en clarificación	20
2.7.	Tiempo de retención.....	23
2.8.	Métodos para determinar pérdidas por inversión de sacarosa.....	23
2.8.1.	Ecuación de Vukov.....	24
2.8.2.	Balance de cloruros en la fábrica de azúcar.....	25
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	29
3.1.	Variables	29
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	32
3.3.	Recursos humanos disponibles	32
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	33
3.4.1.	Reactivos.....	33
3.4.2.	Equipo	33
3.5.	Técnica cuantitativa.....	34

3.5.1.	Diseño preliminar	35
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	38
3.6.1.	Muestreo.....	38
3.6.2.	Diseño del tratamiento experimental	39
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	41
3.7.1.	Procesamiento de la información.....	43
3.7.1.1.	Porcentaje de azúcares reductores en jugo.....	43
3.7.1.2.	Porcentaje de cloruros en jugo	44
3.7.1.3.	Método de Vukov.....	44
3.8.	Análisis estadístico	47
4.	RESULTADOS.....	53
4.1.	Valores promedio para el porcentaje de inversión de sacarosa para las dos tecnologías de clarificación con los métodos usados	53
4.2.	Valores máximos y mínimos de pérdida de sacarosa para las dos tecnologías de clarificación con los métodos usados..	55
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	57
	CONCLUSIONES	61
	RECOMENDACIONES.....	63
	BIBLIOGRAFÍA.....	65
	APÉNDICES	67
	ANEXOS.....	77

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Molécula de sacarosa	6
2.	Molécula de glucosa.....	7
3.	Molécula de fructosa	8
4.	Clarificador RapiDorr 444.....	16
5.	Instalación de clarificador rápido	17
6.	Diseño general del método cuantitativo	36
7.	Metodología de análisis de los datos tomados en el experimento	37
8.	Gráfico de distribución de normal para el porcentaje de inversión de sacarosa en clarificador modificado para el indicador de cloruros	49
9.	Gráfico de distribución de normal para el porcentaje de inversión de sacarosa en clarificador RapiDorr para el indicador de cloruros	49
10.	Gráfico de distribución de normal para el porcentaje de inversión de sacarosa en clarificador modificado para la ecuación de Vukov	50
11.	Gráfico de distribución de normal para el porcentaje de inversión de sacarosa en clarificador RapiDorr para la ecuación de Vukov	50
12.	Pérdida diaria de sacarosa método indicador de cloruros.....	54
13.	Pérdida diaria de sacarosa método indicador de Vukov	54

TABLAS

I.	Composición del jugo de caña.....	3
II.	Variables de la experimentación.....	29
III.	Variable respuesta o de salida.....	31
IV.	Delimitación del campo de estudio acorde a la investigación	32
V.	Actividades por desarrollar en la experimentación.....	40
VI.	Datos por registrar para clarificador modificado para reducir tiempos de retención.....	41
VII.	Datos por registrar para clarificador RapiDorr	42
VIII.	Media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación del porcentaje de inversión de sacarosa	47
IX.	Media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación para libras de sacarosa invertida por día de acuerdo con los equipos analizados	48
X.	Análisis de varianza ANOVA para la comparación de datos para las dos tecnologías de clarificación con el indicador cloruros.	51
XI.	Análisis de varianza ANOVA para la comparación de datos para las dos tecnologías de clarificación con ecuación de Vukov	51
XII.	Promedio de porcentaje de inversión en clarificadores con los métodos usados.....	53
XIII.	Valores máximos y mínimos de sacarosa invertida para las dos tecnologías de clarificación en función del flujo volumétrico.....	55

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
b	Brix.
K	Constante de velocidad de inversión de sacarosa.
D	Día.
E	Error esperado.
f	Factor de Fehling.
Gal	Galones.
Gal/min	Galones por minuto.
°C	Grados celsius.
g/cm³	Gramo sobre centímetro cúbico.
h	Hora.
kg/L	Kilogramo por litro.
lb	Libra.
lb/día	Libras por día.
mL	Mililitro.
min	Minuto.
Z	Nivel de confiabilidad.
N	Número de datos.
PMCl⁻	Peso molecular de ion cloruro.
P	Pol polarimétrico.
%A.R.	Porcentaje de azúcares reductores.
%A.R./Cl⁻	Porcentaje de azúcares reductores por unidad de iones cloruro.
%Cl⁻	Porcentaje de cloruro.

%L	Porcentaje de inversión de sacarosa.
pH	Potencial de iones hidrógeno.
[Sac]	Sacarosa en solución.
t	Tonelada.
Tc	Tonelada corta.
τ	Tiempo de retención de jugo.
V	Volumen.

GLOSARIO

Azúcares invertidos	Monosacáridos separados de glucosa y fructosa que resultan de la hidrólisis de la sacarosa.
Azúcares reductores	Glucosa y fructosa denominadas así debido a que su grupo carbonilo está disponible. Esta disponibilidad se refiere a que puede reaccionar y reducir al catión Cu^{+2} , hasta cobre en estado de oxidación +1. A la reacción entre azúcares reductores y el ion Cu^{+2} se le llama reacción de Fehling.
Brix	Concentración porcentual de sólidos solubles en materiales azucarados. Para soluciones que contienen únicamente sacarosa y agua, Brix es igual al porcentaje en masa de sacarosa.
Clarificador	Equipo para separación por sedimentación de los sólidos suspendidos en soluciones de azúcar turbias.
ICUMSA	Comisión Internacional para la Unificación de Métodos para Análisis de Azúcar.
Jugo clarificado	Jugo obtenido de los clarificadores, también conocido como jugo claro. El cual previamente ha pasado por procesos químicos y decantación para remover sólidos coloidales en suspensión.

Pol

Contenido de sacarosa aparente expresado como porcentaje de masa, medido a partir de la rotación óptica de luz polarizada al pasar por una solución azucarada. Este procedimiento es exacto únicamente para soluciones de sacarosa puras.

Sacarosa

El compuesto químico puro $C_{12}H_{22}O_{11}$ que es conocido como azúcar blanco, generalmente medido por polarización en caso de soluciones puras y con HPLC en caso de soluciones de baja pureza. El nombre químico es β -D-Fructofuranosil α -D-glucopiranosido.

RESUMEN

El trabajo elaborado en el ingenio fue realizado con el propósito de comparar dos tecnologías de clarificación del jugo. El objetivo del trabajo fue determinar qué tecnología de clarificación posee menor pérdida por inversión química de sacarosa debido al tiempo de retención que los equipos poseen en relación a su volumen operacional y tecnología para la remoción de las impurezas que el jugo trae en la extracción de la caña en los molinos.

Para realizar este análisis se desarrolló un muestreo para evaluar los dos tipos de tecnología de clarificación que posee el ingenio. Actualmente, posee seis clarificadores, dos modificados para reducir tiempos de retención y cuatro RapiDorr de cuatro bandejas denominados clarificadores cuatro-cuatro-cuatro.

Así mismo, se utilizaron dos métodos para cuantificar el azúcar que se pierde debido a inversión química de la sacarosa. Se utilizó un método cuantitativo que posee un indicador, para este análisis se usó el cloruro presente en el jugo, el cual se mantiene casi constante en toda la operación de la fabricación de azúcar debido a que este compuesto no conlleva ninguna reacción química para la producción de azúcar.

Este método fue comparado con el de Vukov el cual es un método analítico que se basa en la cinética de la conversión de sacarosa en sus dos componentes: fructosa y glucosa, que relaciona esta cinética con el tiempo de retención del jugo de caña en los clarificadores. Los resultados permitieron observar la tendencia que tuvieron ambas tecnologías de clarificación en relación con los dos métodos trabajados.

OBJETIVOS

General

Determinar pérdidas indeterminadas a partir del cálculo de porcentaje de pérdidas químicas de sacarosa en dos tipos de clarificadores de diferente tecnología.

Específicos

1. Crear un protocolo de muestreo para cada tecnología de clarificación, para identificar un mismo lote de proceso a la entrada y salida de los equipos.
2. Determinar la inversión química de sacarosa de dos tipos de clarificadores, por medio de la aplicación de los métodos de Vukov y A.R./Cloruros.
3. Comparar qué tecnología posee mayor cantidad de inversión química de sacarosa.

HIPÓTESIS

Las pérdidas por inversión química de sacarosa en la sección de clarificación del ingenio están relacionadas directamente en su mayoría por el tiempo de retención del jugo en los clarificadores. Por lo tanto, los clarificadores con mayor tiempo de retención poseen mayor inversión química de sacarosa.

Hipótesis estadística

Hipótesis nula (H₀)

No existe mayor inversión química de sacarosa al tener un mayor tiempo de retención del jugo en el clarificador.

Hipótesis alternativa (H_a)

Existe mayor inversión química de sacarosa al poseer un mayor tiempo de retención del jugo en el clarificador.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el azúcar es un producto alimenticio de consumo masivo a nivel mundial debido a que es una fuente importante de energía y, además, imprime a los alimentos un sabor dulce agradable al paladar.

El azúcar químicamente tiene el nombre de sacarosa, la cual está formada por los monosacáridos glucosa y fructosa. La sacarosa es el producto de la fotosíntesis en la mayoría de las plantas. A nivel industrial se extrae en su mayoría de la caña de azúcar y remolacha. En Guatemala, la producción de sacarosa proviene totalmente de la caña de azúcar. Guatemala posee una alta producción de azúcar siendo uno de los principales productos de exportación del país. La extracción del jugo de la caña y la purificación, concentración y producción de sacarosa como cristales de azúcar ha avanzado a lo largo de los años convirtiéndose en un rubro de gran productividad a nivel agroindustrial en el país.

La importancia de mejorar el control en la producción de sacarosa ha generado la necesidad de desarrollar el área de investigación en todo el proceso agroindustrial. Para cumplir este propósito, el gremio nacional azucarero ha creado el Centro guatemalteco de investigación y capacitación de la caña de azúcar, el cual cuenta con un departamento de investigación industrial. Como parte del plan operativo del programa de investigación industrial de CENGICAÑA se decidió realizar la investigación para cuantificar las pérdidas por inversión de sacarosa en los equipos clarificadores. El estudio se enfocó en cuantificar las pérdidas por inversión química en dos tecnologías de clarificación disponibles en el ingenio, las cuales son: clarificador RapiDorr y

clarificador modificado para bajos tiempos de retención. Cada tecnología difiere entre otras cosas, en el tiempo de retención del jugo, lo cual puede ser un factor determinante para la reacción de inversión química de sacarosa.

Para el cálculo de dichas pérdidas, se decidió aplicar dos métodos analíticos estandarizados. El primero es el de Vukov, el cual se basa en la velocidad de reacción en que la sacarosa se separa en sus dos monosacáridos (glucosa y fructosa), por los efectos del pH, la temperatura de operación y tiempo de retención.

El segundo método utilizado fue el A.R./Cloruros, el cual se basa en un balance de masa donde la cantidad de cloruros se mantiene constante a lo largo del proceso de clarificación y, por lo tanto, se logra determinar los cambios en la cantidad de porcentaje de sacarosa invertida. De esta forma se establece un indicador de pérdida.

Se ha establecido que los compuestos inorgánicos como cloruros, potasio y sodio, no sufren ninguna conversión química a lo largo del proceso de fabricación del azúcar. Tradicionalmente, se ha utilizado el Brix como base de cálculo para determinar pérdidas, sin embargo, investigaciones recientes han determinado que el valor de Brix en el jugo es muy inestable debido a los cambios que sufre en relación con la cantidad de sólidos disueltos agregados a la solución.

El propósito de realizar esta investigación es analizar tendencias en el comportamiento de las dos tecnologías de clarificación para determinar cuál de las dos posee una menor pérdida

1. ANTECEDENTES

El tiempo de retención en los equipos de clarificación es uno de los temas más discutidos actualmente en la industria azucarera debido a que ya se ha determinado que el tiempo que pasa el jugo en los equipos afecta grandemente la inversión química de la sacarosa, lo que produce pérdidas en la recuperación de azúcar en base al rendimiento total que se evalúa actualmente en los ingenios de Guatemala y mayormente en Centroamérica.

Un estudio realizado por P.G. Wright en su investigación *Evaluación comparativa en fábricas de azúcar de caña (benchmarking in cane sugar factories)*, comenta que las pérdidas indeterminadas normalmente están dadas por la inversión o destrucción de sacarosa que se da en los diferentes procesos (clarificación, evaporación y cocimiento), lo que indica que las pérdidas mayormente se dan por la residencia del jugo en el proceso de clarificación.

En su tesis *Diseño e implementación de clarificador de bajo tiempo de retención (design and implementation of a very short retention time filtrate clarifier)* para la obtención del título de maestro en ciencias B.S., Santiago Alfredo Grimaldo basa su proyecto en obtener los mismos resultados en turbidez y color, reduciendo el tiempo de retención para evitar pérdidas de la sacarosa en el proceso.

En el estudio *Mejora del control de las pérdidas de sacarosa y clarificación de la turbidez del jugo con sacarato de calcio en alcalizado en caliente para la clarificación de jugo de caña y la comparación con lechada de cal (improved control of sucrose losses and clarified juice turbidity with lime saccharate in hot*

lime clarification of sugarcane juice and other comparisons with milk of lime)
realiza el comparativo en el uso de sacarato de calcio y lechada de cal. Analiza de igual manera las pérdidas de sacarosa debido a la inversión en ambos procesos. Para evaluar la pérdida de sacarosa evalúa la relación de glucosa/Brix a la entrada salida del proceso de clarificación junto con la relación de sacarosa/Brix del proceso, el cual es uno de los parámetros que se calcularon en esta investigación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Jugo de caña

El jugo de caña es el principal componente de esta. Es la materia prima que ingresa a la fábrica y que sufre todos los procesos que involucran el proceso de fabricación de azúcar. Lo que se busca recuperar es la sacarosa.

2.1.1. Composición del jugo de caña

“Desde un punto de vista fisicoquímico, el jugo crudo de los molinos es un dispersoide compuesto de materiales en todos los grados de dispersión, desde partículas bastante gruesas hasta iones”.¹

Tabla I. Composición del jugo de caña

Constituyentes del jugo	Sólidos solubles (%)
Azúcares	75 – 92
Sacarosa	70 – 88
Glucosa	2 – 4
Fructosa	2 – 4
Sales	3,0 – 4,5
Ácidos inorgánicos	1,5 – 4,5
Ácidos orgánicos	1,0 – 3,0

¹ HONIG, Peter. *Principios de tecnología azucarera*. p. 439.

