



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

**EVALUACIÓN DE UN MÉTODO ALTERNO A NIVEL LABORATORIO PARA EL ANÁLISIS
DEL JUGO DE LA CAÑA DE AZÚCAR DESFIBRADA MEDIANTE EL MÉTODO DE
DESINTEGRACIÓN HÚMEDA UTILIZANDO EL EQUIPO “DIGESTOR DE CAÑA MODELO
TE-0501” EN UN INGENIO AZUCARERO DE GUATEMALA**

Mayra Maritza Quemé Peña

Asesorado por el Ing. David Ricardo Cerezo Toledo

Guatemala, mayo de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE UN MÉTODO ALTERNO A NIVEL LABORATORIO PARA EL ANÁLISIS
DEL JUGO DE LA CAÑA DE AZÚCAR DESFIBRADA MEDIANTE EL MÉTODO DE
DESINTEGRACIÓN HÚMEDA UTILIZANDO EL EQUIPO “DIGESTOR DE CAÑA MODELO
TE-0501” EN UN INGENIO AZUCARERO DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

MAYRA MARITZA QUEMÉ PEÑA

ASESORADO POR EL ING. DAVID RICARDO CEREZO TOLEDO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, MAYO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADOR	Ing. Renato Giovanni Ponciano Sandoval
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
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:

EVALUACIÓN DE UN MÉTODO ALTERNO A NIVEL LABORATORIO PARA EL ANÁLISIS DEL JUGO DE LA CAÑA DE AZÚCAR DESFIBRADA MEDIANTE EL MÉTODO DE DESINTEGRACIÓN HÚMEDA UTILIZANDO EL EQUIPO "DIGESTOR DE CAÑA MODELO TE-0501" EN UN INGENIO AZUCARERO DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 31 octubre de 2011.



Mayra Maritza Quemé Peña

Guatemala, 23 de marzo de 2012

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


Ingeniero Álvarez:

Es un gusto hacer de su conocimiento que he revisado el informe final de trabajo de graduación titulado: **"Evaluación de un método alternativo a nivel laboratorio para el análisis del jugo de la caña de azúcar desfibrada mediante el método de desintegración húmeda utilizando el equipo "Digestor de caña modelo TE-0501" en un ingenio azucarero de Guatemala"**; de la estudiante: Mayra Maritza Quemé Peña, con número de carné: 2007 14262.

Después de haber realizado la revisión del informe final del trabajo de graduación y de haber hecho las correcciones pertinentes, considero que llena los requisitos para su aprobación.

Sin otro particular y agradeciéndole la atención que se sirva dar a la presente, me suscribo a usted.

Atentamente,


Ing.Qco. David Ricardo Cerezo Toledo
ASESOR
Colegiado 1169



Guatemala, 20 de abril de 2012
 Ref. EI.Q.TG-IF.022.2012

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

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-250-2011-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por la estudiante universitaria: **Mayra Maritza Quemé Peña**

Identificada con número de carné: **2007-14262**

Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

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:

EVALUACIÓN DE UN MÉTODO ALTERNO A NIVEL LABORATORIO PARA EL ANÁLISIS DEL JUGO DE LA CAÑA DE AZÚCAR DESFIBRADA MEDIANTE EL MÉTODO DE DESINTEGRACIÓN HÚMEDA UTILIZANDO EL EQUIPO "DIGESTOR DE CAÑA MODELO TE-0501" EN UN INGENIO AZUCARERO DE GUATEMALA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero: **David Cerezo Toledo**.

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 ENSEÑAR A TODOS"

Ing. César Alfonso García
 COORDINADOR DE TERNA
 Tribunal de Revisión
 Trabajo de Graduación

ÁREA DE QUÍMICA
 ESC. INGENIERÍA QUÍMICA
 FAC. INGENIERÍA - USAC

C.c.: archivo

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



ESCUELA DE
 INGENIERÍA QUÍMICA



ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de
 Programas de Arquitectura y de Ingeniería



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 de la estudiante, **MAYRA MARITZA QUEMÉ PEÑA** titulado: "EVALUACIÓN DE UN MÉTODO ALTERNO A NIVEL LABORATORIO PARA EL ANÁLISIS DEL JUGO DE LA CAÑA DE AZÚCAR DESFIBRADA MEDIANTE EL MÉTODO DE DESINTEGRACIÓN HÚMEDA UTILIZANDO EL EQUIPO "DIGESTOR DE CAÑA MODELO TE-0501" EN UN INGENIO AZUCARERO DE GUATEMALA". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.



Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía; C.Dr.

DIRECTOR

Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, mayo de 2012

Cc: Archivo
WGAM/ale



DTG. 225.2012

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE UN MÉTODO ALTERNO A NIVEL LABORATORIO PARA EL ANÁLISIS DEL JUGO DE LA CAÑA DE AZÚCAR DESFIBRADA MEDIANTE EL MÉTODO DE DESINTEGRACIÓN HÚMEDA UTILIZANDO EL EQUIPO "DIGESTOR DE CAÑA MODELO TE-0501" EN UN INGENIO AZUCARERO DE GUATEMALA,** presentado por la estudiante universitaria **Mayra Maritza Quemé Peña,** autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 23 de mayo de 2012.

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser mi guía y la fuente de mi vida. Porque a través de su amor, bendición y de los dones de la sabiduría e inteligencia que me ha dado permitió que esta meta fuera cumplida.
- La Santísima Virgen María** Por ser mi madre celestial, la que en todo momento intercede por mi ante Dios, gracias por su amor y su protección.
- A mis padres José Luis y Nellys Antonia** Por su apoyo, comprensión, amor y por ser los ángeles que puso Dios en mi vida para guiarme en este caminar. Este triunfo es gracias a su esfuerzo y ejemplo, ya que nunca han dejado de luchar para darme lo mejor, demostrándome su amor en todo momento, los quiero.
- A mis hermanos Pedro, Jorge y María** Por su ayuda, amor y apoyo. Porque sé que puedo contar con ustedes en todo momento. Gracias por sus consejos, por creer en mí y por hacer mi vida más feliz.
- A mi familia** Por acompañarme en todo momento de mi vida, por su apoyo incondicional, cariño y oraciones.

A mis educadores

Catedráticos, profesionales y guías, que a través de sus conocimientos, experiencias de vida, consejos y apoyo me han guiado y moldeado para convertirme en la profesional y persona que soy hoy en día. Gracias por ser las personas que transforman el mundo.

A mis amigos

Con quienes he compartido muchas experiencias durante todo este proceso de aprendizaje, y que incondicionalmente me han apoyado y ayudado cuando más lo necesito, Dios los bendiga.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Padre todopoderoso, que a través de su amor infinito, me permitió culminar esta meta.
- Mis padres** José Luis Quemé de León y Nellys Antonia Peña de Quemé, gracias por su apoyo y amor incondicional, este triunfo no hubiera sido posible sin ustedes.
- Mis hermanos** María Eugenia, Pedro José y Jorge Luis, gracias por confiar y creer en mí, por su amor y apoyo.
- Mi familia** Gracias por sus consejos y oraciones, por compartir sus experiencias de vida conmigo.
- Familia Ardón Mayorga** Muchas gracias por su apoyo, cariño, amistad y confianza, por siempre cuidar de mí en todo momento. Son parte de mi familia y los llevo en mi corazón. Los quiero mucho.
- Mis amigos** Gracias por su amistad, apoyo y cariño sincero, Dios los bendiga.

Mi asesor

Ingeniero Químico David Ricardo Cerezo Toledo, por su dedicación y tiempo en la realización de esta investigación. Gracias por la confianza y el apoyo brindado.

Mis revisores

Ingenieros Químicos César Alfonso García Guerra y Víctor Manuel Monzón, por sus consejos y sugerencias, ya que ayudaron a fortalecer más esta investigación.

Ing. José Manuel Tay

Por sus enseñanzas, consejos, apoyo, confianza y amistad brindada en todo momento para cumplir mis metas.

Ing. Ariel Villela

Por su apoyo, consejos, amistad y confianza brindada en todo momento para seguir adelante y no desmayar.

Ing. Francisco González

Por sus grandes consejos, amistad y apoyo brindado y muchas gracias también por el apoyo recibido de su familia.

Ing. Federico Salazar

Por su amistad, enseñanzas, consejos y por sus extraordinarias ideas para ver las cosas de diferente manera. Gracias por apoyarme para seguir adelante en mis metas.

Ing. Yocimar García

Por su ayuda y apoyo en la realización del presente trabajo de graduación.

Laboratorio de caña

Gracias por permitir que la investigación se realizara, en especial al Ing. Jorge Ixpatá por su apoyo y ayuda en la realización de esta investigación.

**Universidad de San Carlos
de Guatemala**

Por permitirme aprender, trabajar y desarrollarme en sus instalaciones para formarme como profesional de la ingeniería química y contribuir de esta manera al desarrollo del país.

Laboratorio de Fisicoquímica

Por permitirme trabajar en una de las áreas más respetadas de la Escuela de Ingeniería Química y desarrollarme no sólo como profesional sino también como persona.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS Y/O HIPÓTESIS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Proceso productivo de la caña de azúcar.....	3
2.1.1. Generalidades.....	3
2.1.2. Calidad de la caña.....	4
2.1.2.1. Semilla.....	4
2.1.2.2. Variedad de la caña.....	5
2.1.2.2.1. Variedad CP 731547.....	6
2.1.2.2.2. Variedad CP 721210.....	7
2.1.2.2.3. Variedad CP 722086.....	8
2.1.2.2.4. Variedad Mex 68P23.....	9
2.1.3. Labores agrícolas.....	10
2.1.3.1. Preparación de suelos.....	10
2.1.3.2. Siembra.....	12
2.1.3.3. Fertilización de la caña de azúcar.....	13
2.1.3.4. Resiembra.....	14
2.1.4. Gestión de cosecha.....	15

2.1.4.1.	Quema.....	15
2.1.4.2.	Corte	16
2.1.4.3.	Transporte de la caña al ingenio	17
2.1.4.4.	Deterioro de la caña	17
2.1.5.	Proceso de fábrica	18
2.1.5.1.	Recepción y lavado de la caña.....	19
2.1.5.2.	Molienda y sus parámetros.....	19
2.1.5.3.	Clarificación del jugo.....	23
2.1.5.4.	Evaporación.....	25
2.1.5.5.	Cristalización	27
2.1.5.6.	Centrifugación o purga	30
2.1.5.7.	Secado	31
2.1.5.8.	Refinación.....	32
2.2.	Métodos de caracterización de la caña de azúcar.....	33
2.2.1.	Método del primer molino.....	35
2.2.2.	Método de desintegración húmeda	36
2.2.2.1.	Lixiviación	37
2.2.2.1.1.	Métodos de operación de la lixiviación.....	38
2.2.2.2.	Maceración	41
2.2.3.	Método de prensa hidráulica	42
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	45
3.1.	Variables.....	45
3.1.1.	Variables de control.....	45
3.1.2.	Variables independientes	47
3.1.3.	Variables dependientes	49
3.2.	Delimitación del campo de estudio	49
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	50

3.4.	Recursos materiales disponibles	
	(Equipo, cristalería, reactivos)	50
3.4.1.	Materia prima y reactivos.....	51
3.4.2.	Cristalería	51
3.4.3.	Equipos.....	51
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	52
3.5.1.	Diseño preliminar.....	52
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	56
3.6.1.	Elección del diseño experimental	56
	3.6.1.1. Diseño de tratamientos	57
3.7.	Tabulación, ordenamientos y procesamiento de la	
	información	60
3.7.1.	Procesamiento de la información por medio del	
	método de desintegración húmeda	60
3.7.1.1.	Porcentaje humedad de caña	60
3.7.1.2.	Porcentaje brix del extracto.....	61
3.7.1.3.	Porcentaje pol del extracto.....	61
3.7.1.4.	Densidad del extracto	61
3.7.1.5.	Porcentaje fibra caña	61
3.7.1.6.	Porcentaje brix caña	62
3.7.1.7.	Porcentaje pol en caña	62
3.7.1.8.	Pureza en caña.....	62
3.7.2.	Procesamiento de la información por medio del	
	método de prensa hidráulica	63
3.7.2.1.	Porcentaje de humedad de caña	63
3.7.2.2.	Porcentaje brix del extracto.....	64
3.7.2.3.	Porcentaje pol del extracto.....	64
3.7.2.4.	Densidad del extracto	64
3.7.2.5.	Porcentaje fibra caña	65

3.7.2.6.	Porcentaje brix caña	65
3.7.2.7.	Porcentaje pol caña	66
3.7.2.8.	Pureza en caña	66
3.7.3.	Tabulación de datos	66
3.8.	Análisis estadístico	68
3.8.1.	Dato promedio estadístico.....	68
3.8.2.	Desviación estándar.....	69
3.8.3.	Análisis de varianza	69
3.8.3.1.	Evaluación método de desintegración húmeda.....	69
3.8.3.2.	Comparación método de desintegración húmeda con el método de prensa hidráulica	71
4.	RESULTADOS	73
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	89
	CONCLUSIONES.....	95
	RECOMENDACIONES	97
	BIBLIOGRAFÍA.....	99
	APÉNDICES.....	101