Continuación de la tabla I

Constituyentes del jugo	Sólidos solubles (%)
Ácidos orgánicos	1,5 – 5,5
Ácidos carboxílicos	1,1 – 3,0
Amino ácidos	0,5 – 2,5
Proteínas	0,5 – 0,6
Almidones	0,001 – 0,100
Gomas	0,30 – 0,60
Ceras, lípidos, fosfátidos	0,05 – 0,15
Otros	3,0 – 5,0

Fuente: CHEN, James C.P. *Cane sugar handbook*. p. 27.

Como se muestra en la tabla I, el principal componente del jugo de caña es la sacarosa. En el jugo de caña ocurre una transformación química de la sacarosa en sus dos componentes constitutivos: glucosa y fructosa. “En un sentido químico, inversión significa el cambio de la actividad óptica dextro rotatorio a levo rotatorio”.² Este término se originó del cambio rotacional seguido de la hidrólisis ácida de la solución de sacarosa cuando una fuerte sacarosa dextro rotatoria se invierte a levo rotatoria resultando en una mezcla de glucosa y fructosa.

La inversión de la sacarosa en el jugo se da naturalmente y está causada principalmente por actividad enzimática y bacteriana. En el proceso de azúcar la

² CHEN, James C.P. *Cane sugar handbook*. p.27.

inversión está más enfocada en la temperatura del proceso y el control del pH del jugo.

2.1.1.1. Componentes inorgánicos del jugo de caña

Dentro de los componentes del jugo de caña se encuentra las dispersiones iónicas. Estas se denominan cenizas, las cuales son concentradas a lo largo del proceso. Ciertos componentes inorgánicos como fosfatos, sílices y magnesio son parcialmente removidos por la clarificación. Al contrario, el potasio, cloruro, sodio y baja concentración de sulfatos no son removidos, los cuales tienden a concentrarse con el proceso.

2.2. Azúcares

Su fórmula general es $(CH_2O)_n$, donde el oxígeno e hidrógeno se encuentran en la misma proporción que en el agua, de ahí su nombre clásico de hidratos de carbono, aunque su composición y propiedades no corresponden en absoluto con esta definición. Pueden clasificarse como azúcares sencillos (monosacáridos) o complejos (disacáridos)

Los monosacáridos son sólidos, cristalinos, incoloros, solubles en agua y de sabor dulce. Químicamente son polihidroxialdehídos o polihidroxicetonas y responden a la fórmula empírica $(CH_2O)_n$ en el que n tiene un valor igual o mayor que 3, siendo los más frecuentes los de 5 y 6 átomos de carbono.

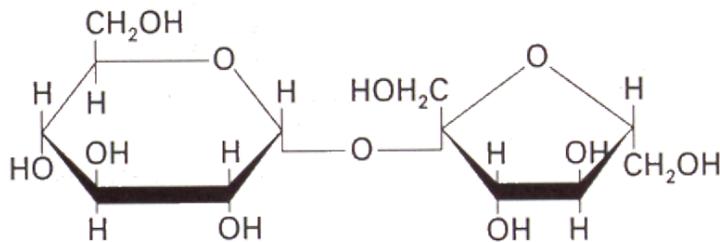
La mayoría de los monosacáridos posee uno o más átomos de carbono asimétricos y es, por tanto, molécula quiral; propiedad de los azúcares que ocasiona la rotación del plano de luz polarizada. Esta permite la determinación de la presencia de azúcares en jugos y productos de la fabricación de azúcar.

2.2.1. Sacarosa

La sacarosa es un carbohidrato de fórmula general $C_{12}H_{22}O_{11}$; es un disacárido que consiste en dos compuestos monosacáridos: D-glucosa y D-fructosa. Es el principal componente del jugo de caña.

La hidrólisis de la sacarosa hace que se separe en sus dos componentes monosacáridos por el cambio neto de rotación óptica. La hidrólisis, como ya se indicó, puede darse por una actividad microbiana o enzimática (invertasa) así como los efectos de pH y temperatura.

Figura 1. Molécula de sacarosa



Fuente: MORRISON, Robert. *Química orgánica*. p. 1308.

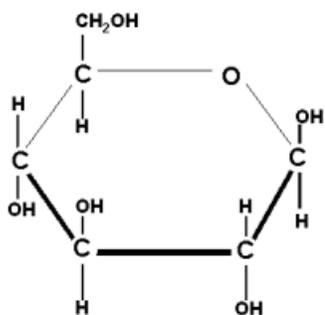
2.2.2. Azúcares reductores

Los azúcares reductores se caracterizan por su habilidad para reducir los iones metálicos como los del cobre (Cu^{++}). Todos los monosacáridos son azúcares reductores. La característica de la reducción del monosacárido radica en la presencia de un grupo carbonilo libre, el cual es oxidado y genera un grupo carboxilo. Por lo tanto, aquellos azúcares con un grupo carbonilo se encuentran combinados en unión glucosídica y se conocen como azúcares no reductores.

2.2.2.1. Glucosa

La glucosa es un monosacárido con fórmula molecular $C_6H_{12}O_6$, la misma que la fructosa, pero con diferente posición relativa de los grupos $-OH$ y $O=$. Es una hexosa, contiene 6 átomos de carbono, y es una aldosa. El grupo carbonilo está en el extremo de la molécula. Es la fuente principal de energía de las células, mediante la degradación catabólica, y es el componente principal de los polímeros de importancia estructural como la celulosa.

Figura 2. Molécula de glucosa



Fuente: MORRISON, Robert. *Química orgánica*. pág. 1284.

La glucosa se presenta en solución en tres formas y todas pueden aparecer al mismo tiempo. La cadena tiene libre el grupo aldehído y reduce una solución alcalina de sales cúpricas, que da un resultado positivo para la prueba de azúcares reductores.

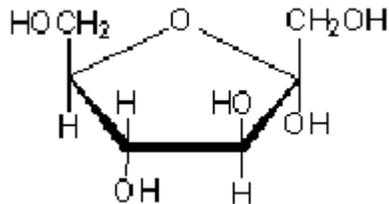
2.2.2.2. Fructosa

Denominada azúcar de frutas, la fructosa es más dulce que la sacarosa y la glucosa; de las tres es la menos abundante en la caña. A semejanza de la

glucosa, es más abundante en las partes en crecimiento de la planta y menos abundante en la parte inferior del tallo y las raíces.

La fórmula de la fructosa es la misma que la glucosa ($C_6H_{12}O_6$) y el peso molecular es 180.20 g/mol. Al igual que la glucosa, la fructosa es un azúcar reductor, pero posee un grupo cetona en lugar de un grupo aldehído.

Figura 3. **Molécula de fructosa**



Fuente: MURRAY, Robert. *Química orgánica*. p. 159.

2.3. **Proceso de fabricación de azúcar de caña**

Las etapas del proceso de fabricación de azúcar son: la extracción de jugo en molinos, clarificación, evaporación, cocimiento, centrifugación, secado, enfriamiento y envasado.

2.3.1. **Extracción del jugo**

Es la primera etapa del proceso de la fabricación, luego de haber pasado por el preparado de la caña a través de precuchillas, picadoras y desfibradoras las cuales permiten que los molinos extraigan la mayor cantidad del jugo que la

caña posee. “El objetivo de la molienda de la caña es separar el jugo que contiene sacarosa del resto de la caña, constituido principalmente por fibra”.³

La extracción del jugo se realiza en lo que se denomina tándem, compuesto generalmente por cinco molinos. Para ayudar a la extracción en los cinco molinos es el agregado del jugo del molino anterior a la fibra de caña que será agregado al molino, sin contar el jugo del molino número uno y al final en el molino 5 es agregada el agua de imbibición. Así se extrae por lixiviación el azúcar en la fibra de caña.

Un parámetro importante por manejar es la cantidad de humedad y Pol que posee la fibra de caña que sale del último molino para así tener la menor pérdida de sacarosa en el bagazo que se lleva a las calderas para la producción de energía eléctrica.

2.3.2. Clarificación del jugo

Luego de darse la extracción el jugo primario del primero molino y el jugo del resto de los molinos es mezclado, ahí posee un color oscuro y un pH ácido, pasa por un calentamiento denominado precalentamiento para que este sea llevado a las torres de sulfatación. Al final de las torres, se le agrega la cal en forma de lechada de cal. Actualmente, otros ingenios utilizan sacarato de cal, este proceso regula el pH del jugo y de esta manera se evita la inversión de la sacarosa por efectos de bajo pH en él jugo. Luego de pasar por dos calentadores que lo llevan a una temperatura arriba del punto de ebullición del agua, este se dirige al tanque flash donde extrae vapor y gases incondensables para luego pasar a los clarificadores. Tal como se indica “el objetivo principal de

³ REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. p. 117

la clarificación es remover la máxima cantidad de impurezas del jugo, específicamente partículas, en su etapa más temprana posible”.⁴

2.3.3. Evaporación

El jugo que sale de los clarificadores posee la misma composición que el jugo que se extrae en el área de molinos, la única diferencia que ya no posee las impurezas que sí tenía el jugo primario. Este jugo es llevado a celdas de calentamiento denominados evaporadores. Pasa por una cantidad de evaporadores conectados en serie de modo que cada evaporador subsiguiente tiene un grado menor de presión permitiendo que el jugo evapore cada vez más a menor temperatura.

El vapor que se extrae del jugo de un evaporador hierve el jugo en el siguiente, formando así una evaporación de múltiple efecto. Al jugo que sale del último efecto se le denomina meladura, el cual contiene un 65 % de solidos disueltos y el 35 % restante es agua.

2.3.4. Cocimiento

El cocimiento se da en evaporadores de un solo efecto denominado tacho. Estos equipos funcionan a una presión de vacío de aproximadamente 25 inHg lo que permite que hiervan a una menor temperatura que la ebullición del agua. De esta manera la meladura se concentra para que quede saturado de azúcar y con el agregado de semilla que permite la cristalización y formación del grano de azúcar.

⁴CHEN, James C.P. *Cane sugar handbook*. p.106

Con la ayuda del personal experto el grano de azúcar a partir de dos procesos de concentración y centrifugado llega al tamaño adecuado de tal manera que se llega lo que se denomina masa de primera que cae al llegar al punto adecuado de Brix y tamaño del grano. Esta masa es descargada al recibidor, donde se está en agitación continua a la espera de pasar al área de centrifugas.

2.3.5. Centrifugación

La masa de primera se descarga directamente a las centrifugas. Las centrifugas son equipos industriales utilizados para las operaciones de separación del grano y la miel por medio de las fuerzas centrífugas generadas por las altas velocidades de rotación.

2.3.6. Secado, enfriamiento y empaçado

Para disminuir el porcentaje de humedad del azúcar, se cuenta un secador rotativo inclinado al cual se le inyecta aire caliente a contracorriente. Luego del secador pasa por un proceso similar únicamente que esta vez el aire se encuentra a una temperatura aproximada de 110°F. Al obtener el azúcar con una temperatura adecuada, se conduce a la línea de envasado y se almacena en la bodega de producto terminado.

2.4. Proceso de clarificación

Como ya se indicó en la sección 2.1 el jugo de caña está compuesto por una gran cantidad de constituyentes, las cuales son elementos que en su mayoría no colaboran con una buena obtención de sacarosa en forma de cristales de azúcar. La clarificación es uno de los procesos más importantes en

la fabricación de azúcar debido a que este proceso permite tener mejores procesos subsecuentes para la obtención de sacarosa en forma de cristales de azúcar. “La función principal de la clarificación es separar las partículas insolubles del jugo alcalizado”⁵.

Los objetivos de la clarificación son:

- Formación de flocs que atrapen materia suspendida que pueda sedimentarse a velocidad satisfactorias.
- Proporcionar las condiciones de temperatura, pH y concentración de iones que maximizan la precipitación de impurezas.
- Producir jugo clarificado de buena calidad, con mínima turbiedad, y bajo contenido de calcio (Ca⁺⁺).
- Producir un lodo sedimentado que sea apto para su posterior procesamiento (filtrado).

Un buen proceso de clarificación no solo debería producir un buen jugo claro, sino también tener bajo tiempo de retención y una eficiente remoción de lodos para reducir las pérdidas por inversión.

Antes de llegar a los equipos de clarificación el jugo debe pasar por dos etapas previas: sulfitación y alcalinización. El hidróxido de calcio agregado en la etapa de alcalinización cumple dos funciones principales. La primera, es neutralizar el pH del jugo luego de la sulfitación, donde se genera una caída de pH que favorece la inversión química de la sacarosa.

La segunda función es provocar una reacción entre los fosfatos inorgánicos del jugo y los iones de calcio lo que da como resultado una sal

⁵ CHEN, James C.P *Cane sugar handbook*. p. 131

insoluble que atrapa en su mayoría los sólidos suspendidos que forma el lodo que será separado para su posterior procesamiento. El método anteriormente descrito es uno de los más simples y económicos por lo cual tiende a ser muy efectivo y usado en los ingenios. Este método se denomina eliminación por defecación.

2.4.1. Principales reacciones químicas en la clarificación

Dentro de las reacciones químicas más importantes que ocurren está la formación de los flocs la cual tiene como base el fosfato de calcio $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, sal inorgánica formada por el fosfato del jugo y el calcio de la lechada de cal, y la desnaturalización de las proteínas presentes en el jugo. Existe también la inversión de sacarosa a pH bajos y elevadas temperaturas que generan mayor cantidad de azúcares reductores por inversión química ayudados por altos tiempos de retención en los clarificadores.

Algunos ácidos inorgánicos como el fosfato, silicatos y fosfatos son eliminados parcialmente por la adición del ion calcio (Ca^{++}). Las sales inorgánicas como el K^+ , Na^+ y Cl^- no sufren cambios significativos debido a la clarificación. Los componentes orgánicos como ceras, gomas y pectinas generalmente son desnaturalizadas al igual que las proteínas debido al calentamiento.