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Molinos de caña de azúcar	23
2.	Clarificador de jugo de caña de azúcar.....	25
3.	Evaporadores de múltiple efecto.....	27
4.	Tacho cristizador.....	29
5.	Máquina centrífuga.....	31
6.	Máquina secadora de azúcar.....	32
7.	Digestor de caña modelo TE-0501	42
8.	Prensa hidráulica	43
9.	Diseño general técnica cuantitativa	53
10.	Diseño preliminar del método de desintegración húmeda	54
11.	Diseño preliminar del método de prensa hidráulica	55
12.	Representación del porcentaje humedad caña a diferentes factores: A) Tiempo, B) Agua y C) Peso	74
13.	Representación de la densidad a diferentes factores: A) Tiempo, B) Agua y C) Peso.....	75
14.	Representación del porcentaje fibra caña a diferentes factores: A) Tiempo, B) Agua y C) Peso.....	76
15.	Representación del porcentaje brix caña a diferentes factores: A) Tiempo, B) Agua y C) Peso.....	77
16.	Representación del porcentaje pol caña a diferentes factores: A) Tiempo, B) Agua y C) Peso.....	78
17.	Diagrama de flujo del método de desintegración húmeda propuesto a partir del tratamiento escogido.....	79

18.	Diagrama de flujo de la limpieza del “Digestor de caña modelo TE-0501”	83
19.	Porcentaje humedad caña en función del método empleado.....	85
20.	Densidad (Kg/L) en función del método empleado.....	85
21.	Porcentaje fibra caña en función del método empleado.....	86
22.	Porcentaje brix caña en función del método empleado.....	86
23.	Porcentaje pol caña en función del método empleado.....	87
24.	Diagrama ternario de la cantidad de caña desfibrada con la cantidad de agua y los sólidos solubles de la evaluación del método de desintegración húmeda	92

TABLAS

I.	Características agronómicas de las principales variedades de caña.....	10
II.	Cantidades de fertilizantes recomendadas.....	14
III.	Clasificación del proceso de lixiviación.....	40
IV.	Variables de control para el análisis del jugo de la caña desfibrada por medio del método de desintegración húmeda por medio del equipo de “Digestor de caña modelo TE-0501”	45
V.	Variables de control para el análisis del jugo de la caña desfibrada por medio del método de prensa hidráulica.....	46
VI.	Análisis del jugo de la caña desfibrada por medio del método de desintegración húmeda por medio del equipo de “Digestor de caña modelo TE-0501”	47
VII.	Análisis del jugo de caña desfibrada por medio del método de prensa hidráulica	48

VIII.	Análisis del jugo de caña desfibrada por medio de los métodos: desintegración húmeda por medio del equipo de “Digestor de caña modelo TE-0501” y prensa hidráulica	49
IX.	Diseño de tratamientos para la evaluación del método de desintegración húmeda por medio del equipo de “Digestor de caña modelo TE-0501”	58
X.	Tratamiento experimental de la calidad del jugo proveniente de la caña de azúcar desfibrada, por medio del equipo de “Digestor de caña modelo TE-0501” (para comparación del método)	66
XI.	Comparación de la calidad del jugo proveniente de la caña de azúcar desfibrada, por medio del método de desintegración húmeda con respecto al método de prensa hidráulica	67
XII.	Ecuaciones para el análisis de varianza de dos factores	72
XIII.	Porcentaje humedad caña del método de desintegración húmeda con respecto a cada factor y nivel empleado.....	74
XIV.	Densidad (Kg/L) del método de desintegración húmeda con respecto a cada factor y nivel empleado.....	75
XV.	Porcentaje fibra caña del método de desintegración húmeda con respecto a cada factor y nivel empleado.....	76
XVI.	Porcentaje brix caña del método de desintegración húmeda con respecto a cada factor y nivel empleado.....	77
XVII.	Porcentaje pol caña del método de desintegración húmeda con respecto a cada factor y nivel empleado.....	78
XVIII.	Tratamiento escogido en la evaluación del método de Desintegración húmeda	79
XIX.	Comparación método de desintegración húmeda por medio del equipo de “Digestor de caña modelo TE-0501” con el método de prensa hidráulica	84

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Atm	Atmosférica
W	Cantidad de agua
V	Cantidad de caña
Cte	Constante
CV	Coeficiente de variación
DH	Desintegración húmeda
σ	Desviación estándar
DMS	Diferencia mínima significativa
°C	Grados Celsius
g	Gramo
gl	Grado de libertad
Ha	Hipótesis alternativa

H1	Hipótesis investigación
Ho	Hipótesis nula
kg	Kilogramo
L	Litro
min	Minuto
mL	Mililitros
n	Número de datos
%	Porcentaje
PH	Prensa hidráulica
Rep	Repetición
SIE	Sin mayor influencia en la experimentación objetivo.
t	Tiempo
hp	Unidad de potencia
Var	Variable

GLOSARIO

Azúcar (sacarosa)	Es el compuesto orgánico de mayor producción en forma pura. Sustancia de sabor dulce, cristalizada en pequeños granos, que se extraen principalmente de la remolacha y de la caña de azúcar, a través de la concentración y la cristalización de su jugo.
Azúcar invertida	Cuando se hidroliza la sacarosa con ácido acuoso diluido, o por la acción de la enzima invertasa, se obtienen cantidades iguales de D-glucosa y D-fructosa.
Azúcares reductores	Son aquellos azúcares que presentan un carbono libre en su estructura y que pueden reducir, en determinadas condiciones, a las sales cúpricas.
Bagazo	Residuo sólido proveniente de la molienda de la caña de azúcar.
Brix	Es el porcentaje en peso de los sólidos contenidos en una solución de sacarosa pura. El brix representa los sólidos aparentes que contiene una solución de azúcar.

Brix real o sólidos reales	Porcentaje de sólidos determinados por la desecación a 105°C.
Caña de azúcar	Planta compuesta de hojas, tallos, raíces y eventualmente de flores.
Caña	Término genéricamente aceptado para designar los tallos industrializables de caña de azúcar.
Clarificación	Proceso de sedimentación del jugo alcalizado y caliente que separa el jugo claro o clarificado de los sedimentos llamados lodos o cachaza.
<i>Core Sampler</i>	Muestreo que se le realiza a la caña de azúcar con una sonda mecánica oblicua para determinar sus características de calidad.
Densidad	Es una medida intensiva referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen.
Extracción	Porcentaje total de jugo extraído en el proceso de molienda.
Extracción de pol	Pol en el jugo mezclado, porcentaje de Pol en caña.
Extracción de sacarosa	Sacarosa en el jugo mezclado, porcentaje de sacarosa en la caña.

Fibra	Es la materia seca insoluble en agua contenida en la caña.
ICUMSA	Comisión Internacional para los Métodos Uniformes de Análisis de Azúcar.
Imbibición	En el proceso de molienda de azúcar, la imbibición es la extracción máxima de la sacarosa contenida en el bagazo a través del lavado con jugo caliente de caña diluido.
Jugo absoluto	Todos los sólidos disueltos en la caña, más toda el agua; caña menos fibra.
Jugo clarificado	Jugo resultante del proceso de clarificación.
Jugo extraído	Se refiere a la proporción de jugo absoluto que fue extraído por algún medio mecánico (molienda).
Jugo mixto	Este jugo es el más importante de la fábrica, ya que corresponde a la mezcla de todos los jugos obtenidos en los diferentes molinos, en los cuales se adiciona agua para mejorar la extracción.
Jugo residual	Es el jugo retenido en el bagazo después de la extracción por algún medio mecánico (desintegración o prensado).

Materia extraña	Se considera todo el material que no contenga sacarosa o su concentración no resulte rentable para su extracción, tales como los despuntes, hojas verdes y secas, raíces, tallos, etc.
Pol	Representa el porcentaje aparente de sacarosa contenida en una solución de azúcares, siendo determinada por métodos sacarimétricos, basados en la propiedad de que los azúcares pueden hacer girar el plano de polarización.
Pol en caña	La pol determinada por sacarimetría en el jugo, puede ser expresada en porcentaje de caña utilizando el porcentaje de fibra en caña.
Pureza	Porcentaje de sacarosa obtenida en los sólidos solubles, siendo denominada pureza real cuando se utiliza el término pol y brix.
Tándem	Se le llama así al arreglo de los molinos, el cual está compuesto por tres mazas entre las cuales pasa la caña de azúcar para que se le extraiga el jugo.
Zafra	Proceso que se inicia con la cosecha de la caña de azúcar y finaliza con su entrega a la fábrica para su procesamiento.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación fue realizado con el objetivo de evaluar y comparar el método de desintegración húmeda para analizar la calidad del jugo de caña de azúcar desfibrada utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501, como un equipo y método alternativo en relación al método de prensa hidráulica.

Las variables analizadas para determinar la calidad del jugo proveniente de la caña de azúcar desfibrada, se definieron en: porcentaje humedad, densidad del jugo, porcentaje fibra caña, porcentaje brix caña y porcentaje pol caña, estas variables fueron las que se analizaron también para la evaluación del método de desintegración húmeda, para el cual se realizaron 13 tratamientos y a partir de estos se escogió el tratamiento que fuera mejor o igual al método propuesto por la literatura.

Con base a los resultados se determinó que el mejor tratamiento a utilizarse en el equipo anteriormente citado es: 400 g de caña desfibrada, 1 000 mL de agua desmineralizada y un tiempo de desintegración de 6 min. Entonces teniendo estas proporciones se procedió a documentar una metodología del método de desintegración húmeda aplicable a las condiciones del país.

Y con respecto a la comparación de los métodos no existió diferencia significativa ($P \leq 0,05$) entre ambos métodos, razón por la cual se podría utilizar el equipo citado como un equipo alternativo para el análisis del jugo de la caña desfibrada.

OBJETIVOS

General

Evaluar y comparar el método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501 a nivel laboratorio como un método alternativo para el análisis de la calidad del jugo proveniente de la caña de azúcar desfibrada obtenida en un ingenio azucarero de Guatemala en relación al método de prensa hidráulica.

Específicos

1. Evaluar el método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501 como una metodología analítica alternativa a nivel laboratorio para determinar la calidad del jugo de caña de azúcar desfibrada, obtenida en un ingenio azucarero de Guatemala.
2. Documentar el método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501 en un ingenio azucarero de Guatemala.
3. Comparar cuantitativamente la calidad del jugo proveniente de la caña de azúcar desfibrada, por el método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501 en relación al método de prensa hidráulica.

HIPÓTESIS

Investigación

H1

- La determinación de la calidad del jugo proveniente de la caña de azúcar desfibrada con el método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501 cumple con los valores de calidad de los análisis: porcentaje humedad, densidad del jugo, porcentaje fibra, porcentaje brix caña y porcentaje pol caña, al igual que el método de prensa hidráulica y debido a que consume menos energía y es de bajo costo inicial, permitiría reducir costos.

Estadística

Ho

- Los parámetros de calidad correspondiente a los análisis: porcentaje humedad, densidad del jugo, porcentaje brix caña, porcentaje pol caña y porcentaje fibra, determinados usando del método de desintegración húmeda por medio del equipo Digestor de caña modelo TE-0501, para obtener el lixiviado, es igual para todos los tratamientos propuestos, al variar la cantidad de agua.

- Los parámetros de calidad correspondiente a los análisis: porcentaje humedad, densidad del jugo, porcentaje brix caña, porcentaje pol caña y porcentaje fibra, determinados usando del método de desintegración húmeda por medio del equipo Digestor de caña modelo TE-0501, para obtener el lixiviado, es igual para todos los tratamientos propuestos, al variar la cantidad de caña desfibrada.
- Los parámetros de calidad correspondiente a los análisis: porcentaje humedad, densidad del jugo, porcentaje brix caña, porcentaje pol caña y porcentaje fibra, determinados usando del método de desintegración húmeda por medio del equipo Digestor de caña modelo TE-0501, para obtener el lixiviado, es igual para todos los tratamientos propuestos, al variar el tiempo.
- Los parámetros de calidad correspondiente a los análisis: porcentaje humedad, densidad del jugo, porcentaje brix caña, porcentaje pol caña y porcentaje fibra, determinados usando del método de desintegración húmeda por medio del equipo Digestor de caña modelo TE-0501, para obtener el lixiviado, son iguales a los obtenidos por el método de prensa hidráulica.

Nota: se asumen como iguales los valores cuya diferencia absoluta sea menor o igual al 5% de significancia.

Ha

- Los parámetros de calidad correspondiente a los análisis: porcentaje humedad, densidad del jugo, porcentaje brix caña, porcentaje pol caña y porcentaje fibra, determinados usando del método de desintegración húmeda por medio del equipo Digestor de caña modelo TE-0501, para obtener el lixiviado, no es igual para todos los tratamientos propuestos, al variar la cantidad de agua.
- Los parámetros de calidad correspondiente a los análisis: porcentaje humedad, densidad del jugo, porcentaje brix caña, porcentaje pol caña y porcentaje fibra, determinados usando del método de desintegración húmeda por medio del equipo Digestor de caña modelo TE-0501, para obtener el lixiviado, no es igual para todos los tratamientos propuestos, al variar la cantidad de caña desfibrada.
- Los parámetros de calidad correspondiente a los análisis: porcentaje humedad, densidad del jugo, porcentaje brix caña, porcentaje pol caña y porcentaje fibra, determinados usando del método de desintegración húmeda por medio del equipo Digestor de caña modelo TE-0501, para obtener el lixiviado, no es igual para todos los tratamientos propuestos, al variar el tiempo.
- Los parámetros de calidad correspondiente a los análisis: porcentaje humedad, densidad del jugo, porcentaje brix caña, porcentaje pol caña y porcentaje fibra, determinados usando del método de desintegración húmeda por medio del equipo Digestor de caña modelo TE-0501, para obtener el lixiviado, no son iguales a los obtenidos por el método de prensa hidráulica.

INTRODUCCIÓN

Los métodos para determinar la calidad de caña de azúcar han surgido debido a que en la mayoría de las industrias o ingenios productores que no son propiedad de las empresas de molienda, requieren el uso de un sistema de pago de la caña que sea equitativo para ambas partes, para evitar que la materia prima entregada sea caña de baja calidad y con alto contenido de materias extrañas.

El problema fundamental en la compra de la caña es evaluar la caña para saber exactamente qué contiene la caña que se compra. En el mundo azucarero existen normas de calidad establecidas para el azúcar refinado. Para satisfacer los requerimientos de los consumidores, los refinadores de azúcar han establecido normas para el azúcar crudo que compran como materia prima, cuando menos el valor de la pol.

Puesto que el productor de la caña sabe que será pagado sobre la base de la calidad de la misma, así como por su peso, emplea entonces métodos agrícolas que produzcan un aumento en la sacarosa así como también en el peso de la caña cosechada. Como requisito principal, cada productor de caña debe reconocer que la entrega de mejor caña lo beneficia económicamente y que el sistema de pago de caña no está concebido solamente para asegurar condiciones más fáciles para la manufactura y mejores beneficios para el molino.

1. ANTECEDENTES

En el 2010, Ana Checa realizó un estudio sobre el método de prensa hidráulica para determinar la calidad de la caña el cual se titula: Validación del Método de Prensa Hidráulica para determinar la calidad de caña que ingresa al ingenio azucarero del Norte, dicho estudio se realizó en Ecuador y menciona el método del primer molino que es el método con el que se trabaja comúnmente y el método de digestor el cual no se ha utilizado ampliamente en ese ingenio azucarero.

Los métodos para determinar la calidad de caña de azúcar han surgido debido a que en la mayoría de las industrias e ingenios productores que no son propiedad de las empresas de molienda, requieren el uso de un sistema de pago de la caña que sea equitativo para ambas partes, este acuerdo entre la industria y los productores puede tener un efecto significativo en la eficiencia de la industria, razón por la cual en algunos casos, es rentable para la compañía ofrecer incentivos a los productores para evitar que la materia prima entregada sea de gran tonelaje de caña de baja calidad y con alto contenido de materias extrañas.

En 1999, Lily García realizó un estudio sobre la comparación de los métodos de molinos y prensa hidráulica los cuales son los métodos que se utilizan en Guatemala para determinar la calidad de caña que se produce, la investigación se titula: Evaluación de un nuevo método para el análisis de jugo residual en un ingenio azucarero de Guatemala. Este estudio afirma que varía significativamente las propiedades del jugo residual analizado por ambos métodos, siendo más efectivo el método de prensa hidráulica.

En Guatemala el método de digestor de caña para determinar la calidad de la caña de azúcar es un método alternativo que se quiere evaluar para poderlo introducir como una herramienta de control de calidad en los laboratorios de los ingenios, además el creciente uso de los sistemas de gestión ha producido un aumento de la necesidad de asegurar que los laboratorios que forman parte de organizaciones o que ofrecen otros servicios, puedan funcionar de acuerdo con un sistema de gestión de calidad.

En el 2004, Sandra Ordóñez realizó un estudio sobre la evaluación de la productividad de un proceso agroindustrial azucarero el cual se titula: Modelo de diagnóstico para la evaluación de la productividad de un proceso agroindustrial azucarero, este estudio comprende un análisis acerca de las principales variables a controlar para que un ingenio o fábrica pueda extraer la más alta cantidad de sacarosa de las cañas de azúcar recibidas.

En una parte de la investigación estudian el método de molinos para analizar el jugo de la caña y realizar el balance de materiales en la molienda y sus parámetros, ya que esto permite conocer la calidad de la caña que está ingresando en el ingenio y analizar la efectividad del método usado.

Como se evidencia en las investigaciones de Lily García y Sandra Ordóñez el método de molinos es el más ampliamente utilizado en el país junto con el método de prensa hidráulica, pero no existen evidencias de la evaluación del método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501 como un método alternativo para el análisis de la calidad de la caña de azúcar que ingresa a un ingenio azucarero.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Proceso productivo de la caña de azúcar

El azúcar puede obtenerse principalmente a partir de la caña de azúcar y la remolacha azucarera. Para su obtención se requiere de un largo proceso, desde que la semilla de caña germina hasta que el azúcar se comercializa nacional o internacionalmente. A continuación se detalla el proceso de fabricación.

2.1.1. Generalidades

Para la agroindustria azucarera y panelera, la sacarosa presente en la planta de la caña es el elemento que finalmente saldrá al mercado, ya sea en forma de azúcar o en forma de panela. Por lo tanto, el cultivo de la caña, sus prácticas agronómicas y los programas de mejoramiento genético, han estado encaminados hacia la selección de variedades que produzcan mayores niveles de sacarosa por unidad de área.

La sacarosa constituye aproximadamente el 50% del total de la materia seca del tallo maduro de la caña de azúcar. “Las exigencias de humedad y variación de temperatura para obtener los máximos niveles de sacarosa han llevado a que en la mayor parte de las regiones azucareras del mundo la cosecha se realice únicamente durante una época del año, que se denomina zafra.”¹

¹ ORDÓÑEZ, Sandra. *Modelo de diagnóstico para la evaluación de la productividad de un proceso agroindustrial azucarero*. p. 1.

La agroindustria azucarera de Guatemala es la sexta productora mundial de azúcar, luego de Brasil, Tailandia, Australia, Cuba y Estados Unidos. Los destinos principales de las exportaciones de azúcar guatemalteca son Corea del Sur, Rusia, EEUU, Malasia, Canadá, Haití, Bulgaria, Chile, Jamaica, México, Venezuela y Ecuador.

“La industria azucarera despegó en el país a inicios de los años 60’s y actualmente hay 15 ingenios en todo el país, concentrándose la mayoría en las tierras planas de la costa del pacífico en los departamentos de Escuintla, Suchitepéquez, Retalhuleu y Santa Rosa.”²

2.1.2. Calidad de la caña

La calidad de la caña de azúcar se reconoce en el momento de la molienda por la cantidad de azúcar recuperable que se obtiene por tonelada de caña molida, lo cual depende de características como: alto contenido de sacarosa, bajo contenido de materiales extraños y bajos niveles de fibra.

2.1.2.1. Semilla

Como regla general para el cultivo de caña, se recomiendan semillas de variedades de caña que han dado buenos resultados bajo las condiciones climáticas y típicas del lugar. Hay variedades especiales de maduración tardía, de maduración intermedia, maduración temprana, variedades que expulsan las hojas, otras que son especialmente aptas para la producción de rapadura o panela, y muchas otras más.

² PÉREZ, Manuel; LAWRENCE Pratt. *Industria azucarera en Guatemala: análisis de sostenibilidad*. p. 62.

Es necesario disponer de semilla de alta calidad, de aquellas variedades reconocidas por su elevado potencial genético en el afán de aprovecharlo al máximo para mejorar la rentabilidad del cultivo y expandir las áreas cultivadas en las diferentes condiciones agroecológicas de producción. Se requiere un sistema ordenado de producción de semilla que permita ofrecer al productor materiales de alta calidad y garantizando la pureza de acuerdo a las demandas del campo según los planes de renovación y siembras nuevas.

2.1.2.2. Variedad de la caña

Para seleccionar la variedad de caña, se debe observar el comportamiento de diversas variedades en el terreno y así poder escoger la variedad que presente mejores resultados, el origen de la semilla es primordial. Muchas variedades son conocidas por nombres comunes, pero todas tienen un nombre que las identifica internacionalmente.

Este nombre corresponde a una clave compuesta por letras y números. Las letras señalan el lugar de origen de la variedad y el número del año cuando fue producida; y el número de cruza de la variedad, por ejemplo la variedad Mex 68P23 quiere decir que fue producida en México en el 1968 y que el número de cruza es P23.

En los últimos años en Guatemala ha surgido una nueva composición varietal de caña, integrada por las variedades de maduración temprana CP 721210 y CP 731547, y por las variedades de maduración intermedia CP 722086 y Mex 68P23. Para la siembra de la caña de azúcar es recomendable seleccionar las variedades que posean alto contenido potencial total de azúcar, esto es, libras de azúcar por tonelada de caña, se recomiendan aquellas que presenten potenciales totales de 320 a 350 lb/TC o más.

“Y se recomienda también que estas variedades con alto rendimiento de azúcar ocupen más del 35% del área total de caña sembrada.”³ A continuación se muestra una breve descripción de las principales variedades de caña de azúcar en la industria guatemalteca.

2.1.2.2.1. Variedad CP 731547

La variedad CP 731547 ocupa el cuarto lugar en la composición varietal actual, es la variedad que se ha cultivado por más tiempo, sin embargo su área de cultivo ha disminuido ligeramente. Este comportamiento sugiere que la CP 731547 es representativa de la mayoría de las variedades que no logran expandirse porque carecen sustancialmente de algún carácter agronómico.

Esta variedad presenta alta productividad de azúcar tanto por su tonelaje como por su concentración de azúcar; sin embargo, la variedad presenta deterioro de los tallos por formación acelerada de corcho. Este problema está asociado a su alta incidencia de floración y en la composición uniforme de tallos que conforma la macolla.

Lo anterior muestra que la variedad CP 731547 permanecerá en la industria sin alcanzar mayores áreas. Su tallo generalmente supera a la dimensión de grueso (31 mm); por su longitud es caña alta, superando muy fácilmente los 2,5 metros en sus tallos molederos. Su crecimiento en zig-zag es pronunciado y bajo condiciones de suelos bien drenados, las raíces adventicias son pocas.

³ Compañía Azucarera Salvadoreña. *Caña de azúcar: manual de variedades*. p. 45.

“Su tenacidad es moderada aunque no es afectada negativamente en la mayoría de plantaciones por el efecto de vientos fuertes. Su crecimiento es erecto, alcanzando los 15 tallos molederos por metro lineal. La longitud promedio de ésta es de 32 cm y su pilosidad es poca y suave.”⁴

2.1.2.2.2. Variedad CP 721210

Se considera de madurez principalmente temprana, para iniciar la zafra. Se han obtenido rendimientos de campo de hasta 117 ton/mz en plantía y en soca se han observado rendimientos de 80 y 110 ton/mz hasta el cuarto corte, aplicando de 2 a 3 riegos en época seca. Sus rendimientos azucareros alcanzan las 220 y 250 lb/ton entre los 10 y 12 meses de edad.

Es una variedad con la cual se pueden llegar a obtener de 9 a 12 toneladas de azúcar por manzana. Su tallo se aproxima bastante a la dimensión de grueso (20 a 30 mm); por su longitud es caña alta, bajo condiciones de buena humedad en el terreno durante algún período de la época seca, en los que supera muy fácilmente los 2,5 metros en sus tallos molederos.

En condiciones de tierra de seca no con texturas desde franco arcillosas a muy arcillosas con poca retención de agua, se expresa con tamaño pequeño o mediano de tallos (1,8 a 2 m).

Al momento de la cosecha, presenta hasta 14 tallos molederos por metro lineal. Su crecimiento en zig-zag es regular y bajo condiciones de suelos bien drenados o acame, no emite raíces adventicias.

⁴ Compañía Azucarera Salvadoreña. *Caña de azúcar: manual de variedades*. p. 52.

En general no se observa rajadura de crecimiento. “Su tenacidad es alta por lo que en la mayoría de plantaciones es poco dañada por el efecto de vientos fuertes. Su vaina es de buen despaje pues desprende fácilmente y su longitud promedio es de 7,3 cm con melosidad muy escasa y suave.”⁵

2.1.2.2.3. Variedad CP 722086

Ha sido la variedad más importante en la agroindustria azucarera guatemalteca. Su expansión es indudablemente debido a su alto tonelaje, alta concentración de azúcar, resistencia a las principales enfermedades, amplia adaptabilidad y buena habilidad de soqueo.