2.4.2. Principales reacciones físicas en la clarificación

La principal reacción física ocurrida en la clarificación es la formación de los flocs que atrapan y decantan las impurezas que no son útiles para la obtención de sacarosa. La base de la formación de los flocs es la sal inorgánica difosfato de tricalcio ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) y las proteínas. Actualmente, la formación de

los flocs está influida por gran parte de la presencia de cationes multivalentes (Ca^{++} , Al^{+++} , etcétera) y el uso de floculantes. Los floculantes son polímeros de acrilamida que forman cadenas de alto peso molecular. Estas características ayudan a la efectividad del floculante la cual es muy variada. La turbidez del jugo debido a coloides y otras partículas no removidas son indeseables en el jugo ya que esto influye en una menor calidad del azúcar.

2.5. Clarificadores

Luego de que el jugo ha recibido el tratamiento deseado, debe dejarse decantar con el objetivo de sedimentar el jugo clarificado de los precipitados que han sido formados. La decantación se realiza utilizando sedimentadores continuos o “clarificadores”. “La función del clarificador es separar las partículas insolubles del jugo alcalizado. La efectividad de dicha remoción es principalmente denominado reducción de turbidez”.⁶ Un buen clarificador no solo debería producir un buen jugo claro, sino también debería tener un tiempo corto de retención y una eficiente remoción de lodos.

2.5.1. Clarificadores multibandeja

Antes del empleo de floculantes los clarificadores más populares fueron del tipo multibandeja, ej. Dorr, RapiDorr, ATV, Bach, Graver. Generalmente, estos se dividen en varios compartimientos superpuestos, de manera que se incrementa el área de sedimentación. Uno de los diseños más ampliamente utilizados fue el clarificador Dorr, que es un tanque cilíndrico grande provisto con un eje central que rota muy lentamente y soporta varios brazos con paletas

⁶ CHEN, James C.P *Cane sugar handbook*. p.132.

metálicas raspadoras que barren lentamente el fondo de cada compartimiento o bandeja.

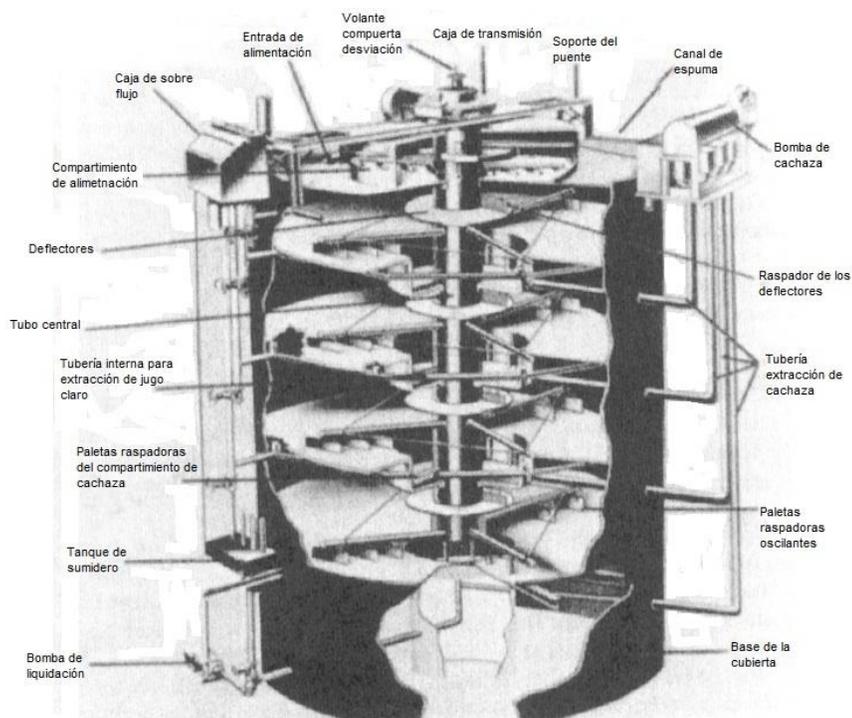
2.5.1.1. Clarificador Dorr

Actualmente algunos ingenios de Guatemala utilizan el clarificador tipo *Dorr – Oliver*. “Estos poseen cuatro compartimientos independientes de fondos cónicos y cada uno con un cabezal para la decantación del jugo clarificado y juegos de bombas de diafragma para extraer los lodos sedimentados.”⁷

El último diseño en los clarificadores Dorr-Oliver son los denominados RapiDorr 444. El diseño del clarificador RapiDorr 444 consiste realmente en dos clarificadores superpuestos de dos bandejas cada uno. El jugo es introducido en la parte alta central de cada compartimiento a través de un tubo central rotativo hueco. Una de las ventajas del diseño del clarificador RapiDorr 444 es que reduce el tiempo de retención del jugo disminuyendo de aproximadamente 215 minutos a 105 minutos.

⁷ *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala, cengicaña*. p. 340.

Figura 4. Clarificador RapiDorr 444



Fuente: CHEN, James C.P. *Cane sugar handbook*. pág. 133.

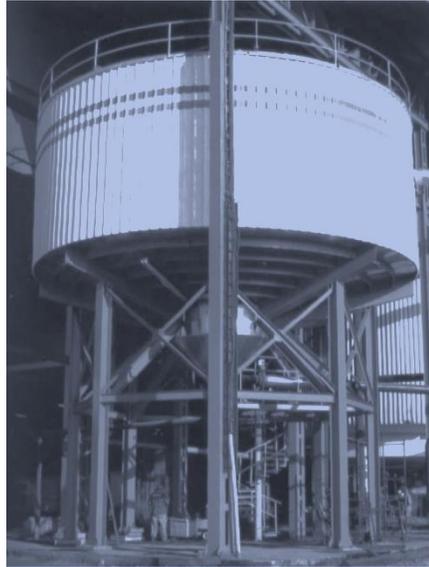
2.5.2. Clarificadores rápidos

El uso de clarificadores rápidos se ha hecho posible gracias al desarrollo y aplicación de aditivos floculantes para el control y aceleración de la coagulación del lodo y su sedimentación. Un diseño de clarificador rápido de una sola bandeja fue desarrollado inicialmente por el Instituto de Investigación de Azúcar, (SRI por sus iniciales en inglés) en la década de 1970 y ha sido muy exitoso. El diseño se enfoca en una entrada pasiva de la alimentación y un flujo

vertical de jugo uniformemente dirigido hacia arriba, donde es recogido por desborde sobre canaletas recolectoras. Durante los años se han hecho diversas modificaciones que permiten tener la máxima remoción de sólido y tener un jugo libre de sólidos suspendidos. Tiene un diseño más simple y costos considerablemente menores que los clarificadores tipo multibandeja de igual capacidad de procesamiento. Las ventajas del diseño SRI incluyen:

- Elevada capacidad por unidad de volumen instalado.
- Reducción del área transversal utilizada, con menores costos de construcción y mantenimiento.
- Sistema sencillo para remoción de lodos, fácil control del nivel de lodo, buena capacidad para espesar los lodos.
- Fácil remoción del jugo clarificado, mejor calidad del jugo clarificado.
- Bajo tiempo de retención (permite reducir pérdidas, minimizar la caída de pH, reducir el consumo de cal y una menor formación de color).
- Puede ser suministrado para nuevas instalaciones de clarificadores o la conversión de clarificadores.

Figura 5. **Instalación de clarificador rápido**



Fuente: REIN, Peter. Ingeniería de la caña de azúcar. p. 271.

2.6. Pérdidas de azúcar

Es importante el estudio de pérdidas indeterminadas y su clasificación.

2.6.1. Clasificación de las pérdidas

“Todas las pérdidas ocurridas en todos los procesos azucareros caen en dos categorías generales: determinadas e indeterminadas.”⁸ En toda fábrica de azúcar es necesario determinar la cantidad de azúcar recuperada del jugo de caña que ingresa por los molinos. Realizar un balance general es necesario para saber si en el proceso existen pérdidas por diversas causas, las cuales hacen que la sacarosa que ingresa en el jugo de caña no sea igual a lo recuperado en el producto final de sacarosa como cristales de azúcar. La diferencia entre la sacarosa que ingresa en el jugo extraído de la caña y la

⁸ MEADE, George P. *Manual del azúcar de caña*. p.757.

cantidad recuperada como cristales de azúcar se denominan pérdidas en el proceso.

Estas pérdidas están dadas generalmente de la siguiente manera:

- Masa de sacarosa en bagazo
- Masa de sacarosa en cachaza
- Masa de sacarosa en melaza

Al conocer los valores de pérdidas en cada uno de estos tres escenarios se tendrá un valor cercano al que se determinó al ingreso del jugo extraído en los molinos, pero siempre quedará una diferencia la cual se denomina pérdidas indeterminadas ya que se desconoce en qué lugar del proceso se está perdiendo a lo largo de fabricación de azúcar.

2.6.2. Estudio de pérdidas indeterminadas

En la industria azucarera es común encontrarse con balances en los cuales se encuentran valores de pérdidas indeterminadas. Estas pérdidas pueden ser reales o aparentes debido a problemas analíticos o de estimación.

Las pérdidas indeterminadas están afectadas por:

- Errores en la medición y análisis. Que se dan por estimación incorrecta en los análisis de jugo realizado a lo largo del proceso, muestreo incorrecto o no representativo.
- Pérdidas físicas. Se pueden originar por el diseño de los equipos que genera arrastres de material, arrastres por espuma, fugas, reboses, filtraciones.

- Pérdidas microbiológicas. Estas pueden ocurrir en jugos de bajo Brix a temperatura ambiente o a temperaturas elevadas cuando el medio donde se encuentra la sacarosa en solución es ácido.
- Pérdidas químicas. La mayor pérdida es probablemente por inversión, ya sea a pH bajo o a temperatura alta, aunque la descomposición térmica y las reacciones de tipo Maillard también ocasionan pérdidas.

2.6.3. Pérdidas químicas de sacarosa

Cuando la sacarosa se convierte en no – sacarosa, es una pérdida. En un sentido químico inversión significa el cambio de actividad óptica dextro rotatoria a levo rotatoria. Como se comentó en la sección anterior lo que mayormente provoca el cambio de la sacarosa es la inversión química. Por lo tanto, el término de inversión química, usado incorrectamente, significa el cambio que sufre la sacarosa por acción ácidos o sales ácidas, se convierte en una mezcla de glucosa (dextrosa) y fructosa (levulosa).

La inversión toma lugar en condiciones ácidas (pH debajo de 7.0) y el grado de inversión en las condiciones de pH varía según lo siguiente:

- A altas temperaturas, más rápida es la reacción
- Con altos tiempos de residencia se aumenta el grado de la reacción
- Bajos niveles de sacarosa en solución, es mucho más rápida la reacción

2.6.4. Pérdidas de sacarosa en clarificación

Así como se poseen pérdidas indeterminadas en el proceso de azúcar, también se trata de focalizar los puntos en donde se tienen la mayor cantidad de pérdidas aunque se sabe que durante todo el proceso existen condiciones que favorezcan estas condiciones. Las fábricas de azúcar tratan de focalizar la

cuantificación de las pérdidas en puntos “donde se tiene la mayor importancia para la viabilidad económica de la fabricación de azúcar”⁹ con lo cual se pueda poseer más control y de esta manera minimizar las pérdidas enfocadas a cada uno de los puntos establecidos. En la mayoría de fábricas de azúcar los puntos en relación con la importancia económica son:

- Pol en sacarosa, estimada en porcentaje de pol en caña.
- Pol pérdida en bagazo en porcentaje de pol en caña.
- Pol pérdida en cachaza en porcentaje de pol en caña.
- Pol pérdida en miel final, estimada en porcentaje de pol en caña.
- Pérdidas indeterminadas (debidas a pérdidas mecánicas, destrucción de pol en el proceso, error en las medidas de formulación y análisis).

Como se puede ver en la lista estos puntos se pueden ubicar en la fábrica de azúcar en las áreas de molinos, en el bagazo que sale de último molino del tándem el cual en general se quema en las calderas para producción de energía. El siguiente está ubicado en los filtros de cachaza donde el lodo que es extraído del proceso de clarificación es filtrado en filtros al vacío que extraen el jugo que lleva el lodo al momento de salir del clarificador y, por último, es el control en las centrifugas que procesan la masa de tercera que al separar el grano producido extrae todas las impurezas restantes que se arrastran en todo el proceso de fabricación de azúcar denominado miel final, la cual es material del que no puede extraerse más sacarosa para su recuperación.

De acuerdo con investigaciones previas, una de las causas de pérdida de sacarosa es la inversión química que provoca la separación en sus dos componentes constituyentes: glucosa y fructosa. La inversión de sacarosa se da en su mayoría por acción microbiológica o por reacción química favorecida

⁹ WRIGHT, P.G. *Process benchmarking in cane sugar factories*.

por condiciones de pH, temperatura y tiempo de. Estas condiciones son favorecidas generalmente en el área de clarificación. Como se explicó anteriormente, al inicio de la clarificación el jugo es sometido a dos procesos que alteran el pH del jugo de forma abrupta y después se da un cambio de temperatura calentando el jugo a punto de ebullición para ser llevados a los clarificadores donde se da la decantación.

Diversos estudios a lo largo de los años establecen que en el área de clarificadores existen pérdidas considerables por inversión química de sacarosa. Por lo que las investigaciones y las innovaciones en los ingenios alrededor del mundo se han enfocado en reducir los tiempos de retención en los clarificadores, realizando modificaciones o nuevas tecnologías que permitan la reducción del tiempo de residencia.

La realización de nuevas tecnologías se ha estado realizando en los últimos años. En muchos de los ingenios de la región se emplean los clarificadores multibandeja, los cuales poseen un alto tiempo de residencia para lograr obtener un jugo claro. Nuevas investigaciones y desarrollo llevan a realizar las mismas tareas pero reduciendo el tiempo de residencia como el clarificador SRT *short retention time*, como se señala en la investigación sobre el equipo: “Las principales ventajas del clarificador SRT son: reducir el tiempo de residencia y aumentar la capacidad por unidad de área disponible”¹⁰

Las investigaciones actuales relacionadas con la reducción de tiempo de residencia relacionan en gran manera el reducir las pérdidas por inversión de forma química de la sacarosa, así como de la degradación del material.

¹⁰ SHELKE, Nathaji. CFD. *Analysis of short retention time clarifier*.