Su tallo es de diámetro mediano (25 a 30 mm). Por su longitud es caña alta pues supera muy fácilmente los 3 metros en sus tallos molederos. Su crecimiento en zig-zag es regular y no presenta raíces adventicias. En general no se le observa rajadura de crecimiento. Es de crecimiento erecto, excepto en condiciones de excesivo desarrollo. Su tenacidad es moderada, pero en la mayoría de plantaciones es muy poco dañada por el efecto de vientos fuertes. Alcanza poblaciones de 12 a 14 tallos molederos por metro lineal.

“Su vaina es de buen despaje pues desprende fácilmente, y su longitud promedio es de 32,1 cm y en cuanto a su pilosidad es lampiña. Normalmente es de moderada a abundante su tendencia a la floración. Sólo bajo condiciones muy especiales de terrenos en la costa con meses muy claros y luminosos de agosto y septiembre, se ha observado ser inhibida a florecer en absoluto.”⁶

⁵ Compañía Azucarera Salvadoreña. *Caña de azúcar: manual de variedades*. p. 56.

⁶ Compañía Azucarera Salvadoreña. *Caña de azúcar: manual de variedades*. p. 62.

2.1.2.2.4. Variedad Mex 68P23

Esta variedad ocupa el tercer lugar en área sembrada. Los datos indican que la tendencia de la variedad Mex 68P23 en composición varietal es hacia una disminución del área sembrada.

Las principales limitantes de tal variedad han sido la baja concentración de sacarosa, inestabilidad a través del área cañera y su baja habilidad de soqueo.

Su tallo generalmente supera a la dimensión de grueso (31 mm); por su longitud es caña alta, supera fácilmente los 2,5 metros en sus tallos molederos debido a que bajo toda condición con humedad en el suelo dentro de la época seca ella continúa creciendo por su alta resistencia a florecer.

Su crecimiento en zig-zag es regular y bajo condiciones de suelos bien drenados las raíces adventicias son pocas y se manifiestan solamente entre el primero y segundo entrenudo.

“Su tenacidad es alta por lo que en la mayoría de plantaciones es poco dañada por los vientos fuertes. Su vaina es de excelente despaje con longitud promedio de 32 cm y muy poca pilosidad suave, con abundante presencia de cera en las secciones más jóvenes.”⁷

⁷ Compañía Azucarera Salvadoreña. *Caña de azúcar: manual de variedades*. p. 70.

Tabla I. **Características agronómicas de las principales variedades de caña**

VARIEDAD	PORCENTAJE DE POL EN LA CAÑA	PORCENTAJE DE PUREZA EN EL JUGO	PORCENTAJE DE FIBRA
CP 731547	18	85-89	10-13
CP 721210	15-19	84-87	11-14,5
CP 722086	15-18	86-92	13
Mex 68P23	16	84-87	10-12

Fuente: Caña de azúcar. *Manual de variedades*. p. 39.

2.1.3. Labores agrícolas

Las labores agrícolas de la caña de azúcar son las que permiten tener una producción y provisión de caña de azúcar de la mejor calidad mediante el manejo de los recursos, generación y aplicación de tecnología para el manejo eficiente del campo para su posterior procesamiento en la fábrica.

2.1.3.1. Preparación de suelos

Dentro de las labores para una buena preparación de suelos se recomienda el paso de subsolador a 50 cm de profundidad para romper estratos o capas compactas del suelo, situadas por debajo del nivel de corte del arado y para que la planta desarrolle un sistema radicular más profundo y más extenso que ayude a un mejor desarrollo y producción.

Después realizar los pasos de arado a 40 cm de profundidad con el objetivo de romper y descompactar el suelo a la vez de destruir e incorporar las malezas y residuos de cosechas anteriores, con lo que se estaría incrementando la porosidad y el movimiento del agua a través del perfil, lo que representa un mayor desarrollo radicular y mejor aprovechamiento del agua y de los nutrientes del suelo por la planta.

Seguidamente se rastra dos veces el suelo de forma cruzada a 25 cm de profundidad para romper los grandes terrones que deja la aradura y que obstaculizan las posteriores labores de labranza y siembra. Luego se realiza el nivelado, cuyo objetivo es acondicionar el relieve o topografía del terreno, para mejorar la eficiencia del riego, drenaje, así como una buena cama de siembra.

Inmediatamente después se realiza el surcado, que es la última labor de preparación de suelo para la siembra, su trazado se hace en función del riego, del drenaje y de la mecanización del cultivo, especialmente de la cosecha, sus distanciamientos oscilan entre 1,3 y 1,5 m.

También “la mecanización está asociada a la compactación de los suelos que a su vez disminuye los rendimientos del cultivo por dificultad de las raíces de penetrar adecuadamente el suelo en busca de nutrientes para su máximo desarrollo. La compresión del suelo reduce el volumen de los macroporos, disminuyendo la permeabilidad del aire, el agua y la capacidad de retención de humedad.”⁸

⁸ ORDÓÑEZ, Sandra. *Modelo de diagnóstico para la evaluación de la productividad de un proceso agroindustrial azucarero*. p. 13.

2.1.3.2. Siembra

Se recomienda realizar la siembra, si es en verano, lo más pronto posible después de haber finalizado las lluvias para aprovechar la humedad del terreno, y si es en riego, aplicando preriego al fondo del surco un día antes de realizar la siembra. Existen ciertas modalidades de siembra como son: cadena simple y simple traslapada, cadena doble simple y doble traslapada.

Se recomienda utilizar la cadena simple traslapada, con el objeto de evitar las altas densidades poblacionales, reduciendo así la competencia por el agua y los nutrientes del suelo. El material de siembra debe ser de preferencia de cultivos sanos y vigorosos, con una edad de seis a nueve meses, se recomienda utilizar la parte media del tallo, se deben utilizar preferentemente estacas con 3 yemas.

El tapado de la semilla se puede realizar a tres formas: manualmente utilizando azadón, con tracción animal y mecánicamente. La profundidad de siembra oscila entre 20 a 25 cm, con una distancia entre surco de 1,30 a 1,50 metros.

“La semilla debe de quedar cubierta con 5 cm de suelo, una capa más gruesa retrasa la emergencia y a menudo ocasiona mortalidad de la semilla, el espesor de la tierra que se aplica para tapar la semilla no sólo influencia la germinación y el establecimiento de la población, sino también el desarrollo temprano de las plantas de caña.”⁹

⁹ Compañía Azucarera Salvadoreña. *Sistemas de siembra paquetada, siembra semimecanizada, resiembras, fertilización a la siembra.* p. 14.

2.1.3.3. Fertilización de la caña de azúcar

Normalmente se utiliza la fertilización tecnificada, basada en el conocimiento del comportamiento de los distintos tipos de suelo, de su fertilidad natural, actual y potencial, de las diferentes fuentes que son utilizados como fertilizantes y de la posible demanda de nutrimentos para una cosecha específica.

El propósito de ésta es lograr que una plantación fertilizada pueda absorber los nutrimentos con la mayor eficiencia posible y que en los ambientes, tanto internos como externos del suelo se produzca el menor deterioro físico o químico, para que en corto plazo, mediante los procesos naturales de restauración, se retorne a las condiciones iniciales, cumpliendo con los parámetros de la agricultura sostenible.

La planta de caña posee altos requerimientos nutricionales en consideración a su elevada capacidad de extracción, y remoción de nutrientes del suelo y su alta producción de materia verde y seca.

Se ha demostrado en la práctica que este cultivo rápidamente agota los suelos, siendo necesario un programa adecuado de fertilización, que restituya al suelo lo absorbido por la planta, y lo que haya perdido a través de la materia prima cosechada y procesada en el ingenio. “Para una buena fertilización en el cultivo se recomienda realizar un análisis al suelo previo a la siembra y análisis foliar a los 4 meses de edad, para conocer el estado nutricional de la planta.”¹⁰

¹⁰ PÉREZ, Manuel; LAWRENCE Pratt. *Industria azucarera en Guatemala: análisis de sostenibilidad*. p. 23.

Tabla II. **Cantidades de fertilizante recomendadas**

ELEMENTOS	LIBRAS EXTRAÍDAS POR TONELADA DE CAÑA
Nitrógeno	3,66
Fósforo (P ₂ O ₅)	1,62
Potasio (K ₂ O)	6,30
Calcio	1,12
Magnesio	0,81
Azufre	0,81
	GRAMOS EXTRAÍDOS POR TONELADA DE CAÑA
Hierro	10,53
Manganeso	6,30
Zinc	2,71
Cobre	1,08
Boro	1,03

Fuente: Boletín Técnico Central Izalco, 2001. p. 16

2.1.3.4. Resiembra

Consiste en la plantación de yemas, esquejes, plántulas o porciones de macollas en tramos de los surcos en donde no hay plantas, con el fin de mantener la densidad poblacional por manzanas de cepas de caña de azúcar, asegurando la productividad del cultivo a través de los años de duración del mismo, y evitando de esta manera las disminuciones drásticas causadas por la pérdida natural o mecánica de macollas.

Esta práctica aumenta los beneficios económicos anuales debido a que aumenta la productividad de campo prolongando los ciclos de renovación del cultivo. Cuando la época es seca, la resiembra debe hacerse en aquellos lugares con suficiente humedad natural o en donde exista riego. Si la época es lluviosa, se debe hacer siempre y cuando la cobertura de los renuevos no vaya a afectar negativamente al desarrollo de la misma.

2.1.4. Gestión de cosecha

La gestión de cosecha es el proceso que se le realiza a la caña de azúcar previo a ingresar al ingenio. Este incluye la quema, corte, el transporte de la caña al ingenio y su posterior deterioro.

2.1.4.1. Quema

La quema de la caña de azúcar antes de ser cosechada es una práctica que se da con la finalidad de bajar los costos de producción, aumentar el rendimiento de la cantidad de caña cortada por hora, disminuir el peligro de animales ponzoñosos y disminuir las impurezas transportadas al ingenio.

“Al quemar la caña de azúcar se inducen efectos negativos sobre la misma: uno es la pérdida de peso por evaporación del agua y otro es una baja en el contenido de azúcar por inversión de la sacarosa en dextrosa y levulosa. Los efectos negativos que inciden de la caña de azúcar se inician desde que se quema y aumentan progresivamente a medida que transcurre el tiempo hasta que se muele.”¹¹

¹¹ Compañía Azucarera Salvadoreña. *Programación de cosecha y manejo de quemas en caña de azúcar*. p. 15.

Con la caña mal quemada llega más fibra a los molinos, disminuyéndose tanto la extracción como la capacidad de molienda. Se dificulta la clarificación y aumentan los costos de fabricación.

Existen estudios que hacen referencia a las pérdidas en peso y azúcar por la quema. Se ha observado que en promedio se pierden diariamente 3,18% de peso y 0,71 lb de azúcar por tonelada de caña por hora, que pueden variar de acuerdo a las condiciones particulares del lugar.

2.1.4.2. Corte

El corte de caña se realiza básicamente por mano de obra campesina que acuden a los ingenios durante el tiempo de zafra. Cuando la caña es cortada manualmente, existe un porcentaje de materia extraña presente en la misma, el cual no debe ser mayor que 5% en condiciones ideales, este porcentaje alcanzaría valores menores de 1%.

Los métodos mecanizados de corte de caña no han tomado auge por su alto costo, condiciones especiales de funcionamiento del equipo y la oferta abundante de mano de obra no calificada que necesita fuentes de trabajo. Además, cuando la caña es cortada mecánicamente, alcanza altos porcentajes de materia extraña, llegando en casos extremos a valores mayores de 10% y en casos ideales a valores menores de 2%.

La calidad de la caña en el campo tiende a mejorar con la edad, llega a un máximo, y luego declina. La edad de la caña se determina de acuerdo a los cortes que ésta posea; es recomendable que para una mayor eficiencia de la caña, posea de 1 a 6 cortes, pues valores superiores a los 8 cortes se traducen en baja productividad.

Cualquiera que sea la calidad en el momento del corte, se inicia un rápido deterioro desde el momento en que es cortada la caña. Después de cortada, la caña pierde agua (1 a 2% diariamente en la primera semana). Cuando se quema la caña antes de ser cortada, las pérdidas de agua son mínimas, especialmente si se muele la caña dentro del primer día después de cortada.

2.1.4.3. Transporte de la caña al ingenio

La movilización de la caña desde los campos hasta el ingenio es hecho por transporte vehicular principalmente, grandes camiones que arrastran vagones con capacidades de 20 hasta 40 toneladas cada uno son movilizados a los patios de recepción de los ingenios.

El consumo de combustible de origen no renovable (hidrocarburos) es alto, siendo esta etapa una de las más costosas en el proceso productivo de la caña. Si estos camiones y los vagones ruedan sobre la superficie de los campos de siembra propician una excesiva compactación del suelo por donde pasan.

2.1.4.4. Deterioro de la caña

Por lo general, el deterioro tiene lugar mediante procesos enzimáticos, químicos y microbianos. La enzima invertasa que se encuentra naturalmente en la caña, convierte a la sacarosa en azúcares invertidos (glucosa y fructuosa) disminuyendo así la pureza. El deterioro químico incluye la inversión causada tanto por las condiciones ácidas, las cuales aumentan a medida que se deteriora la caña, como por un efecto secundario de algún tipo de crecimiento microbiano.