2.7. Tiempo de retención

El tiempo de retención de los clarificadores usualmente se reporta en términos del tiempo de residencia τ , es decir, el volumen nominal del clarificador V dividido por el flujo volumétrico alimentado al clarificador que corresponde a la suma de los flujos volumétricos de jugo crudo \dot{V}_{RJ} y jugo reciclado filtrado \dot{V}_{Filtr} .

$$\tau = \frac{V}{\dot{V}_{RJ} + \dot{V}_{Filtr}}$$

Sin embargo, también existen dos tiempos de residencia por considerar el del jugo clarificado (volumen operacional arriba de la interface jugo-lodo dividido por el flujo a la salida de jugo clarificado) y aquel correspondiente a los lodos (volumen operacional bajo la interface jugo – lodo dividido por flujo de salida de los lodos).

Por lo tanto, el tiempo de residencia del jugo clarificado está dado por:

$$\tau_{CJ} = V \frac{1 - q_{Mud/V}}{\dot{V}_{CJ}}$$

Donde V es el volumen operacional total del clarificador, $q_{Mud/V}$ es la fracción de volumen operacional de la interface del lodo y \dot{V}_{CJ} es el flujo volumétrico del jugo clarificado.

2.8. Métodos para determinar pérdidas por inversión de sacarosa

Como se consideró en la sección anterior, al realizar un balance de todas las pérdidas de sacarosa que existen en la fábrica de azúcar, se llegó a la

conclusión de que existen pérdidas indeterminadas en el proceso. Dentro de las pérdidas indeterminadas uno de los causantes era la inversión de la sacarosa, causada por microorganismos o por efectos que favorecen la inversión química.

La inversión debido a factores químicos se da, en su mayoría, en el proceso de clarificación debido a las condiciones de pH y a temperatura manejadas en el proceso, favorecido por el tiempo de retención que el jugo tiene en los clarificadores, lo que le permite obtener jugo claro para los siguientes procesos de concentración y recuperación de sacarosa en forma de cristales.

2.8.1. Ecuación de Vukov

En los clarificadores existen pérdidas por inversión significativas, que se incrementan a valores bajos de pH y con mayores tiempos de retención. Durante muchos años se ha tratado de encontrar una forma de determinar estas pérdidas por inversión, un modelo aceptado actualmente es la ecuación de Vukov (1965) la cual permite predecir las pérdidas por inversión de sacarosa para un jugo con un Brix de 15.

La ecuación está dada por:

$$L = \tau \cdot e^{(-1.3823 - 2.994 \cdot \text{pH} + 0.1142 \cdot t)}$$

Donde:

- L = pérdida por inversión de sacarosa en porcentaje
- τ = tiempo de residencia en el clarificador en minutos
- pH = valor del pH a la temperatura de operación
- t = temperatura de operación en °C

Otra forma de usar la ecuación de Vukov, tomando en cuenta los datos de proceso a la entrada y salida del equipo en el que se desea determinar la cantidad de pérdida por inversión de sacarosa, es la siguiente:

$$\log(k) = 16,9 - \frac{5670}{T} - pH + \log(d - c)$$

- k = tasa de descomposición de sacarosa (min^{-1})
- T = temperatura promedio de entrada y salida del proceso (K)
- pH = pH promedio de entrada y salida del proceso
- d = densidad de la solución (kg/L)
- c = concentración de sacarosa (kg/L)

Donde:

De esta forma es posible determinar el porcentaje de inversión de sacarosa relacionado con el tiempo de retención que tiene el jugo en el equipo deseado.

2.8.2. Balance de cloruros en la fábrica de azúcar

En las fábricas de azúcar se han establecido balances de cloruros. Este balance puede ser comparado al balance de sacarosa que se realiza, y puede servir para detectar pérdidas químicas de sacarosa. El uso de iones de cloruros como trazador de pérdidas en ciertas áreas de la fábrica se debe a que los iones no son sometidos a ninguna pérdida química a lo largo del proceso de fabricación de azúcar. A igual que otros iones inorgánicos solo pueden ser eliminados por remoción física, ya sea por arrastre o por adsorción.

Un balance de masa para los iones cloruros en la fábrica debería ser tener rendimientos teóricos cercanos al 100 %. Debido a estas condiciones se puede tomar en cuenta que los iones cloruros pueden servir como parámetro para determinar pérdidas de azúcar indeterminadas en ciertas áreas de la fábrica. Diferentes parámetros han tratado de ser utilizados para medir las pérdidas de sacarosa. Tal como se indica, “Chen encontró que los métodos de caída de pureza en azúcares invertidos/Brix no son confiables debido a que el Brix se reduce cuando la sacarosa y los azúcares invertidos son usados por los microorganismos. Una mejor opción sería relacionar la sacarosa o los azúcares invertidos con las cenizas (conductividad)”.¹¹ La opción de cenizas puede ser favorable debido a que no posee destrucción química en el proceso, así mismo, si esta se ve afectada en su concentración, ya sea por el agregado de más material que contenga sales inorgánicas.

Como es el caso de la clarificación el agregado de Ca^{++} se da al momento del agregado de sacarato de calcio, lo cual puede cambiar la concentración de cenizas. Es por tanto que en este caso el concepto de usar un indicador que no se vea afectado por destrucción química y variación en su concentración en el proceso, es la mejor opción para la determinación de pérdidas de sacarosa.

¹¹ CHEN, James C.P. *Cane sugar handbook*. p. 84.

Como se indicó al inicio se tiene que los cloruros son estables en gran manera a lo largo de la fabricación de azúcar sufriendo poca pérdida y de darse se debería a efectos físicos que ocurren en la fábrica.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

En la tabla II se describen las variables utilizadas en la investigación.

Tabla II. **Variables de la experimentación**

Variable	Dimensional	Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
		Constante	Variable	Controlable	De ruido
Análisis de equipo					
Volumen operacional de clarificador	Gal	X			
Parámetros de entrada de jugo					
Flujo volumétrico	Gal/min		X		
Temperatura de jugo	°C		X		
Tiempo de retención del jugo en el clarificador	Min		X		
pH	Unidades potencio métricas		X		
Brix jugo	%		X		
Pol Refracto métrico	P		X		d

Continuación de Tabla II

Variable	Dimensional	Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
		Constante	Variable	Controlable	De ruido
Parámetros de entrada de jugo					
Azúcares reductores	%A.R.		X		
Porcentaje de cloruros	%Cl-	X			
Parámetros de salida del jugo					
Temperatura	°C		X		
pH	Unidades potenciométricas		X		
Brix jugo	%		X		
Azúcares reductores	%A.R.		X		
Porcentaje de cloruros	%Cl-		X		
Análisis ambiental					
Temperatura amb.	°C				SIE
Presión atmosférica	Bar				SIE
Humedad amb	%				SIE

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Variable respuesta o de salida**

Variable	Dimensional
Método de Vukov	
pH de operación entrada – salida	Unidades potenciométricas
Brix entrada – salida	%
Temperatura entrada – salida	°C
Tiempo de retención	min
Porcentaje de inversión de sacarosa	%
Pérdida de sacarosa en clarificador	lb/D
Método cloruros	
Pol refracto métrico (sacarosa)	%
Azúcares reductores entrada – salida	%
Cantidad de cloruros en jugo entrada – salida	%
Relación A.R./Cl-	Adimensional
Relación sacarosa/Cl-	Adimensional
Porcentaje inversión de sacarosa	%
Pérdida de sacarosa en clarificador	lb/D

Fuente: elaboración propia.

Auxiliar laboratorio de caña

Analistas especiales (2)

Ayudante de analista

3.4. Recursos materiales disponibles

A continuación se presentan los materiales disponibles.

3.4.1. Reactivos

- Reactivo de Fehling
 - Sulfato de cobre pentahidratado $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
 - Fosfato ácido de sodio Na_2HPO_4
- Oxalato de potasio monohidratado
- Octapol
- Nitrato de plata AgNO_3
- Indicador cromato de potasio
- Indicador azul de metileno

3.4.2. Equipo

- Laboratorio de fábrica del ingenio azucarero
- Laboratorio de caña del ingenio azucarero
- Potenciómetro
- Termómetro
- Polarímetro
- Refractómetro
- Planchas para calentamiento y agitación de muestras para análisis

- Bureta de 50 mL
- Balón aforado de 200 mL
- Balón aforado de 500 mL
- *Earlenmeyer* para titulación de muestras de análisis de materia prima
- Jugo alcalizado a la salida de tanque *flash* para ingresar a clarificadores
- Jugo claro proveniente de los dos tipos de clarificadores

3.5. Técnica cuantitativa

La investigación será desarrollada utilizando técnicas cuantitativas, debido a la recolección de datos mediante medición. Los datos por analizar serán a la entrada y salida del jugo en los clarificadores seleccionados para el análisis. Realizando mediciones de sus parámetros fisicoquímicos, así como de las condiciones establecidas para obtener las variables de respuesta buscadas.

Las mediciones se realizaron siguiendo los siguientes métodos:

- Método ICUMSA GS7-31 (2013): determinación de Pol por polarimetría NIR y Brix en caña de azúcar y productos de fábrica.
- Método ICUMSA GS1/2/3/4/7/8/9-23: determinación de pH con un método directo en azúcar crudo, melaza, jugos y jarabes.
- Instructivo laboratorio ingenio código 11-495-04-0206: determinación de azúcares reductores en jugos, meladuras y melaza por titulación (Fehling)
- Método de Mohr para determinación de cloruros en una solución.
- A partir de los datos obtenidos se evaluará la cantidad de sacarosa invertida en los dos tipos de tecnologías de clarificación utilizados en el ingenio.

3.5.1. Diseño preliminar

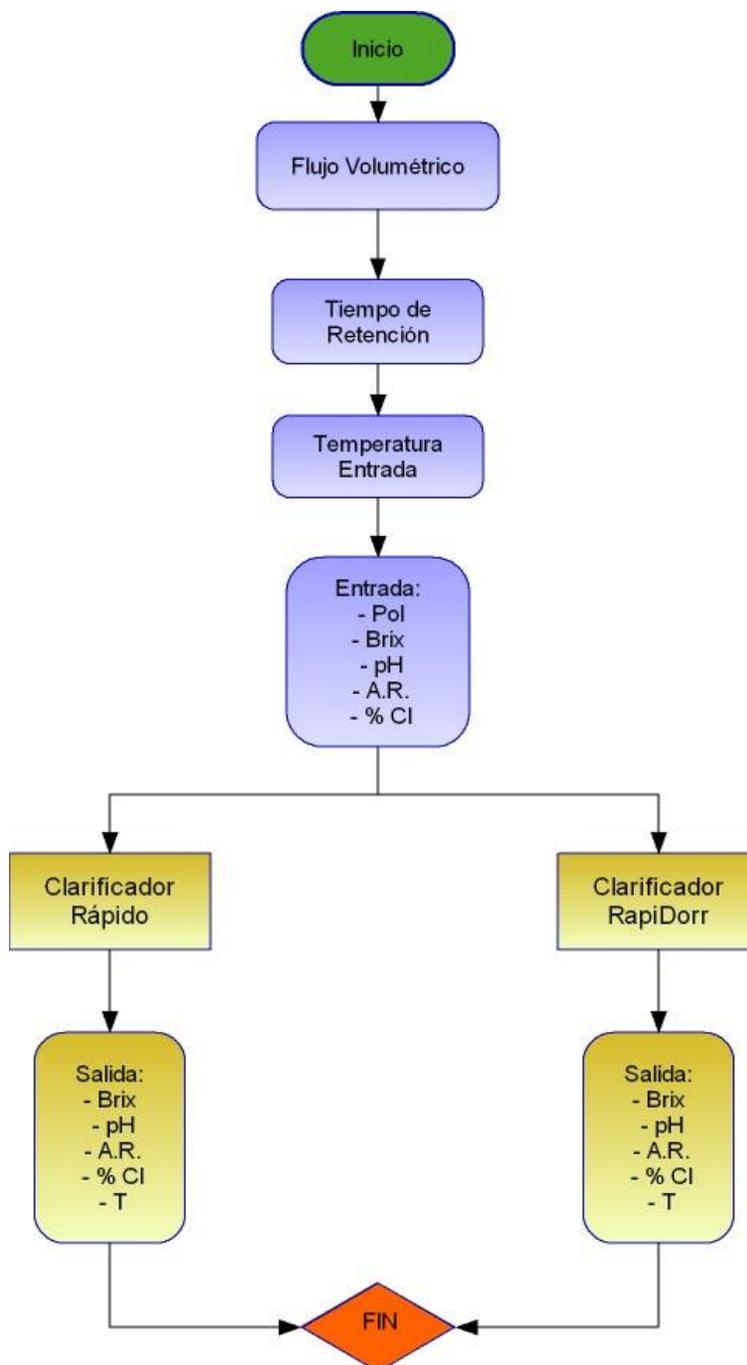
El diseño preliminar consiste primeramente en verificar que las condiciones de operación de la sección de clarificadores se mantengan estables. Debido a que son dos tipos de clarificadores, con evaluar, normalmente el ingenio para los clarificadores RapiDorr 444 se maneja un rango máximo de 650 GPM y para los clarificadores modificados, para reducir tiempos de retención, se tiene un flujo máximo de 1,110 GPM.

Por lo anterior se tomó la decisión arbitraria de que a valores por debajo de 100 GPM del rango máximo no se consideraría tomar la muestra al inicio, debido a que este tiene una alta influencia en el tiempo de retención del jugo el cual era un parámetro fundamental en la elaboración de dicha investigación.

Al tomar la muestra a la entrada del clarificador será analizada de acuerdo con los métodos descritos para su análisis. Se debe considerar el tiempo de retención obtenido en base al flujo nominal de trabajo de cada clarificador para realizar en la muestra final la cantidad de análisis útiles para la investigación.