Los productos microbianos cambian aun más con el tiempo para formar ácidos y compuestos coloreados. El deterioro microbiano es causado principalmente por una bacteria del género leuconostoc, estos organismos consumen sacarosa, produciendo largas cadenas de glucosa y fermentando la fructosa en ácidos orgánicos como productos secundarios.

Estos organismos son responsables además de la formación de dextrano. Cantidades relativamente pequeñas de dextrano presentes en el jugo de caña (del orden de 103 ppm) aumentan la viscosidad, retardan la cristalización y la filtración, y disminuyen el rendimiento de sacarosa.

El intervalo entre el corte y la molienda es el período en el que los niveles de dextrano alcanzan sus valores más altos. Se ha encontrado que los niveles de dextrano en la caña picada durante la recolección aumentan hasta 700 ppm en 2 días.

La reducción al mínimo de tiempo que transcurre entre el corte y la molienda constituye la medida más efectiva y práctica de controlar la formación de dextrano.

2.1.5. Proceso de fábrica

El proceso de fábrica de la caña de azúcar consiste en la obtención del azúcar que llega a las manos de los consumidores a través de procesos físicos y químicos desde la recepción de la caña de azúcar desde los patios hasta su envasado y distribución.

2.1.5.1. Recepción y lavado de la caña

Una vez que la caña de azúcar llega al patio de recepción en el ingenio es descargada y el exceso de tierra y piedras son removidos mediante el lavado de caña. El tiempo de permanencia de la caña en el patio, antes de la molienda debe ser menor de 12 horas para evitar la descomposición de la sacarosa.

La etapa de lavado es intensiva en el consumo de agua y uno de los puntos críticos de contaminación de no tomarse las medidas para la recuperación y ahorro del agua utilizada, especialmente si se descarga agua sucia a los ríos. La razón por la cual se lava la caña es para eliminar las impurezas y materia extraña como tierra que le resta pureza y color al azúcar refinado y disminuye el rendimiento de azúcar por tonelada de caña molida.

“Una limpieza minuciosa de la caña da por resultado un menor desgaste del equipo de molienda y del sistema de bombeo del jugo y permite que el ingenio opere a plena capacidad. Reduce así mismo las pérdidas de sacarosa en la cachaza del filtro debido a que se reduce la cantidad de lodo en el mismo.”¹²

2.1.5.2. Molienda y sus parámetros

El primer paso en el proceso fabricación del azúcar de caña es la extracción del jugo (guarapo) mediante la compresión de la caña entre cilindros de gran tamaño llamados mazas. Este paso consiste en separar la sacarosa e impurezas en solución de las insolubles, que en términos de ingenio se conocen como fibra.

¹² CHEN, James. *Manual del azúcar de caña para fabricantes de azúcar*. p. 12.

Antes de esta extracción se prepara la caña para la molienda, haciéndola pasar bajo cuchillas giratorias que cortan los tallos y los convierten en astillas, entre mazas de rayado grueso que quiebran la caña y exprimen gran parte del jugo, o más generalmente, a través de combinaciones de tres mazas entre las cuales pasa sucesivamente la caña exprimida o bagazo.

Durante el trayecto de la caña entre las mesas/conductores y el primer molino, puede existir una caída de pol en caña total, la cual debe ser menor de 4 lb/TC, evitando llegar a valores superiores de 15 lb/TC. Al entrar la caña al primer molino se obtiene un primer jugo, el de la primera extracción, que contiene la mayor cantidad de sólidos disueltos y la más alta pureza.

El primer jugo debe contener idealmente un porcentaje menor a 0,5% de sólidos sedimentables, y en condiciones extremas valores de hasta 3%, pero debe evitarse sobrepasar este porcentaje para lograr una mayor eficiencia en la recuperación final.

A medida que se extrae en los demás molinos todo el jugo, la pureza disminuye en virtud de que se obtienen otros componentes no deseados como azúcar no cristalizable, ceras, gomas, etc.

Para determinar la pureza del jugo del primer molino, se recomienda compararla con la del último molino, cuando la diferencia de pureza entre estos dos jugos es menor a 0,5% se puede establecer que la extracción ha sido eficiente y que se puede lograr una alta productividad del azúcar, caso contrario ocurre cuando la diferencia es igual o mayor que 2%.

Para ayudar a la extracción del jugo, se rocía la torta de bagazo al salir de cada unidad moledora con chorros de agua o jugo pobre en azúcar; esto ayuda a la extracción de azúcar por lixiviación.

El porcentaje de imbibición adecuado debe estar entre 20 a 25% o ser mayor, y se debe lograr un porcentaje de extracción diluida entre 96 a 98% o mayor, todo esto se traducirá posteriormente en eficiencias elevadas de recuperación de azúcar.

Los mejores procedimientos de molienda logran extraer del jugo de la caña más del 95% del azúcar que contiene, este porcentaje se llama extracción de sacarosa (pol de extracción), por la continua trituración tiene lugar una reducción en el brix, la polarización y la pureza, con el consecuente aumento de los no azúcares.

En lo que respecta a la composición del jugo extraído, “mientras más sacarosa se extraiga mayor será la proporción de materiales indeseables que acompañan a la sacarosa. No sólo es cuestión de menor pureza, sino también del carácter de los agentes que reducen la pureza.”¹³

El bagazo final que sale del último molino contiene el azúcar no extraído, la fibra leñosa y de 40 a 50% de agua. Este bagazo contiene jugo con sólidos azucarados que ya no se pudieron extraer. El porcentaje de pol en el bagazo que sale del último molino no deberá sobrepasar entonces el 3%, manteniéndose en valores menores a 1%.

¹³ CHEN, James. *Manual del azúcar de caña para fabricantes de azúcar*. p. 25.

Dentro y alrededor de los molinos tienen lugar pérdidas considerables de azúcar. Se calcula que la pérdida de azúcar alrededor de los molinos es de 13% debido a la inversión química, 25% a causa del efecto enzimático y 62% al crecimiento microbiológico.

Las pérdidas por inversión deben mantenerse por debajo de 0,5 lb/TC, evitando sobrepasar las 0,9 lb/TC. Entre los parámetros que se manejan en la molienda se encuentran los siguientes:

- Especificaciones jugo diluido:
 - ✓ Brix > 14,5
 - ✓ Pol > 12,7
 - ✓ Pureza > 87 %

- Especificaciones bagazo
 - ✓ Pol < 2,0
 - ✓ Humedad: 49 – 51 %

- Parámetros operativos
 - ✓ Tasa de molienda (velocidad/hora efectiva)
 - ✓ Imbibición galones/min (de 100 ton de caña 27 son agua)
 - ✓ Temperatura: 60°C
 - ✓ Tiempo perdido (producción * tiempo total)
 - ✓ Bacterias: 11 ppm

Figura 1. **Molinos de caña de azúcar**



Fuente: ORDÓÑEZ, Sandra. *Modelo de diagnóstico para la evaluación de la productividad de un proceso agroindustrial azucarero*. p. 27

2.1.5.3. Clarificación del jugo

El segundo paso consiste en el tratamiento del jugo extraído con el objeto de remover algunas impurezas insolubles y las que se encuentran disueltas. El jugo de color verde oscuro procedente de los molinos es ácido y turbio. El proceso de clarificación (o defecación) diseñado para remover las impurezas tanto solubles como insolubles, emplea en forma universal cal y calor, agentes clarificantes.

El principal objetivo de la clarificación es estabilizar el pH del jugo para hacer mínima la pérdida de sacarosa por inversión y mejorar el proceso de cristalización, otro objetivo es eliminar el material insoluble suspendido o acarreado en el jugo (fibra, residuos de suelo, sólidos en suspensión y coloides principalmente) obteniendo un jugo claro, transparente, brillante, exento de toda materia que no sea azúcar, que pueda evitar la cristalización.

Para la clarificación se utiliza lechada de cal, \pm 1 libra CaO/TC, que neutraliza la acidez natural del guarapo, formando sales insolubles de calcio, en su mayor parte fosfato de calcio. En general, resulta deseable agregar el mínimo de cal que produzca un jugo claro con una reacción final cercana a un pH de 7.

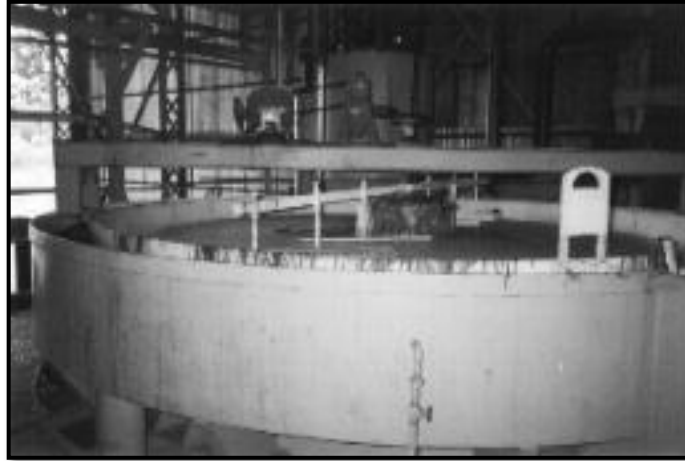
“Si el pH de los jugos claros llega a 7 puede haber una adición excesiva de cal. Es necesario evitar la alcalinización excesiva, y si no es posible obtener un jugo claro por defecación simple, sin tener que alcalinizarlo hasta un pH muy alto, debe añadirse fosfato.”¹⁴ El calentamiento del guarapo alcalinizado hasta el punto de ebullición o ligeramente arriba coagula la albúmina y algunas grasas, ceras y gomas.

Con la aplicación de un polímero polielectrónico se forma un precipitado que atrapa los sólidos en suspensión al igual que las partículas más finas y sale un jugo claro, libre de partículas sólidas, en forma cristalina. Todos los clarificadores están aislados a fin de conservar el calor y facilitar la sedimentación de las cachazas.

La clarificación separa el jugo en dos porciones, el jugo clarificado y los precipitados sedimentables, espumas y lodos. El jugo clarificado, que consiste en el 80 a 90% del jugo original, casi invariablemente pasa a los evaporadores sin más tratamiento. Las espumas y lodos se filtran. El tiempo de residencia de estos equipos es variado, pudiendo oscilar entre 0,25 y 3 horas, dependiendo de las condiciones del proceso y del diseño del equipo utilizado.

¹⁴ CHEN, James. *Manual del azúcar de caña para fabricantes de azúcar*. p. 36.

Figura 2. **Clarificador de jugo de caña de azúcar**



Fuente: ORDÓÑEZ, Sandra. *Modelo de diagnóstico para la evaluación de la productividad de un proceso agroindustrial azucarero*. p. 30.

2.1.5.4. Evaporación

En este paso se remueve una considerable cantidad de agua del jugo clarificado. El jugo clarificado tiene más o menos la misma composición que el jugo extraído, excepto las impurezas extraídas en la clarificación por el tratamiento con cal, y contiene aproximadamente 85% de agua.

Dos terceras partes de esta agua se evaporan en evaporadores al vacío de múltiple efecto, normalmente de cuatro a cinco cuerpos de evaporación. El requerimiento básico de estos tipos de evaporadores para asegurar su operación, es que la temperatura de ebullición del líquido en cada efecto sucesivo sea más baja que la temperatura del vapor que entra al efecto.

Esta diferencia de temperatura suministra la fuerza impulsora para efectuar la transferencia de calor del vapor al líquido. El jugo entra y sale del sistema en forma continua. El jarabe que sale del último efecto (meladura) lleva una concentración aproximada de 65% de sólidos en peso y 35% de agua.

El objetivo de este proceso es eliminar la mayor cantidad de agua presente sin provocar cristalización, también hacer mínima la descomposición de sacarosa por altas temperaturas durante tiempos largos.

En el proceso de evaporación se tienen los siguientes productos involucrados: jugo clarificado, vapor vegetal y vapor de escape.

Los factores que son importantes para una buena operación de evaporación son: la presión absoluta del último efecto (controlada por la cantidad de agua suministrada al equipo de condensación), concentración de la meladura (debe mantenerse debajo de 70°brix para evitar la cristalización), el nivel del líquido en el interior de los tubos y baja presión hidrostática.

En los evaporadores de múltiple efecto las pérdidas de sacarosa se ocasionan principalmente por arrastre, es decir, que los vapores generados en cualquier efecto de un evaporador de múltiple efecto siempre contienen pequeñas gotas que llevan azúcar.

Las pérdidas de azúcar por arrastre se pueden disminuir hasta un 98,5% mediante la instalación de un separador centrífugo interno además de controles de presión absoluta y nivel.

Figura 3. **Evaporadores de múltiple efecto**



Fuente: ORDÓÑEZ, Sandra. *Modelo de diagnóstico para la evaluación de la productividad de un proceso agroindustrial azucarero*. p. 32.

2.1.5.5. Cristalización

La cristalización tiene lugar en los tachos al vacío de simple efecto, donde el agua en el jarabe se evapora hasta quedar saturado de azúcar. En este momento se añaden semillas a fin de que sirvan de núcleos para los cristales de azúcar y se vaya añadiendo más jarabe según se evapora el agua.