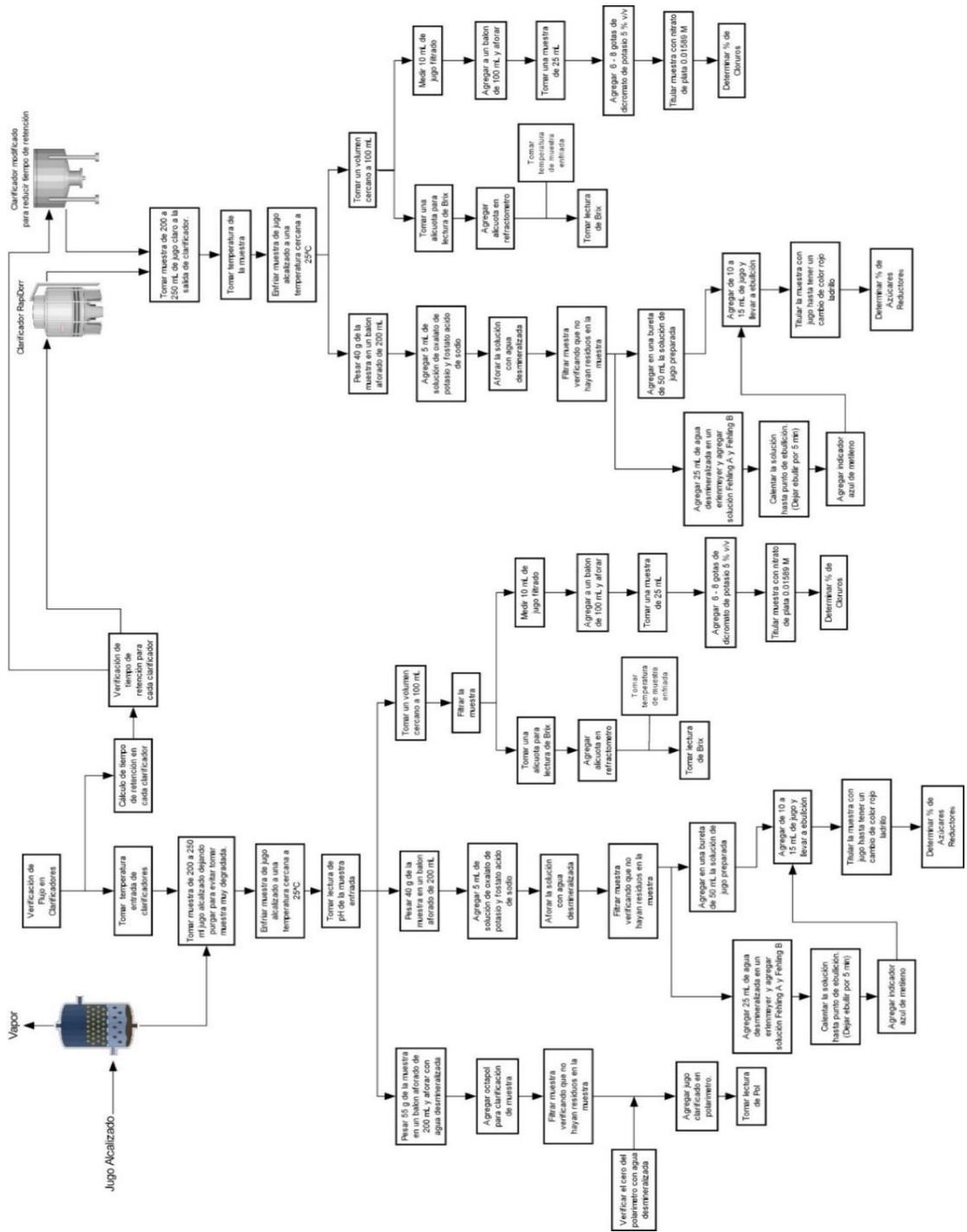
Todos los datos serán evaluados para la determinación de inversión química de sacarosa en cada clarificador en relación con su tiempo de retención.

Figura 6. Diseño general del método cuantitativo



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Metodología de análisis de los datos tomados en el experimento



Fuente: elaboración propia.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Para obtener los mejores resultados se determinó la mínima cantidad de datos por trabajar y obtener resultados significativos estadísticamente válidos y de forma significativa, así como la forma en que serían recolectados.

3.6.1. Muestreo

Para obtener resultados válidos, se planteó la forma de obtener resultados con un 95 % de nivel de confianza y con un error mínimo de 8,1 %. Se puede establecer la cantidad de datos por trabajar en relación con el nivel de confianza establecido y de esta forma el 95 % de los datos serán correctos.

$$N = \frac{Z^2 pq}{E^2}$$

Donde:

Z = confiabilidad

P = probabilidad de éxito

q = probabilidad de fracaso (1 – p)

E = error típico esperado

N = tamaño de la muestra para un nivel de confianza p

Para este caso se toman las condiciones establecidas:

Z = 1,96

P = 0,95

$$q = 0,05$$

$$E = 0,081$$

$$N = \frac{(1.96)^2 \times 0.95 \times 0.05}{0.081^2} = 28$$

El resultado obtenido muestra que debe haber un mínimo de 28 datos para obtener un nivel de confianza del 95 % esperando un error de 8,1 %.

3.6.2. Diseño del tratamiento experimental

Se evaluaron 28 muestras del material que ingresa y sale de los dos tipos de tecnología de clarificadores usados en el ingenio. Clarificador RapiDorr 444 con un tiempo de retención de 115 a 130 minutos y el clarificador modificado para reducir tiempos de retención basados en la tecnología SRI con un tiempo de retención de 45 a 52 minutos. El jugo que ingresa a los clarificadores tiene un paso previo de evaporación flash que permite regular el régimen del flujo a los clarificadores (debe poseer régimen laminar) y regular la temperatura al ingreso de los clarificadores, se maneja una temperatura aproximada de 210 °F (98.9 °C).

El material que ingresa a los clarificadores se le llama comúnmente jugo alcalizado debido a que este jugo tiene un paso previo por las torres de sulfitación la cual reduce el pH del jugo a un nivel ácido y para mantener un pH de operación cercano a la neutralidad 7.5 - 7.8 unidades de pH. Se le agrega sacarato de cal, el cual además de neutralizar la acidez tiene como función crear flóculos con el fosfato inorgánico del jugo lo que permite la clarificación del material. Por lo tanto, la muestra será tomada del tanque flash que distribuye a todos los clarificadores del área.

Con base al tiempo de retención de cada tecnología de clarificación se tomará la muestra del jugo que está saliendo por cada uno de los compartimientos de los clarificadores por investigar.

A la muestra a la entrada se le realizaran los siguientes análisis: porcentaje de sacarosa por polarimetría (pol), Brix, pH tomando la temperatura a la que se toma la lectura del análisis; porcentaje de azúcares reductores (%A.R.) y porcentaje de cloruros (%Cl⁻). Para la muestra a la salida del clarificador se realizarán los siguientes análisis: Brix, pH tomando la temperatura a la que se toma la lectura del análisis, porcentaje de azúcares reductores (% A.R.). Las actividades se listan en la tabla III

Tabla V. **Actividades por desarrollar en la experimentación**

PASO	ACTIVIDAD POR DESARROLLAR
1	Revisar datos de flujo de entrada de clarificador RapiDorr 444 y clarificador para reducir tiempos de retención
2	Determinar tiempo de retención de jugo en cada clarificador
2	Tomar muestra de jugo alcalizado a la salida de tanque flash.
3	Anotar temperatura en termómetro instalado en tubería de distribución de jugo a clarificadores.
5	La muestra se deberá dividir en tres partes para: 5.1 % de sacarosa por polarimetría (pol) 5.2 Brix 5.3 pH 5.4 Temperatura de lectura de pH 5.5 % de azúcares reductores 5.6 % de cloruros
6	Determinar que se haya cumplido el tiempo de retención para cada clarificador
7	Tomar muestra de jugo clarificado a la salida de cada clarificador

Continuación de la Tabla V

PASO	ACTIVIDAD POR DESARROLLAR
8	Tomar la temperatura de la muestra tomada de cada clarificador
9	La muestra deberá separarse en dos partes para: 9.1 Brix 9.2 pH 9.3 Temperatura de lectura de pH 9.4 % de azúcares reductores 9.5 % de cloruros

Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Se maneja un procedimiento que utilice los datos de jugo a la entrada y salida de cada tecnología de clarificación. La tabulación se basa en los datos de cada análisis en el laboratorio; cada dato, será procesado de diferente forma.

Tabla VI. **Datos por registrar para clarificador modificado para reducir tiempos de retención**

Datos Iniciales	
Hora de toma de la muestra	h
Flujo volumétrico entrada a clarificador	F_{Ej}
Flujo volumétrico salida de cachaza	F_{Sch}
Tiempo de retención	t
Muestra entrada clarificador	
Temperatura	T_E
Porcentaje de sacarosa polarimétrico	P_E
Brix	B_E
pH	pH_E
Temperatura pH	$T_{(pH) E}$

Continuación de la tabla VI.

Muestra entrada clarificador	
mL jugo	$V_{(j) E}$
mL nitrato de plata	$V_{(AgNO_3) E}$
Muestra salida clarificador	
Brix	B_S
pH	pH_S
Temperatura pH	$T_{(pH) S}$
mL jugo	$V_{(j) S}$
mL nitrato de plata	$V_{(AgNO_3) S}$

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Datos por registrar para clarificador RapiDorr**

Datos iniciales	
Hora de toma de la muestra	h
Flujo volumétrico entrada a clarificador	F_{Ej}
Tiempo de retención	t
Muestra entrada clarificador	
Temperatura	T_E
Porcentaje de sacarosa polarimétrico	P_E
Brix	B_E
pH	pH_E
Temperatura pH	$T_{(pH) E}$
mL jugo	$V_{(j) E}$
mL nitrato de plata	$V_{(AgNO_3) E}$
Muestra salida clarificador	
Brix	B_S
pH	pH_S
Temperatura pH	$T_{(pH) S}$
mL jugo	$V_{(j) S}$
mL nitrato de plata	$V_{(AgNO_3) S}$

Fuente: elaboración propia.

3.7.1. Procesamiento de la información

A continuación, se detalla cómo se obtienen los resultados para mostrar las pérdidas de sacarosa en los clarificadores analizados.

3.7.1.1. Porcentaje de azúcares reductores en jugo

Calcular el porcentaje de azúcares reductores en jugo usando la fórmula:

$$\%A. R. = \frac{f \times V \times 100}{M \times mL_{Jugo}}$$

(Ecuación 1)

Donde:

f = factor de Fehling (0.0535)*

V = volumen de aforo

M = masa de muestra

mL_{Jugo} = mililitros de jugo utilizado en la titulación

El factor Fehling puede tomar otro valor.

Ejemplo:

$M = 40$ g

$V = 200$ mL

$mL_{Jugo} = 33,1$

$$\%A. R. = \frac{0,0535 \times 200 \times 100}{40 \times 33,1} = 0,87 \%$$

3.7.1.2. Porcentaje de cloruros en jugo

Determinar el porcentaje de iones cloruros en jugo usando la fórmula:

$$\% \text{Cl}^- = \frac{1,71 \times 10^{-4} \cdot \text{mL}_{\text{AgNO}_3} \cdot \text{PMCl}^-}{V}$$

(Ecuación 2)

Donde:

$\text{mL}_{\text{AgNO}_3}$ = mililitros de nitrato de plata utilizados en la titulación

PMCl^- = peso molecular del ion cloruro (35.453)

V = volumen de muestra tomados para análisis.

Ejemplo:

$\text{mL}_{\text{AgNO}_3} = 2,7 \text{ mL}$

V = 25 mL

$$\% \text{Cl}^- = \frac{1,71 \times 10^{-4} \cdot 2,7 \cdot 35,453}{25} = 0,0657 \%$$

3.7.1.3. Método de Vukov

El método de Vukov, involucra la constante de velocidad de la inversión de la sacarosa, donde la pérdida se determinó en función de cuatro variables: concentración de sacarosa, temperatura de operación del equipo, pH dentro del equipo y tiempo de retención del jugo en cada equipo analizado. Para este análisis se tomaron ciertas consideraciones, en donde la lectura de pH se da en las condiciones de laboratorio del ingenio, por lo que debe existir una corrección

para la lectura de pH en las condiciones de operación. Por lo tanto, para determinar las pérdidas se necesita:

- Densidad por medio de la ecuación de Peacock

$$\rho = \left(1 + \frac{B(B + 200)}{540\,000}\right) \left(1 - \frac{0,036(T - 20)}{(16 - T)}\right)$$

Donde:

B = Brix

T = temperatura (°C)

(Ecuación 3)

- Concentra de sacarosa en g/cm³

$$[Sac]^{g/cm^3} = \frac{[Sac] * \rho}{100}$$

Donde:

$[Sac]^{g/cm^3}$ = concentración de sacarosa

[Sac] = porcentaje de sacarosa en jugo

ρ = densidad obtenido por ecuación de Peacock

(Ecuación 4)

- Temperatura de operación

Para la temperatura de operación se hizo el promedio de la toma de temperatura del jugo a la entrada y salida del clarificador.

$$T_{Op} = \frac{T_{Entrada} + T_{Salida}}{2}$$

(Ecuación 5)

- Determinación de Brix y pH de operación

$$B_{Op} = \frac{B_{Entrada} + B_{Salida}}{2}$$

(Ecuación 6)

$$pH_{Lab} = \frac{pH_{Entrada} + pH_{Salida}}{2}$$

(Ecuación 7)

Realizando la corrección de pH a la temperatura de operación en cada clarificador.

$$\frac{dpH}{dT} = 0,0339 + 0,015pH - 0,0017pH^2$$

(Ecuación 8)

$$pH_{Op} = pH_{Lab} + \frac{dpH}{dT} (T_{Op} - T_{Lab})$$

(Ecuación 9)

- Constante de velocidad de la inversión de sacarosa

$$\log_{10} K = 16.91 + \log_{10}(\rho - [Sac]) - \frac{5670}{T} - pH_{Op}$$

(Ecuación 10)

$$K = 10^{(\log_{10} K)}$$

- Porcentaje de pérdida de sacarosa

$$\%[Sac]_{Invertida} = 100(1 - e^{-Kt})$$

(Ecuación 11)

Donde:

$\%[Sac]_{Invertida}$ = Porcentaje de sacarosa invertida en clarificador

K = constante de velocidad de inversión de sacarosa

t = tiempo de retención de jugo en clarificador

3.8. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con base en la media de los resultados, así como la desviación típica de los datos, y relacionando con su coeficiente de variación. Así mismo, realiza un diagrama de frecuencia, gráfico de distribución normal y el análisis ANOVA para la comparación de las medias.

Tabla VIII. **Media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación del porcentaje de inversión de sacarosa**

Equipo	Media (% de inversión sacarosa)	Desviación estándar	Coeficiente de variación
Clarificador modificado indicador cloruros	1,247	0,063	49,4 %
Clarificador RapiDorr indicador cloruros	2,066	1,562	75,6 %
Clarificador modificado ecuación Vukov	0,150	0,063	41,9 %
Clarificador RapiDorr ecuación Vukov	0,620	0,324	52,2 %

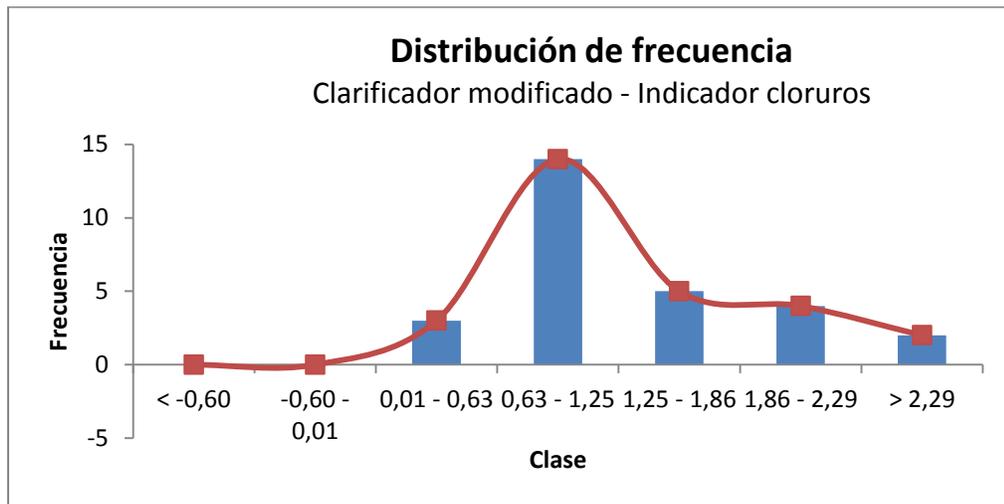
Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación para libras de sacarosa invertida por día de acuerdo con los equipos analizados**

Equipo	Flujo volumétrico nominal	Indicador	Media	Desviación estándar	Coeficiente de variación
Clarificador modificado	(1,136 – 900) gal/min	Cloruros	23520,7	11486,7	48,8 %
		Ecuación Vukov	2871,5	1354,7	47,2 %
Clarificador RapiDorr	(703 – 412) gal/min	Cloruros	17967,7	13632,7	75,9 %
		Ecuación Vukov	5746,3	2923,60	50,9 %

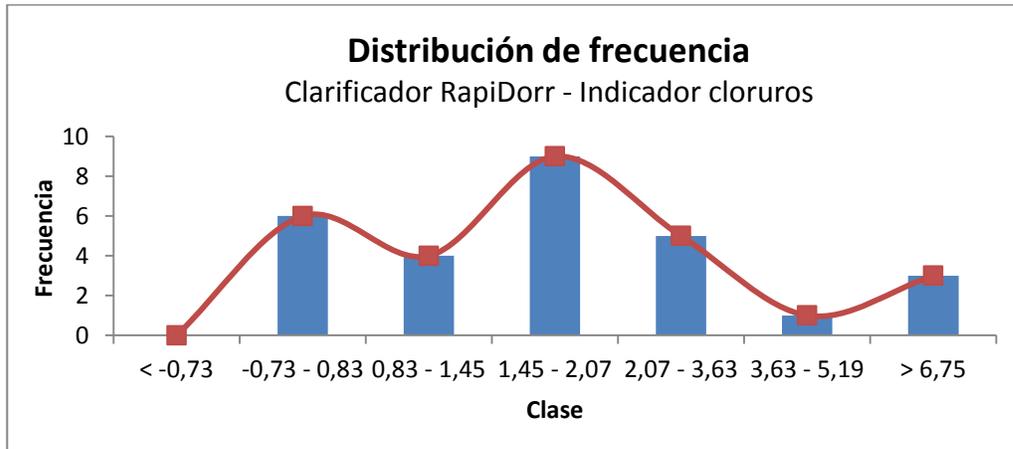
Fuente: elaboración propia, según datos de los anexos.

Figura 8. **Gráfico de distribución de normal para el porcentaje de inversión de sacarosa en clarificador modificado para el indicador de cloruros**



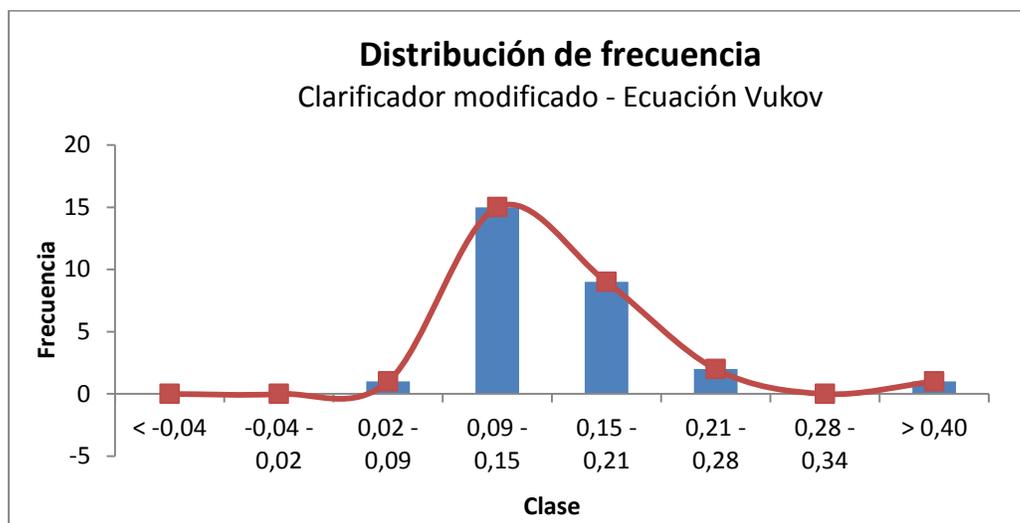
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Gráfico de distribución de normal para el porcentaje de inversión de sacarosa en clarificador RapiDorr para el indicador de cloruros**



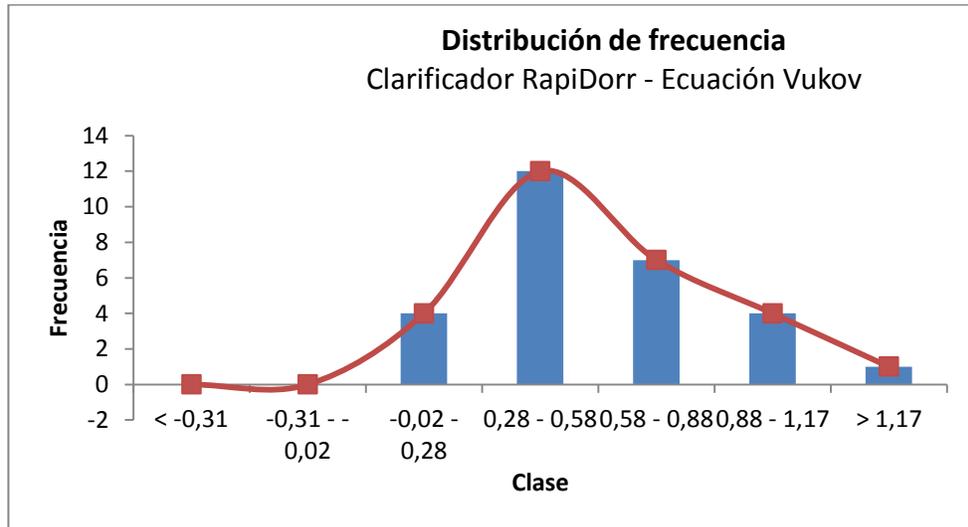
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Gráfico de distribución de normal para el porcentaje de inversión de sacarosa en clarificador modificado para la ecuación de Vukov**



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Gráfico de distribución de normal para el porcentaje de inversión de sacarosa en clarificador RapiDorr para la ecuación de Vukov**



Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Análisis de varianza ANOVA para la comparación de datos para las dos tecnologías de clarificación con el indicador cloruros**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	9,380	1	9,380	6,649	0,013	4,0195
Dentro de los grupos	76,183	54	1,411			
Total	85,563	55				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Análisis de varianza ANOVA para la comparación de datos para las dos tecnologías de clarificación con ecuación de Vukov**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	3,089	1	3,089	56,86	5,46E-10	4.0195
Dentro de los grupos	2,934	54	0,054			
Total	6,023	55				

Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

4.1. Valores promedio para el porcentaje de inversión de sacarosa para las dos tecnologías de clarificación con los métodos usados

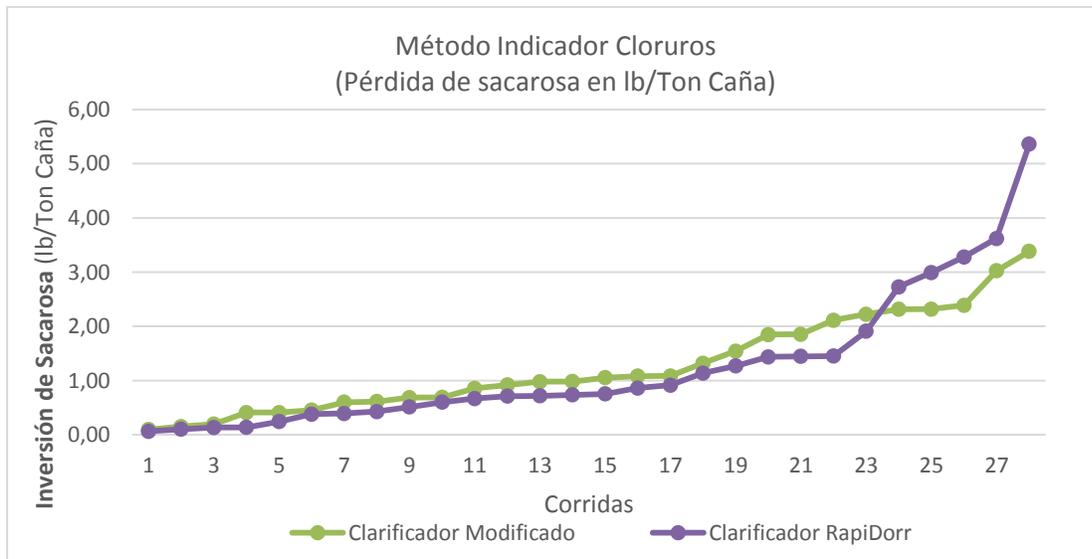
A continuación se presentan los valores medios así como, valores máximos y mínimos encontrados en los análisis del jugo para los parámetros de interés.

Tabla XII. Promedio de porcentaje de inversión en clarificadores con los métodos usados

Equipo	Indicador	Valor Medio, porcentaje de inversión	Desviación estándar (%)
Clarificador modificado	Cloruros	1,2032	0,617
	Ecuación Vukov	0,150	0,063
Clarificador RapiDorr	Cloruros	1,717	1,454
	Ecuación Vukov	0,574	0,297

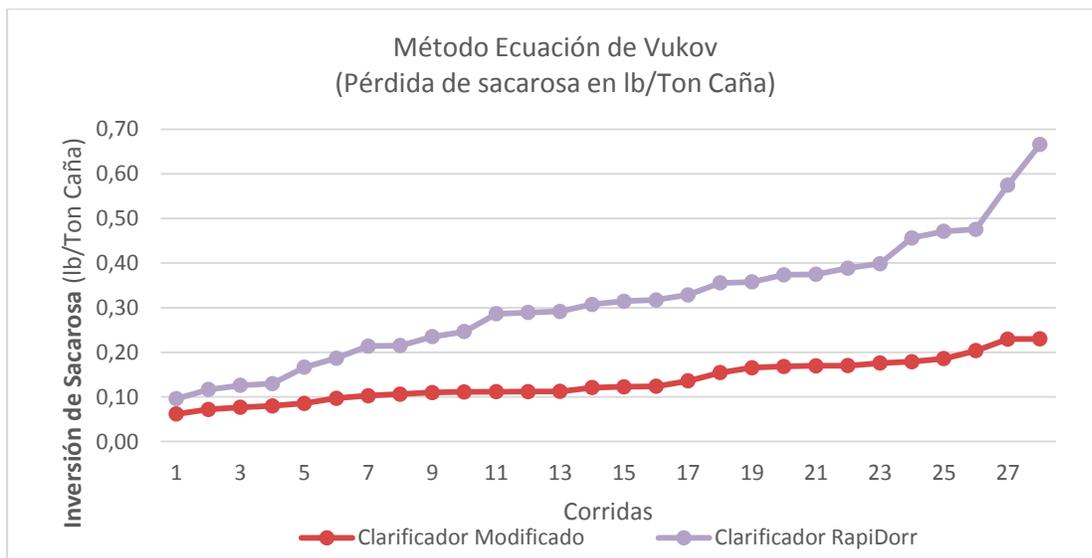
Fuente: elaboración propia, según datos de los anexos.

Figura 12. Pérdida diaria de sacarosa método indicador de cloruros



Fuente: elaboración propia, según datos calculados de los anexos.

Figura 13. Pérdida diaria de sacarosa método indicador de Vukov



Fuente: elaboración propia, según datos de los anexos.

4.2. Valores máximos y mínimos de pérdida de sacarosa para las dos tecnologías de clarificación con los métodos usados

Se presentan los valores en para las dos tecnologías de clarificación y los dos métodos usados, los valores se presentan en unidades de flujo volumétrico y su equivalente en libras por tonelada de caña, medida utilizada como referencia en los ingenios azucareros.