El crecimiento de los cristales continúa hasta que se llena el tacho, de tal manera que cuando el tacho está totalmente lleno todos los cristales tienen el tamaño deseado.

La función de los tachos al vacío es producir cristales de azúcar satisfactorios a partir del jarabe o las mieles. La concentración de la alimentación suministrada a los tachos es por lo general de 60 a 65 brix.

Las altas densidades reducen el consumo de vapor y acortan la duración del ciclo, pero una densidad demasiado alta puede implicar el riesgo de producir conglomerados y falso grano. Cuanto más pequeños sean los cristales, mayor será el área superficial por unidad de peso disponible para el depósito de sacarosa proveniente de las aguas madres durante el cocinado y el enfriamiento.

Si otros factores permanecen constantes, la rapidez con que las aguas madres son agotadas en cuanto a sacarosa recuperable es directamente proporcional al área superficial de los cristales en la masa cocida. Por tanto, con cristales más pequeños debe ser posible obtener la ventaja ya sea de una miel final de menor pureza o bien de una miel de la misma pureza en menos tiempo.

Por otro lado, mientras más pequeños sean los cristales menor será la eficiencia de las centrífugas y mayor la cantidad de melazas que se volverán a evaporar con el azúcar crudo de baja pureza. A pesar de que el tamaño óptimo de los cristales durante el purgado de masas cocidas de baja pureza varía considerablemente, dependiendo de las condiciones locales, el tamaño promedio usualmente está entre 0,2 y 0,4 milímetros.

El objetivo de la cristalización es producir cristales de sacarosa en condiciones óptimas para separación posterior, agotar al máximo el contenido de sacarosa del producto residual del proceso, melaza o miel final, operar la evaporación con el tipo y cantidad de vapor disponible y evitar hasta donde sea posible la descomposición térmica de sacarosa. En el proceso están involucrados los siguientes productos: masa cocida, miel y miel virgen.

“Se emplea actualmente un sistema de tres masas, el cual produce masas de tercera, que se purgan y producen miel final para la venta y magma de tercera. El magma de tercera sirve de semilla para producir masas de segunda, las cuales al purgarse producen miel B que se procesa y magma de segunda. El magma de segunda sirve de semilla para las masas de primera, las cuales se purgan y producen azúcar para la venta y miel A la cual se reprocesa.”¹⁵

La pureza esperada o pureza ideal es aquella que representa a una melaza totalmente agotada.

Figura 4. **Tacho cristalizador**



Fuente: ORDÓÑEZ, Sandra. *Modelo de diagnóstico para la evaluación de la productividad de un proceso agroindustrial azucarero*. p. 35.

¹⁵ ORDÓÑEZ, Sandra. *Modelo de diagnóstico para la evaluación de la productividad de un proceso agroindustrial azucarero*. p. 32.

2.1.5.6. Centrifugación o purga

La masa cocida proveniente del cristalizador se carga a máquinas giratorias de alta velocidad, conocidas como centrífugas. Es un tambor cilíndrico suspendido de un eje, el tambor tiene paredes laterales perforadas.

El revestimiento perforado retiene los cristales de azúcar lavada, la miel pasa a través de las telas debido a la fuerza centrífuga.

El objetivo de la centrifugación es separar completamente la miel madre y los cristales presentes en las masas, mantener hasta donde sea posible el tamaño y características de los cristales que se encuentren presentes y efectuar la separación azúcar miel en el menor tiempo posible, con el menor uso de energía y agua.

Los productos involucrados son: lavado, que es una mezcla homogénea sin grano de tres componentes básicos, el agua utilizada para lavar el grano dentro de la máquina centrífuga, residuos de la miel madre que ha envuelto a los cristales y disolución parcial del azúcar presente.

“El azúcar separado en este proceso puede ser ya el producto final conocido como azúcar crudo, o por el contrario puede devolverse al proceso como semilla o foco de un grano de azúcar más grande.”¹⁶

¹⁶ ORDÓÑEZ, Sandra. *Modelo de diagnóstico para la evaluación de la productividad de un proceso agroindustrial azucarero*. p. 36.

Figura 5. **Máquina centrífuga**



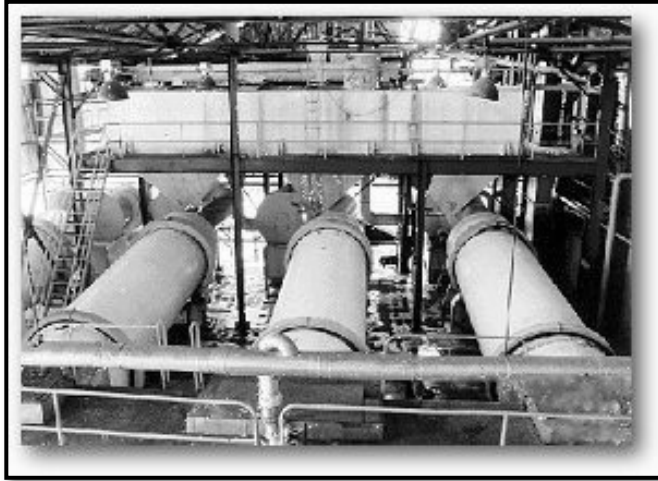
Fuente: ORDÓÑEZ, Sandra. *Modelo de diagnóstico para la evaluación de la productividad de un proceso agroindustrial azucarero*. p. 36.

2.1.5.7. Secado

El azúcar libre de la miel se conduce hacia la secadora/enfriadora, la cual es un tambor giratorio horizontal con aspas, persianas o colmenas interiores que permiten el contacto del azúcar con aire caliente desde un extremo del tambor, para eliminar la humedad ligada al cristal, que es de aproximadamente 1% hasta llegar a humedad de de 0,035%.

A su vez permite el contacto con aire frío por el extremo opuesto para el acondicionamiento térmico de los cristales, de modo que la temperatura de salida de la secadora sea muy cercana a la del ambiente, evitando así aterronamiento, debido al carácter higroscópico del azúcar.

Figura 6. **Máquina secadora de azúcar**



Fuente: ORDÓÑEZ, Sandra. *Modelo de diagnóstico para la evaluación de la productividad de un proceso agroindustrial azucarero*. p. 37

2.1.5.8. Refinación

En esta etapa se separa y clasifica el azúcar por su calidad y granulometría antes de salir al consumo nacional. En Guatemala por ley, el azúcar destinado para consumo humano tiene que ser suplementada con vitamina A. Esta exigencia es igual para toda azúcar sea nacional o extranjera destinada al consumo de mesa.

2.2. Métodos de caracterización de la caña de azúcar

El problema fundamental en la compra de la caña es evaluar la caña para saber exactamente qué contiene la caña que se compra. En el mundo azucarero existen normas de calidad establecidas para el azúcar refinado. Para satisfacer los requerimientos de los consumidores, los refinadores de azúcar han establecido normas para el azúcar crudo que compran como materia prima, cuando menos el valor de la Pol.

Lógicamente, los productores de azúcar crudo deben a su vez establecer normas para la caña de azúcar a fin de cumplir con los requisitos de calidad y cantidad del azúcar crudo. Los sistemas de pago de caña son por el precio neto o por la compra sobre análisis, a continuación se detallan estos sistemas de pago.

Precio neto: este sistema consiste en que la caña se paga a un precio basado en el precio del crudo o el del mercado local. No considera la calidad de la caña con relación al contenido de sacarosa y a la pureza del jugo.

La desventaja de este método es que a los productores no les interesa si la caña entregada está limpia o no, lo que conlleva a que el azúcar producido por tonelada de caña declina año tras año, aun cuando la calidad de la caña misma no haya disminuido.

Compra sobre análisis: este sistema es usado en un gran número de países productores de caña. La ventaja que presenta radica en lograr un arreglo equitativo satisfactorio tanto para el productor de la caña como para el fabricante del azúcar.

Todas las fábricas en los países donde se paga la caña a un precio basado en el análisis tienen un laboratorio en el que se analiza el jugo de la caña procedente de los diferentes campos o ingenios.

Puesto que el productor de la caña sabe que será pagado sobre la base de la calidad de la misma, así como por su peso, emplea entonces métodos agrícolas que produzcan un aumento en la sacarosa así como también en el peso de la caña cosechada. La pronta entrega de la caña después del corte es también de importancia para el cultivador además de que la recepción de caña fresca en la fábrica reduce grandemente los costos en la producción del azúcar.

El reconocimiento de que las variaciones en el contenido de fibra tienen gran influencia en la cantidad de azúcar que se puede obtener de un lote de caña ha dado como resultado que la proporción de fibra de caña sea incluida en muchas de las fórmulas de los contratos de compra de caña.

Los varios sistemas para la compra de caña no dejan duda de que el pago sobre el análisis de la caña entregada es superior al precio neto o la compra al bulto de toda la caña con pago basado en un rendimiento promedio.

Cualquier sistema basado en costumbres económicas prácticas y factibles probablemente tiene ventajas locales, pero puede ser discutible si los métodos más complicados de cálculo resultan en una distribución más justa que la que se logra con sistemas más sencillos.

Como requisito principal, cada productor de caña debe reconocer que la entrega de mejor caña lo beneficia económicamente y que el sistema de pago de caña no está concebido solamente para asegurar condiciones más fáciles para la manufactura y mejores beneficios para el molino.

Los métodos de análisis directo de caña de azúcar pueden ser clasificados de acuerdo con los sistemas de extracción del jugo. Existen tres métodos de extracción:

- Primer molino
- Desintegración húmeda
- Prensa hidráulica

“Por tratarse de diferentes técnicas de obtención de resultados, los valores obtenidos pueden diferir entre sí. De esta manera se torna necesario establecer que análisis se van a realizar y que precisión se desea alcanzar.”¹⁷

2.2.1. Método del primer molino

El método del primer molino consiste en caracterizar el jugo extraído del primer molino mediante los grados brix, pol, pureza y la fibra correspondiente al mismo lote de caña. Este método presenta el inconveniente de que las condiciones de trabajo no son controladas por el analista sino por el operador de la maquinaria. Se utiliza este método para determinar el balance de sacarosa de la fábrica pero no para el pago de materia prima.

Sin embargo, desde que se mecanizó la cosecha de la caña, el jugo extraído sólo representa a la caña neta y no a la caña bruta entregada a los molinos. Si se desconoce la cantidad de materia extraña y por lo tanto no es descontada, la calidad del jugo analizado puede ser errónea y una fuente de error en los cálculos para la determinación del precio de compra.

¹⁷ CHECA, Ana. *Validación del método de prensa hidráulica para determinar la calidad de la caña que ingresa al ingenio azucarero del Norte*. p. 23.

2.2.2. Método de desintegración húmeda

El análisis de la caña de azúcar por el método de desintegración húmeda presenta los resultados definidos en porcentajes de: humedad, brix, pol, fibra, azúcares reductores, azúcares reductores totales y pureza, sin la necesidad del uso de factores.

“El método consiste en pesar 500 g de caña desintegrada y adicionar 1 000 ml de agua al digestor por un tiempo de 10 minutos. En el jugo extraído se determina brix y después de la clarificación la pol. Posteriormente se proceden a realizar los análisis que se mencionaron anteriormente.”¹⁸

Hay que hacer la aclaración que lo que se conoce como método digestor de caña en la industria azucarera, según aplicaciones a la ingeniería química el método sigue una de las operaciones unitarias conocida como extracción sólido-líquido ya que según el procedimiento del método nunca se ve involucrada alguna reacción química, lo cual para una digestión tendría que realizarse.

Entonces, en todo el trabajo se hace la salvedad que el término digestión el cual es el término utilizado por la industria azucarera, no se utilizará ya que para la ingeniería química el método consiste en una maceración de acuerdo a la forma de operación del equipo ya que una “maceración es un proceso de extracción sólido líquido.”¹⁹ El producto sólido (materia prima) posee una serie de compuestos solubles en el líquido extractante que son los que se pretende extraer.

¹⁸ CHECA, Ana. *Validación del método de prensa hidráulica para determinar la calidad de la caña que ingresa al ingenio azucarero del Norte*. p. 26.

¹⁹ GEANKOPLIS, Christie J. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. p. 800.

En general en la industria química se suele hablar de extracciones, mientras que cuando se trata de alimentos, hierbas y otros productos para consumo humano se emplea el término maceración. En este caso el agente extractante (la fase líquida) es agua. La naturaleza de los compuestos extraídos depende de la materia prima empleada así como del líquido de maceración.

Entonces el nombre del método que se utilizará en esta investigación será método de desintegración húmeda y el nombre del equipo debido a que ese nombre fue el que lo puso el fabricante no se modificará, pero como se explicó anteriormente no hay que confundir el término de digestión ya que en esta existe una reacción química debido a la adición de químicos para degradar moléculas complejas, lo cual no ocurre según la forma de operación del equipo.

2.2.2.1. Lixiviación

Muchas sustancias biológicas, así como compuestos inorgánicos y orgánicos, se encuentran como mezclas de diferentes componentes en un sólido. Para separar el soluto deseado o eliminar un soluto indeseable de la fase sólida, ésta se pone en contacto con una fase líquida.

Ambas fases entran en contacto íntimo y el soluto o los solutos se difunden desde el sólido a la fase líquida, lo que permite una separación de los componentes originales del sólido.

Este proceso se llama lixiviación líquido sólido o simplemente, lixiviación. La operación unitaria se puede considerar como una extracción, aunque el término también se refiere a la extracción líquido-líquido.

Cuando la lixiviación tiene por objeto eliminar con agua un componente indeseable de un sólido, el proceso recibe el nombre de lavado. La lixiviación o extracción sólido líquido, se utiliza para disolver materia soluble a partir de su mezcla con un sólido insoluble.

En la industria de procesos biológicos y alimenticios, muchos productos se separan de su estructura natural original por medio de una lixiviación líquido-sólido. Un proceso importante es la lixiviación de azúcar de las remolachas con agua caliente.

En la producción de aceites vegetales, se emplean disolventes orgánicos como hexano, acetona y éter, para extraer aceite de cacahuate, soya, semillas de lino, semillas de ricino, semillas de girasol, semillas de algodón, harina, pasta de palo e hígado de hipogloso.

La lixiviación difiere muy poco del lavado o filtrado de sólidos, en el proceso de lixiviación la cantidad de material soluble separado es con frecuencia mayor que en el lavado o filtración ordinaria y las propiedades de los sólidos pueden variar considerablemente durante la operación de lixiviación.

2.2.2.1.1. Métodos de operación de la lixiviación

Existen varios métodos generales de operación para realizar la lixiviación en sólidos. Las operaciones se pueden llevar a cabo tanto en condiciones de estado no estacionario o por lotes, como continuas o en estado estacionario. También se pueden usar equipos de tipo continuo o por etapas, ya sea para la operación en estado estacionario o no estacionario.

En la lixiviación en estado no estacionario, uno de los métodos más comunes empleados en la industria mineral es la lixiviación *in situ*, donde se permite que el disolvente pase por el mineral por percolación. En otros casos, el licor de lixiviación se bombea sobre una pila de mineral triturado y se recolecta al nivel del suelo a medida que escurre de dicha pila.

Los sólidos triturados suelen lixivarse por percolación a través de lechos sólidos, estacionarios en recipientes con fondos perforados, para permitir el drenaje del disolvente. Los sólidos no deben ser demasiado finos, pues habría una alta resistencia al flujo. Algunas veces se colocan varios tanques en serie, que constituyen una batería de extracción, y se agrega disolvente nuevo al sólido que está casi extraído.

Los tanques pueden ser de tipo abierto o bien cerrado, en cuyo caso se llaman difusores. El disolvente fluye a través de los tanques en serie, y se extrae del tanque más recientemente cargado, lo que simula una operación continua a contracorriente.

Después de que un tanque ha sido lixiviado por completo, se añade carga nueva al tanque del otro extremo, a través de tuberías múltiples, de manera que no hay necesidad de mover los tanques para la operación a contracorriente.

Este procedimiento suele llamarse sistema *Shunks* y se usa con mucha frecuencia en la lixiviación de nitrato de sodio de sus minerales, en la recuperación de taninos de cortezas y maderas, en la industria minera, en la industria del azúcar y en varias más.

Los sólidos finamente molidos pueden lixiviarse en recipientes con agitación o en espesadores. El proceso puede ser de tipo de estado no estacionario por lotes, o bien, los recipientes se pueden colocar en serie para obtener un proceso a contracorriente por etapas.

Tabla III. **Clasificación del proceso de lixiviación**

PROCESO	DEFINICIÓN
Percolación	Se procede a colocar el sólido en gran tamaño en lecho fijo; si éste está triturado en un soporte para sumergirlo en el disolvente o para hacer pasar disolvente sobre él y así obtener una colada.
Extracción	Se aplica a todas las operaciones de separación que utilicen métodos de transferencia de masa o mecánicos.
Maceración	Proceso de extracción donde se pone un sólido triturado en contacto con un solvente; pudiendo ser dinámico o estático.
Decocción	Se refiere específicamente al uso de disolvente a su temperatura de ebullición, cuando se pone en contacto con el sólido.
Elución	Se lleva a cabo cuando el material soluble está sobre todo en la superficie de un sólido insoluble y simplemente se lava con el disolvente.
Lixiviación in situ	Se refiere a la circulación del disolvente mediante tuberías sobre y a través del cuerpo del sólido. Llamado también minería en solución.

Continuación tabla III.

Lixiviación a la intemperie	Utilizado en minería, los minerales sólidos con bajo contenido cuyo valor en mineral no garantiza el gasto de molienda o trituración. Puede lixiviarse en forma de rocas extraídas de la mina y colocadas en grandes montones sobre terreno impermeable; el licor de lixiviación se bombea sobre el mineral y se obtiene cuando sale del montón.
-----------------------------	--

Fuente: TREYBAL, Robert E. *Operaciones de Transferencia de Masa*. p. 832.

2.2.2.2. Maceración

La maceración es un proceso de extracción sólido líquido. El producto sólido (materia prima) posee una serie de compuestos solubles en el líquido extractante que son los que se pretende extraer. En general en la industria química se suele hablar de extracciones, mientras que cuando se trata de alimentos, hierbas y otros productos para consumo humano se emplea el término maceración.

En este caso el agente extractante (la fase líquida) suele ser agua, pero también se emplean otros líquidos como vinagre, jugos, alcoholes o con diversos ingredientes que modificarán las propiedades de extracción del medio líquido. A veces el producto obtenido es el extracto propiamente dicho y otras el sólido sin los citados compuestos o incluso ambas partes.

La naturaleza de los compuestos extraídos depende de la materia prima empleada así como del líquido de maceración. En los casos en que se utilice el producto extraído se suele emplear una etapa de secado bien al sol, con calor o incluso una liofilización.

Figura 7. **Digestor de caña modelo TE-0501**



Fuente: TECNAL, Equipamientos para laboratorios. *Manual de instrucciones digestor de caña modelo TE-0501; TE-0502.* p. 1.

2.2.3. Método de prensa hidráulica

La caña de azúcar fresca, limpia y de buena calidad rápidamente ha llegado a ser la meta de los cañicultores. La cosecha finaliza con un mejor control de calidad para la molienda y un pago más justo para los productores de caña.

El método de prensa hidráulica para el análisis de caña de azúcar consiste en el prensado de 500 g de la caña de azúcar desfibrada durante un minuto a una presión de 250 kg/cm². Otros modelos de prensa hidráulica permiten prensar 1 000 g de caña con una presión mayor.

“En el jugo extraído se determina el brix y después de la clarificación la pol. El bagazo residual (contiene el jugo no extraído y fibra), posteriormente se procede a pesar para obtener el peso húmedo (PBU), después se coloca en la estufa con circulación forzada de aire para el secado hasta pesos constante (PBS).”²⁰

Figura 8. **Prensa hidráulica**



Fuente: Equipamientos para laboratorios. *Manual de instrucciones digestor prensa hidráulica TE-097*. p. 1.

²⁰ CHECA. Ana. *Validación del método de prensa hidráulica para determinar la calidad de la caña que ingresa al ingenio azucarero del Norte*. p. 31.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Como resultado de la revisión bibliográfica sobre aquellos factores que influyen en la evaluación y comparación del método de desintegración húmeda, se establecieron las variables de entrada a modificar para medir el efecto sobre los resultados, además se determinaron qué factores se mantendrían constantes.

3.1.1. Variables de control

Estas variables son las que se modificaron o mantuvieron constantes por el experimentador para evaluar los efectos que podrían producirse sobre los resultados finales que se estaban evaluando.

Tabla IV. **Variables de control para el análisis del jugo de la caña desfibrada por medio del método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501**

No.	Variable	Dimensional	Factor Potencial de diseño		Factores Perturbadores	
			Ctes.	Var.	Controlable	Ruido
Análisis del Proceso						
1	Masa muestra	g	X			
2	Temperatura	°C	X			
3	Tiempo	minutos	X			

Continuación tabla IV.

4	Tiempo secado muestra	minutos		X		
5	Temperatura secado muestra	°C	X			
6	Humedad muestra	%		X		
Análisis de Ambiente Externo						
7	Temperatura ambiente	°C				X
8	Presión atm.	Psi				SIE
9	Humedad	%				SIE

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Variables de control para el análisis del jugo de la caña desfibrada por medio del método de prensa hidráulica**

No.	Variable	Dimensional	Factor Potencial de diseño		Factores Perturbadores	
			Ctes.	Var.	Controlables	Ruido
Análisis del Proceso						
1	Masa muestra	g	X			
2	Presión	kgf/cm ²	X			
3	Tiempo prensado	min	X			
4	Temperatura	°C	X			
5	Tiempo secado de la muestra	minutos	X			

Continuación tabla V.

6	Temperatura secado muestra	°C	X			
7	Humedad muestra	%		X		
Análisis de Ambiente Externo						
8	Temperatura amb.	°C				X
9	Presión atm.	Psi				SIE
10	Humedad	%				SIE

Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Variables Independientes

Estas variables son las que manejo y cambio el experimentador para evaluar las variables respuesta de los resultados finales para la evaluación y comparación del método de desintegración húmeda y de prensa hidráulica.

Tabla VI. **Análisis del jugo de la caña desfibrada por medio del método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501**

No.	Variable	Dimensional	Descripción
1	Masa muestra	g	La masa utilizada es la indicada por el método.
2	Tiempo	minutos	Conforme indica el método, es el tiempo que debe estar la muestra dentro del digestor.

Continuación tabla VI.

3	Tiempo secado muestra	Minutos	Se relacionará con las condiciones y propiedades de las muestras, conforme indique el método.
4	Temperatura secado muestra	°C	Se relacionará según la condición inicial de la masa de muestra y su valor será conforme indique el método.

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Análisis del jugo de caña desfibrada por medio del método de prensa hidráulica**

No.	Variable	Dimensional	Descripción
1	Masa muestra	g	La masa que utiliza la prensa hidráulica es la indicada por el método de acuerdo a cada variable dependiente que se esté analizando.
2	Presión	kgf/cm ²	Es la presión que se debe ejercer de acuerdo a como indica el método.
3	Tiempo	minutos	Conforme indica el método, es el tiempo que debe estar la muestra dentro del digestor.
4	Tiempo de secado de la muestra	minutos	Se relacionará con las condiciones y propiedades de las muestras, conforme indique el método.
5	Temperatura de secado de la muestra	°C	Se relacionará según la condición inicial de la masa de muestra y su valor será conforme indique el método.

Fuente: elaboración propia.

3.1.3. Variables dependientes

Estas son las variables respuesta de los resultados finales las cuales se producen a través de las variables independientes para la evaluación y comparación del método de desintegración húmeda y de prensa hidráulica.

Tabla VIII. **Análisis del jugo de caña desfibrada a través de los métodos: desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501 y prensa hidráulica**

No.	Variable	Dimensional
1	Pol (extracto y caña)	%
2	Fibra de caña	%
3	Humedad de caña	%
4	Densidad jugo de caña	Kg/L
5	Brix (extracto y caña)	%

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación de campo de estudio

- Área: Ingeniería del azúcar
- Ubicación: la evaluación se realizará en un ingenio azucarero ubicado en la costa sur del país.

- Proceso: evaluación, comparación y documentación del método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501 como un método alternativo para el análisis del jugo de la caña de azúcar desfibrada obtenida en un ingenio azucarero de Guatemala.
- Tipo de estudio: investigación descriptiva, también conocida como investigación estadística, con la cual se evaluó y comparó el método de desintegración húmeda utilizando el equipo de Digestor de caña modelo TE-0501 con el método de prensa hidráulica mediante la realización de experimentaciones en el laboratorio de caña del ingenio azucarero y el registro de las variables dependientes a estudiar.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigadora:
Mayra Maritza Quemé Peña
- Asesor de la investigación:
Ing. Qco. David Ricardo Cerezo Toledo

3.4. Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería, reactivos)

En el presente trabajo se hizo uso de las siguientes materias primas, reactivos, cristalería y equipo, todo con el objeto de llegar a los logros esperados por esta investigación, los cuales a continuación se detallan:

3.4.1. Materia prima y reactivos

- Caña desfibrada
- Octapol
- Agua destilada

3.4.2. Cristalería

- 18 beackers de 500 mL (plásticos)
- 18 beackers de 500 mL (vidrio)
- 2 varillas de agitación
- 10 erlenmeyer de 300 mL
- Papel filtro Whattman No. 6
- 3 pisetas
- 10 embudos (plásticos)
- 10 balones aforados de 100 mL
- 1 probeta de 1 000 mL (plástica)
- 10 cajas de metal
- 10 tapones plásticos

3.4.3. Equipos

- Balanza analítica de precisión marca Sartorius.
- Balanza de contaje (balanza electrónica de precisión) marca Sartorius
- Desintegrador de caña
- Homogeneizador de caña marca Menegotti profesional.