Tabla XIII. Valores máximos y mínimos de sacarosa invertida para las dos tecnologías de clarificación en función del flujo volumétrico

Equipo	Indicador	Flujo volumétrico nominal (gal/min)	Pérdida de sacarosa (lb/Ton de caña)
Clarificador modificado	Cloruros	900	0,09
		1 136	3,38
	Ecuación Vukov	900	0,06
		1 136	0,23
Clarificador RapiDorr	Cloruros	412	0,06
		703	5,36
	Ecuación Vukov	412	0,07
		703	0,67

Fuente: elaboración propia, según datos de los anexos.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como primer resultado se obtuvo el diseño de protocolo de muestreo para ambas tecnologías de clarificación. En la sección 3.5.3 se indica el diagrama de flujo por seguir para la metodología de muestreo correspondiente a los métodos de Vukov e indicador de cloruros.

En la sección 4 de resultados se determinó el porcentaje medio de inversión de sacarosa en los dos tipos de clarificadores. En la tabla X se puede observar que los valores más altos de inversión corresponden al clarificador RapiDorr. Esto es acorde con lo esperado debido a que este equipo opera con un tiempo de retención mayor de jugo. Los resultados del método de cloruros son mayores a los obtenidos con el método de Vukov. El método de Vukov permite relacionar los valores de pH, temperatura, y Brix de la solución a la entrada y salida de cada uno de los equipos.

Este método trabaja a partir de la cinética de la descomposición de la sacarosa en sus dos moléculas por separado, fructosa y glucosa. Es un método que los ingenios utilizan como herramienta rápida para la estimación de pérdidas de azúcar. El método balance de cloruros; cuantifica la cantidad de azúcar que se ha invertido a la entrada y a la salida del proceso relacionándolo con la cantidad de cloruros existentes en el jugo clarificado. Se utiliza el ion cloruro como trazador de pérdida porque este elemento no sufre mayor (sino es que ningún) cambio químico en todo el proceso de azúcar, por lo tanto los

resultados son efecto de las reacciones internas del proceso y no son afectadas por otros factores fuera del análisis de estudio.

Para el clarificador modificado se obtuvo con el método de cloruros un valor de porcentaje de inversión de 1,203 % y con el método de Vukov un valor de 0,15 %. Así mismo, para el clarificador RapiDorr se obtuvo con el método de cloruros un valor promedio de porcentaje de sacarosa invertida de 1,717 %, y con el método de Vukov se determinó un valor de 0,574 %.

En las figuras 9 y 10 se observa el comportamiento de los datos de un mismo método para los dos equipos analizados. La gráfica referente al método de balance de cloruros muestra que el clarificador modificado para bajos tiempos de retención presenta una mayor pérdida de libras de azúcar por tonelada de caña en condiciones diarias de operación. Es importante tomar en cuenta que el flujo volumétrico del clarificador modificado es mucho mayor (más de un 50 % más que el clarificador RapiDorr). A mayor flujo, mayor es la cantidad de sacarosa presente, ya que el brix en ambos equipos es muy similar.

La gráfica muestra una mayor pérdida para el clarificador modificado. Cuando se opera con los flujos volumétricos máximos, se obtienen los valores más altos de pérdida de sacarosa. En esta condición el clarificador RapiDorr presenta un mayor valor de inversión de sacarosa que el clarificador modificado. La diferencia entre ambos equipos fue de 1,93 lb/Ton de caña molida por día.

Ahora bien, al comparar ambos equipos con el método de Vukov, la diferencia observada entre los datos puede llegar hasta un valor de 0,44 lb/ton de caña molida por día. Sin embargo, la tendencia de los datos analizados

indica que para el clarificador RapiDorr los valores de pérdida siempre son mayores en comparación al clarificador modificado.

En ambas gráficas el equipo que presenta mayores pérdidas por inversión de sacarosa es el clarificador RapiDorr.

En la tabla XI, se muestran los rangos en que se mantuvieron las pérdidas registradas para cada equipo. Para el clarificador modificado con el método de indicador de cloruros se observa que para un flujo de 900 gal/min se tiene 0,09 lb/Ton de caña por día. Al aumentar este flujo a 1,136 gal/min, las pérdidas de sacarosa aumentan a un valor de 3,38 lb/Ton de caña. Para el mismo equipo con el método de la ecuación de Vukov, las pérdidas de sacarosa van desde 0,06 hasta 0,23 lb/Ton de caña para el mismo flujo volumétrico.

De igual forma, para el clarificador RapiDorr se observa que para un flujo de 412 gal/min para el método de indicador de cloruros las pérdidas tienen un valor de 0,06 lb/Ton de caña molida por día y al aumentar el flujo a 703 gal/min (flujo máximo) las pérdidas llegan a ser de 5,36 lb/Ton de caña molida por día. En este mismo equipo la ecuación de Vukov reporta valores de 0,07 hasta 0,67 lb/Ton de caña molida por día.

Al comparar ambas tecnologías con los métodos utilizados, los resultados indican que el clarificador RapiDorr presenta mayores pérdidas de sacarosa en condiciones de operación controladas que logran el flujo óptimo de operación registrado en la tabla XI

CONCLUSIONES

1. El protocolo de muestreo diseñado permitirá estandarizar el procedimiento de muestreo y ejecución de los métodos de análisis tanto para el método Vukov como para el indicador de cloruros.
2. Los valores de inversión química para el clarificador RapiDorr tienen un valor medio de 1,717 % con el indicador de cloruros y con el método de Vukov se obtuvo un valor medio de 0,574 %. Para el clarificador modificado se obtuvo un valor medio de 1,203 % con el método de indicador de cloruros y un valor de 0,15 % con el de Vukov.
3. La tecnología que presenta mayor cantidad de inversión de sacarosa es el equipo RapiDorr. Lo que se relaciona con el hecho de que opera con mayores tiempos de retención, factor clave para favorecer las reacciones de inversión de sacarosa.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda que cada ingenio realice sus propios cálculos en relación con las condiciones de proceso que se tenga en la sección de clarificadores (cantidad de clarificadores, tipo de clarificadores, flujo volumétrico, tiempo de retención) para determinar el porcentaje de inversión de sacarosa.
2. Si se poseen dos tecnologías de clarificación como el caso de ingenio donde se realizó el estudio, es importante determinar bajo qué condiciones de operación se da la mayor cantidad de pérdida de sacarosa por inversión, en base al flujo volumétrico que los equipos posean.
3. Se recomienda que para los análisis de las muestras; el tiempo con el que se realiza el análisis sea mínimo para que pueda ser lo más confiable posible. El objetivo es evitar la inversión de sacarosa en la muestra extraída del clarificador.
4. Previo a tomar la muestra se recomienda realizar una purga que elimine el jugo retenido en los puntos de muestreo para obtener un material representativo. Si no se realiza esta purga, se tiene la posibilidad de obtener un material acumulado que no refleje las condiciones dadas en el proceso.

BIBLIOGRAFÍA

1. CENGICAÑA (Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar). *Proceso de fabricación de azúcar*. Alfaro, J.L.; Velásquez, E.; Monterroso L; y Espinosa, R. (editores). Guatemala, 2012. 54 p.
2. CHEN, James C.P., CHOU, Chung Chi. *Cane sugar handbook*. 12th Edition; Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc. 1993, 1089 p.
3. HONIG, Peter. *Principios de tecnología azucarera*. Tomo I. México: Editorial continental, 1982, 438 p.
4. LIND, Douglas A., MARCHAL, William G., WATHEN, Samuel A. *Estadística aplicada a los negocios y la economía*. 13a ed. México: McGraw – Hill Interamericana, 2008, 413 p.
5. MORRISON, Robert Thomson. ROBERT, Nielson Boyd. *Química orgánica*. 5ª.ed. México: Editorial Pearson Educación, 1990, 1450 p.
6. RAMÍREZ JUÁREZ, Jenniffer Roxanna. *Determinación de sacarosa invertida por efecto de la recirculación de jugo clarificado de caña de azúcar, en un evaporador de placas de película descendente*. Trabajo de graduación Ing. Química. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2012.

7. REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. Alemania:Bartertms, 2012.
879 p.

APÉNDICES

Datos calculados

Apéndice 1. **Porcentaje de inversión de sacarosa para las dos tecnologías de clarificación utilizadas**

Clarificador	Clarificador Modificado		Clarificador RapiDorr	
ID	Porcentaje de inversión balance de cloruros	Porcentaje de inversión ecuación de Vukov	Porcentaje de inversión de sacarosa	Porcentaje de inversión ecuación de Vukov
1	0,4224	0,06398	0,2783	0,15035
2	0,4699	0,08779	0,3580	0,21012
3	0,4932	0,09122	0,4245	0,21281
4	0,6456	0,10446	0,4536	0,22452
5	0,6617	0,10984	0,6632	0,25622
6	0,6648	0,11104	0,7270	0,26694
7	0,7302	0,11106	0,7582	0,27445
8	0,7364	0,11168	0,8945	0,29073
9	0,7685	0,11551	0,9684	0,30172
10	0,7829	0,11691	1,0705	0,34917
11	0,9143	0,11736	1,3319	0,41893
12	0,9690	0,12744	1,4129	0,50569

Continuación Apéndice 1

Clarificador		Clarificador modificado		Clarificador RapiDorr	
ID	Porcentaje de inversión balance de cloruros	Porcentaje de inversión ecuación de Vukov	Porcentaje de inversión balance de cloruros	Porcentaje de inversión ecuación de Vukov	
13	0,9870	0,12841	1,4614	0,50728	
14	1,5495	0,13017	1.5495	0,60130	
15	1,5549	0,13096	1,5549	0,61799	
16	1,5619	0,13297	1,5619	0,65356	
17	1,6826	0,15169	1,6826	0,65867	
18	1,6829	0,15328	1,6829	0,70269	
19	1,6912	0,15365	1,6912	0,71175	
20	1,7249	0,15671	1,7249	0,72063	
21	1,7365	0,18823	1,7564	0,77376	
22	1,7410	0,18872	2,3347	0,78112	
23	1,9288	0,19039	2,7270	0,92236	
24	2,0379	0,19072	3,1576	0,92664	
25	2,1047	0,19268	3,2083	0,94900	
26	2,1253	0,21605	3,7522	1,00953	
27	2,3423	0,24861	5,2913	1,08516	
28	2,4314	0,38795	5,9536	1,12894	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Promedio y desviación estándar porcentaje de inversión de sacarosa para clarificador modificado

Clarificador	Clarificador modificado		Clarificador RapiDorr	
	Porcentaje de inversión balance de cloruros	Porcentaje de inversión ecuación de Vukov	Porcentaje de inversión balance de cloruros	Porcentaje de inversión ecuación de Vukov
Promedio	1.2032	0,150	1.2032	0,150
Desviación estándar	0,62	0,06	0,62	0,06

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Libras de azúcar por tonelada de caña procesada para las dos tecnologías de clarificación

Clarificador modificado				Clarificador RapiDorr			
Indicador cloruros		Indicador de Vukov		Indicador cloruros		Indicador de Vukov	
Día de Mantenimiento (17500)	Molienda Máxima (19500)	Día de Mantenimiento (17500)	Molienda Máxima (19500)	Día de Mantenimiento (17500)	Molienda Máxima (19500)	Día de Mantenimiento (17500)	Molienda Máxima (19500)
0,11	0,09	0,07	0,06	0,07	0,06	0,11	0,10
0,17	0,15	0,08	0,07	0,11	0,10	0,13	0,12
0,22	0,20	0,09	0,08	0,15	0,13	0,14	0,13
0,45	0,41	0,09	0,08	0,15	0,14	0,14	0,13
0,46	0,41	0,10	0,09	0,27	0,24	0,19	0,17
0,51	0,45	0,11	0,10	0,42	0,38	0,21	0,19

Continuación Apendice 3

Clarificador Modificado				Clarificador RapiDorr			
Indicador Cloruros		Indicador de Vukov		Indicador Cloruros		Indicador de Vukov	
Día de Mantenimiento (17500)	Molienda Máxima (19500)	Día de Mantenimiento (17500)	Molienda Máxima (19500)	Día de Mantenimiento (17500)	Molienda Máxima (19500)	Día de Mantenimiento (17500)	Molienda Máxima (19500)
0,67	0,60	0,11	0,10	0,44	0,39	0,24	0,21
0,68	0,61	0,12	0,11	0,47	0,43	0,24	0,22
0,76	0,69	0,12	0,11	0,57	0,51	0,26	0,24
0,77	0,69	0,12	0,11	0,67	0,60	0,27	0,25
0,95	0,86	0,12	0,11	0,74	0,67	0,32	0,29
1,02	0,92	0,12	0,11	0,79	0,71	0,32	0,29
1,09	0,98	0,13	0,11	0,80	0,72	0,33	0,29
1,09	0,98	0,13	0,12	0,82	0,74	0,34	0,31
1,17	1,05	0,14	0,12	0,84	0,75	0,35	0,31
1,20	1,08	0,14	0,12	0,96	0,86	0,35	0,32
1,21	1,08	0,15	0,14	1,02	0,91	0,37	0,33
1,47	1,32	0,17	0,15	1,27	1,14	0,40	0,36
1,72	1,54	0,18	0,17	1,41	1,27	0,40	0,36
2,06	1,85	0,19	0,17	1,60	1,44	0,42	0,37
2,06	1,85	0,19	0,17	1,61	1,44	0,42	0,37
2,35	2,11	0,19	0,17	1,62	1,45	0,43	0,39
2,48	2,22	0,20	0,18	2,13	1,91	0,44	0,40

Continuación Apéndice 3

Clarificador modificado				Clarificador RapiDorr			
Indicador cloruros		Indicador de Vukov		Indicador cloruros		Indicador de Vukov	
Día de mantenimiento (17500)	Molienda Máxima (19500)	Día de mantenimiento (17500)	Molienda Máxima (19500)	Día de mantenimiento (17500)	Molienda Máxima (19500)	Día de mantenimiento (17500)	Molienda Máxima (19500)
2,58	2,32	0,20	0,18	3,04	2,73	0,51	0,46
2,58	2,32	0,21	0,19	3,33	2,99	0,52	0,47
2,66	2,39	0,23	0,20	3,66	3,28	0,53	0,48
3,37	3,03	0,26	0,23	4,03	3,62	0,64	0,57
3,77	3,38	0,26	0,23	5,98	5,36	0,74	0,67

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Datos calculados para el porcentaje de inversión de sacarosa para el clarificador modificado**

Ítem	DATOS ENTRADA					DATOS SALIDA			
	Pol	Brix	%A.R	%CI	%A.R/CI	Brix	%A.R.	%CI	%A.R./CI-
1	14,67	17,22	0,87	0,0584	0,0503	17,07	0,97	0,0560	22,70
2	12,96	15,48	0,91	0,0560	0,0589	17,09	1,10	0,0584	12,92
3	13,21	15,59	0,78	0,0584	0,0499	16,11	1,07	0,0560	13,30
4	13,53	16,18	0,88	0,0584	0,0543	16,05	1,16	0,0560	17,75
5	13,21	15,76	0,92	0,0463	0,0583	16,05	1,07	0,0487	17,39
6	13,46	15,95	1,01	0,0560	0,0634	21,49	1,22	0,0584	18,78
7	13,82	16,04	0,82	0,0536	0,0510	17,04	0,93	0,0560	19,19
8	13,45	15,61	0,74	0,0463	0,0473	15,73	0,79	0,0487	20,74
9	13,54	15,34	0,65	0,0536	0,0424	16,52	0,67	0,0536	22,07
10	13,41	15,78	0,62	0,0682	0,0391	15,81	0,82	0,0657	20,88
11	13,38	15,42	0,77	0,0560	0,0502	15,48	0,92	0,0487	16,60
12	13,92	16,00	0,85	0,0536	0,0531	16,62	0,87	0,0511	16,29
13	13,46	15,61	0,82	0,0511	0,0526	15,80	0,86	0,0463	12,56
14	13,62	15,30	0,85	0,0463	0,0557	15,74	0,90	0,0438	12,52
15	13,20	15,37	0,78	0,0511	0,0511	16,28	0,89	0,0511	18,96
16	13,20	15,37	0,78	0,0511	15,35	16,28	0,89	0,0511	17,02
17	13,37	15,69	0,78	0,0463	16,92	15,34	0,83	0,0438	18,58
18	12,69	14,74	0,82	0,0487	16,80	15,52	1,05	0,0463	20,47

Continuación Apéndice 4

Ítem	DATOS ENTRADA					DATOS SALIDA			
	Pol	Brix	%A.R	%Cl	%A.R/Cl	Brix	%A.R	%Cl-	%A.R./Cl-
19	12,87	15,03	0,78	0,0438	17,76	16,15	0,89	0,0463	17,44
20	12,62	16,49	0,78	0,0682	11,39	16,58	0,83	0,0584	18,88
21	13,92	16,70	0,84	0,0682	12,39	17,70	0,95	0,0560	22,64
22	12,80	15,62	1,01	0,0438	23,06	15,41	1,28	0,0390	19,22
23	13,02	15,66	0,77	0,0463	16,62	14,53	1,05	0,0438	14,29
24	13,79	16,79	0,95	0,0463	20,62	16,44	1,04	0,0487	16,92
25	18,70	22,56	1,15	0,0803	14,28	17,73	1,25	0,0779	32,86
26	13,37	16,11	0,72	0,0609	11,83	18,50	0,94	0,0536	24,05
27	12,58	15,29	0,69	0,0755	9,11	16,77	0,87	0,0779	21,28
28	13,89	17,27	0,75	0,0706	10,57	16,09	0,88	0,0511	16,07

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Datos calculados para el porcentaje de inversión de sacarosa para el clarificador RapiDorr**

Ítem	DATOS ENTRADA					DATOS SALIDA			
	Pol	Brix	%A.R	%CI	%A.R/CI	Brix	%A.R.	%CI-	%A.R./CI-
1	13,62	15,38	0,77	0,0463	16,56	15,82	0,86	0,0438	19,57
2	13,20	15,37	0,71	0,0511	13,80	15,89	0,81	0,0511	15,78
3	13,37	15,69	0,70	0,0463	15,21	15,01	1,09	0,0438	24,83
4	13,15	15,22	0,74	0,0584	12,59	15,88	1,15	0,0536	21,49
5	12,72	14,93	0,67	0,0560	12,04	15,85	1,26	0,0511	24,71
6	13,17	15,26	0,78	0,0414	18,79	15,65	1,16	0,0414	27,94
7	14,18	17,17	1,03	0,0633	16,31	18,57	1,22	0,0609	19,96
8	12,23	14,59	0,73	0,0609	11,92	15,00	0,88	0,0584	15,01
9	12,48	15,06	0,73	0,0536	13,69	15,01	0,98	0,0560	17,53
10	13,38	15,70	0,82	0,0730	11,17	15,51	0,98	0,0682	14,42
11	10,56	12,00	0,67	0,0511	13,07	15,94	0,90	0,0536	16,75
12	12,64	14,96	0,67	0,0511	13,07	16,94	0,90	0,0536	16,75
13	14,08	16,43	0,72	0,0536	13,48	15,92	0,80	0,0560	14,25
14	14,31	16,71	0,90	0,0682	13,20	17,97	1,09	0,0730	14,88
15	15,08	18,26	0,84	0,1656	5,06	16,96	1,02	0,1972	5,16
16	14,09	17,14	0,87	0,1266	6,89	19,58	1,05	0,0755	13,88
17	14,5	16,9	0,91	0,0779	11,62	19,19	1,01	0,0779	12,92
18	13,83	16,60	0,83	0,0828	10,08	18,57	0,83	0,0779	10,71

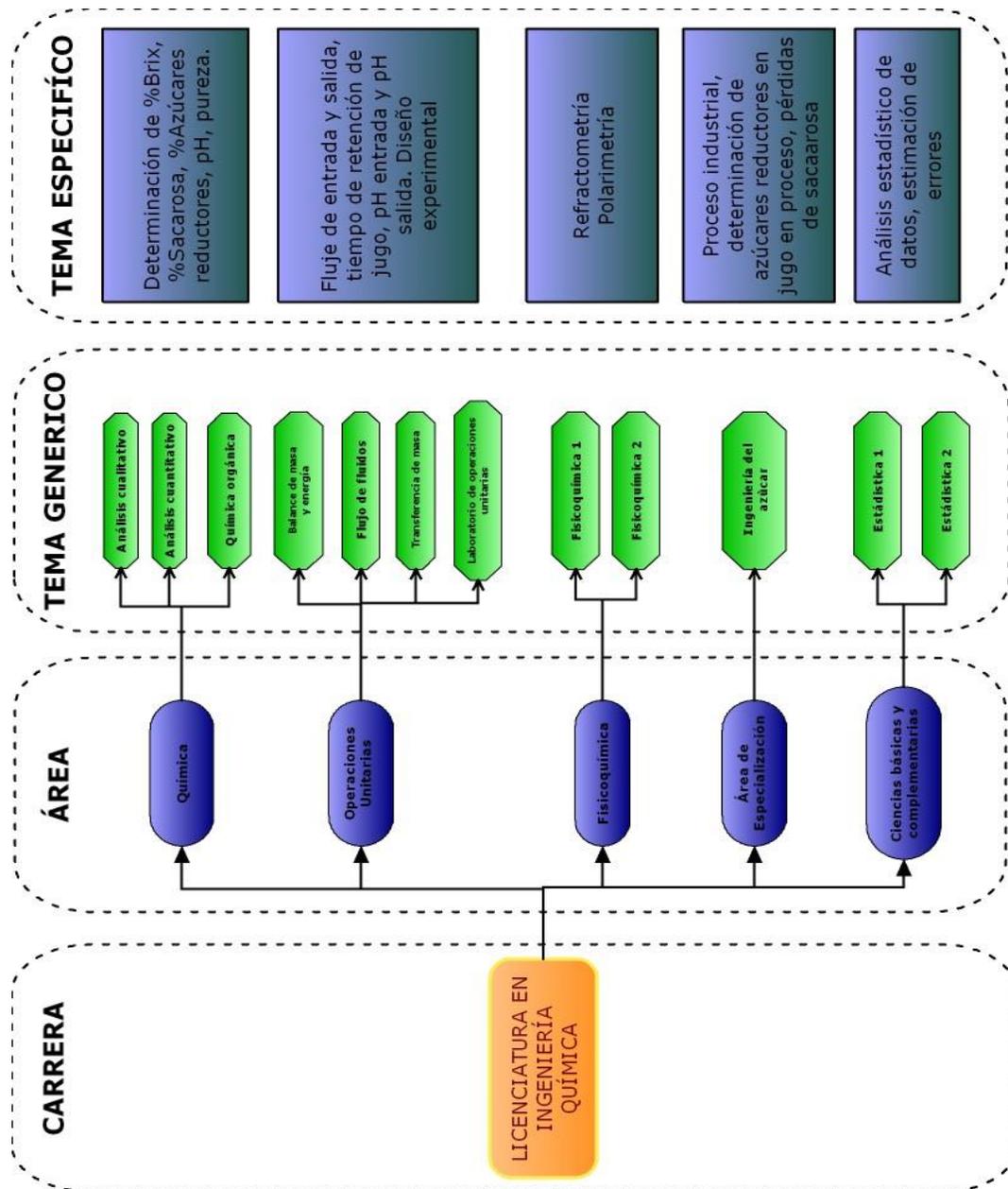
Continuación Apéndice 5

Ítem	DATOS ENTRADA					DATOS SALIDA			
	Pol	Brix	%A.R	%Cl	%A.R/Cl	Brix	%A.R	%Cl-	%A.R./Cl
19	12,62	16,49	0,78	0,0682	11,39	16,40	0,81	0,0657	12,27
20	13,02	15,66	0,77	0,0463	16,62	15,20	1,03	0,0438	23,55
21	18,70	22,56	1,15	0,0803	14,28	17,03	1,35	0,0730	18,51
22	13,37	16,11	0,72	0,0609	11,83	17,10	0,91	0,0633	14,31
23	13,89	17,27	0,75	0,0706	10,57	16,02	0,81	0,0609	13,33
24	12,16	14,64	0,75	0,0536	13,97	15,58	0,84	0,0584	14,41
25	11,56	14,76	0,77	0,0950	8,15	15,50	0,93	0,0755	12,27
26	12,01	14,84	0,77	0,0852	8,99	15,37	0,83	0,0730	11,30
27	15,70	19,16	0,88	0,0657	13,35	16,98	0,88	0,0609	14,42
28	13,59	15,73	0,60	0,0828	7,26	15,79	0,72	0,0706	10,18

Fuente: elaboración propia.

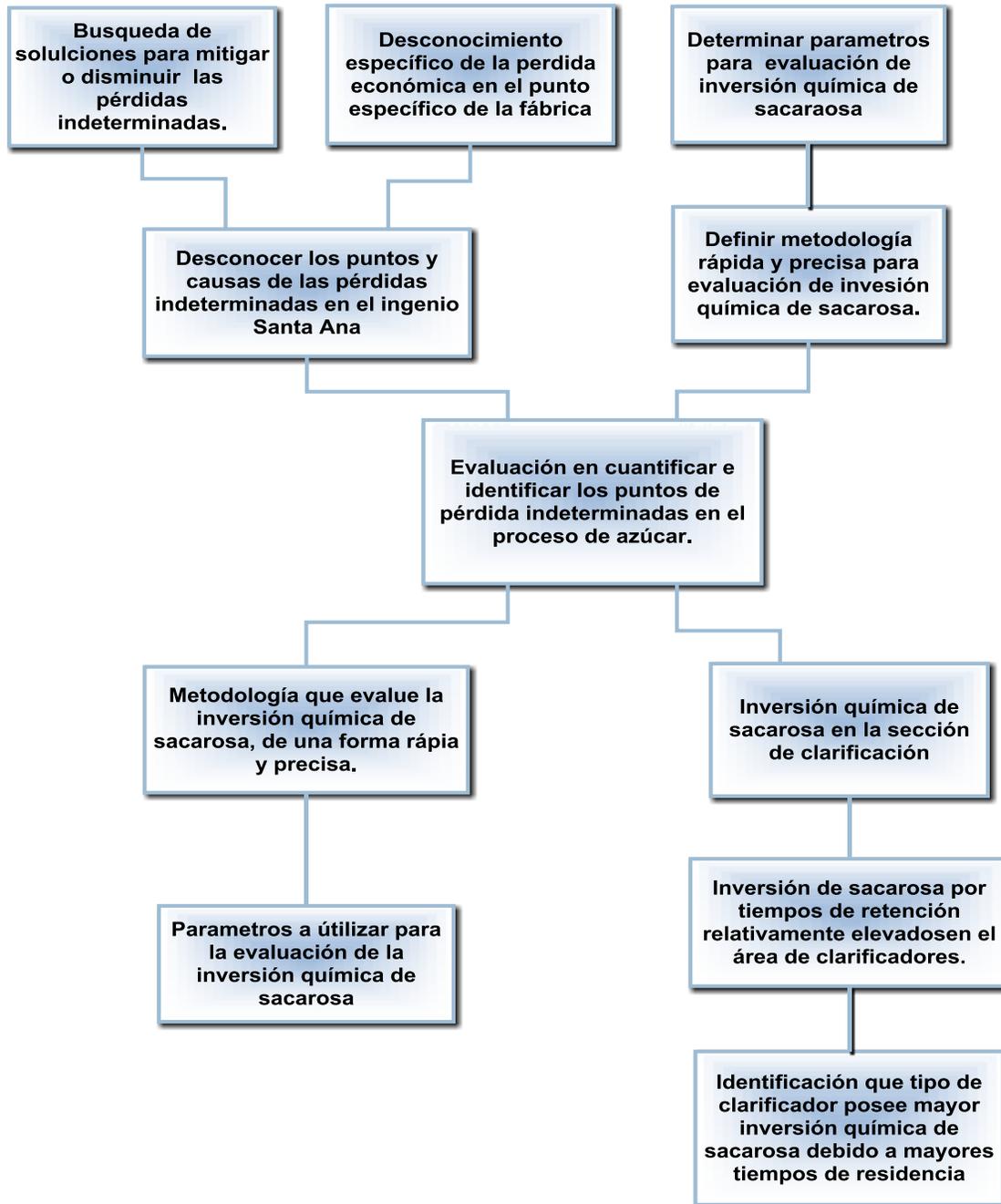
ANEXOS

Anexo 1. Requisitos académicos



Fuente: https://www.ingenieria.usac.edu.gt/pensa/ingenieria_quimica.jpg

Anexo 2. Árbol de problemas



Fuente: Como hacer un árbol de problemas: ejemplo práctico

<https://ingenioempresa.com/arbol-de-problemas/>. Consulta: Septiembre 2017