- Estufa de secado con renovación y circulación de aire TECNAL TE-394/3, precisión $\pm 2^{\circ}\text{C}$, 4 200 watts, motor de inducción de 0,25 Hp, capacidad de siete bandejas de acero inoxidable perforadas.
- Polarímetro electrónico marca Schimidt Haensch, tipo Saccharomat
- Refractómetro electrónico marca Anton Paar, Abbomat.
- Prensa hidráulica marca Dedini, semiautomática.
- Digestor de caña marca TECNAL modelo TE- 0501, 1 500 watts, motor de inducción de 2 Hp trifásico, capacidad de 4 litros.
- Core sampler.

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

La investigación fue desarrollada utilizando técnicas cuantitativas debido a la naturaleza del fenómeno de interés, dado a que los parámetros de interés son: porcentaje humedad caña, densidad del jugo, porcentaje fibra, porcentaje brix caña y porcentaje pol caña.

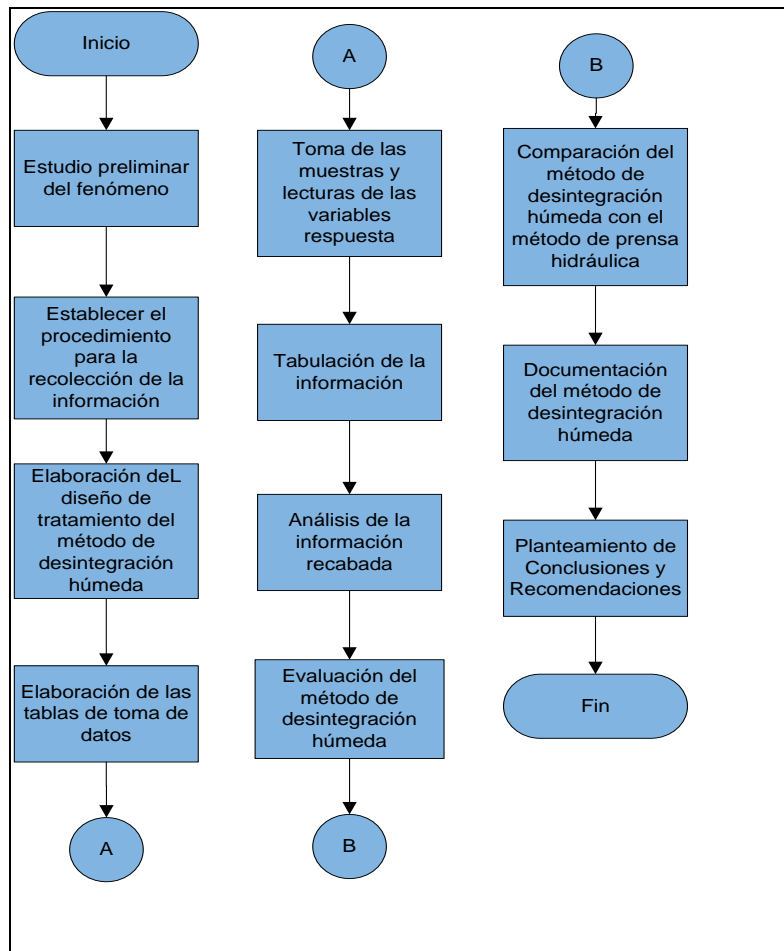
Estos parámetros son medibles por el método de desintegración húmeda utilizando el equipo de Digestor de caña modelo TE-0501 y por el método de prensa hidráulica, a partir de estos valores se procedió a hacer su respectiva comparación.

3.5.1. Diseño preliminar

Se utilizó la técnica cuantitativa, con la cual se determinó las variables dependientes indicadas anteriormente por medio de los métodos de desintegración húmeda y prensa hidráulica para realizar su respectiva comparación.

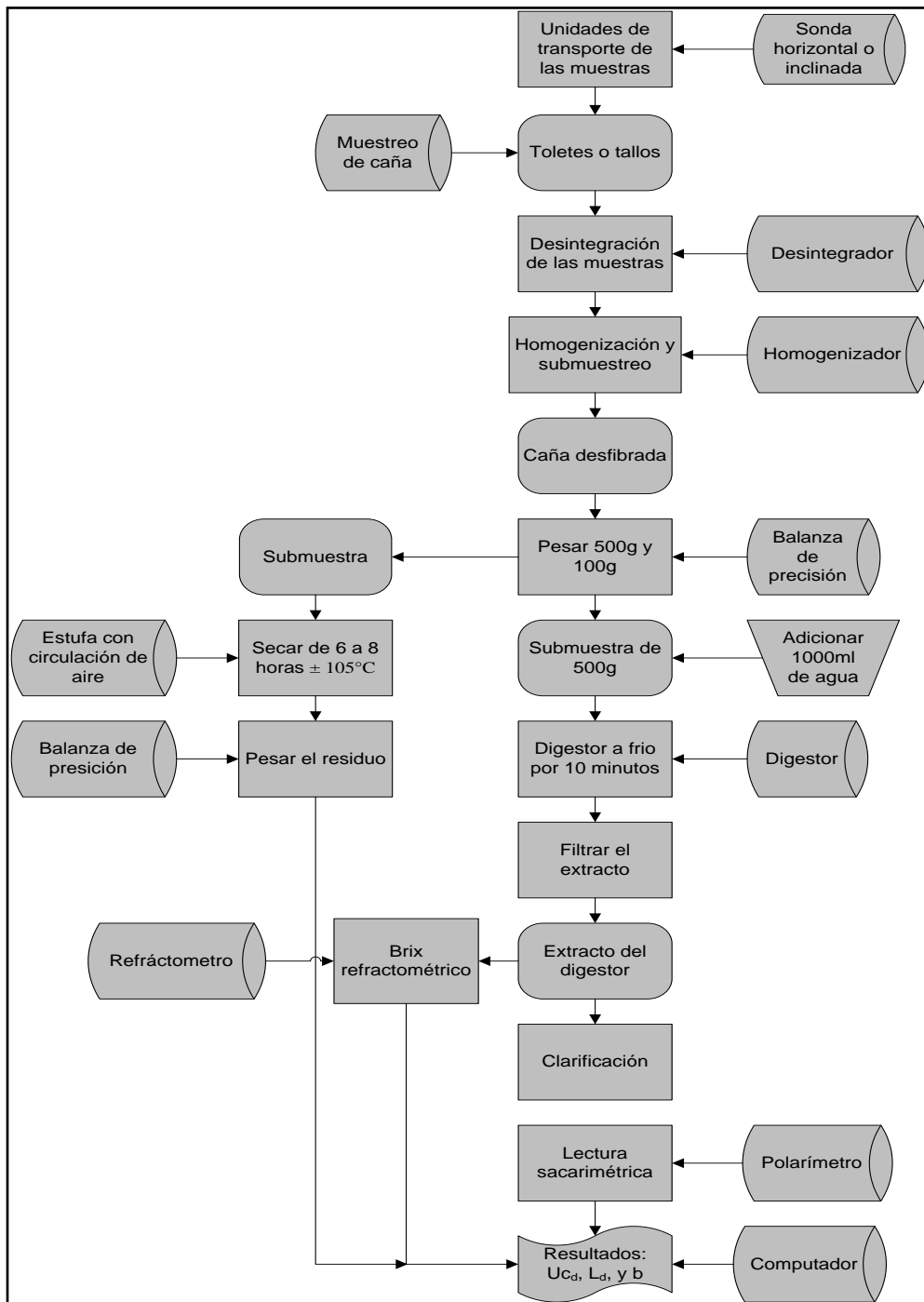
Así mismo, se realizaron variaciones en la cantidad de tiempo, masa de caña desfibrada y masa agua en el método de desintegración húmeda para realizar la evaluación del método y posteriormente documentarlo.

Figura 9. **Diseño general técnica cuantitativa**



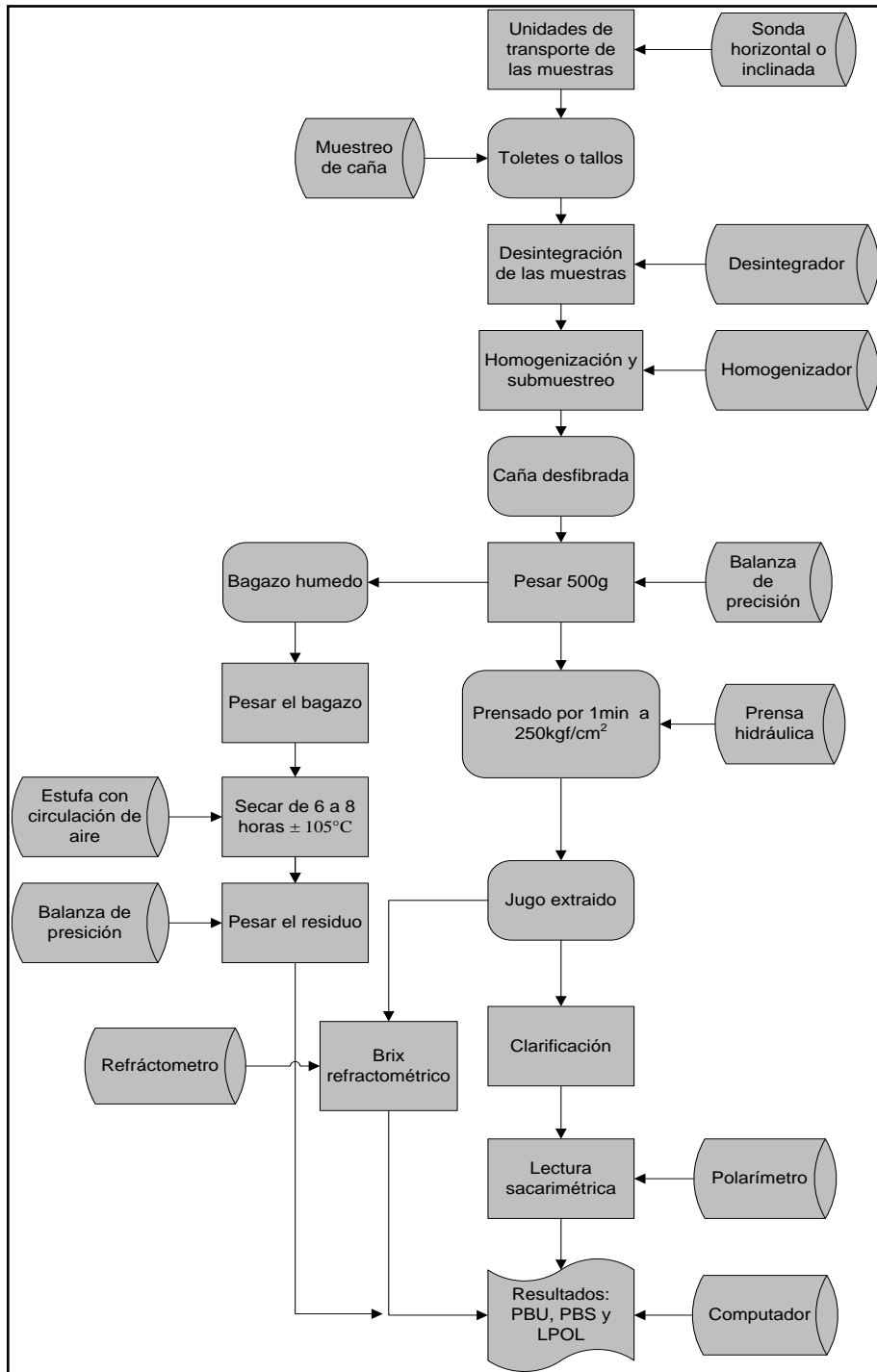
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Diseño preliminar del método de desintegración húmeda



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Diseño preliminar del método de prensa hidráulica**



Fuente: elaboración propia.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

El campo de estudio de la investigación está delimitado a la evaluación, comparación y documentación del método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501 como un método alternativo para el análisis del jugo de la caña de azúcar desfibrada, a través de la realización de experimentaciones en el laboratorio de caña de un ingenio azucarero de Guatemala.

Para el cumplimiento de los objetivos planteados, se utilizó como variables respuesta: porcentaje humedad caña, densidad del jugo, porcentaje fibra caña, porcentaje brix caña y porcentaje pol caña.

3.6.1. Elección del diseño experimental

El diseño experimental se dividió en dos partes, siendo la primera la evaluación del método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501, para esto se realizaron 12 tratamientos con 3 repeticiones, dando un total de 36 muestras y para el tratamiento testigo se utilizaron 11 repeticiones.

Con respecto a la comparación de los métodos, esta se realizó conforme a los datos obtenidos según el fabricante en ambos métodos, para esto se realizaron 11 corridas con duplicados cada una, utilizando un total de 22 muestras.

3.6.1.1. Diseño de tratamientos

- Diseño de tratamiento para la evaluación del método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501

Los tratamientos que se utilizaron para cumplir con los objetivos planteados, se trabajaron según los factores: cantidad de caña, cantidad de agua y tiempo. Se procedió a variar cada uno de estos factores sobre un valor mayor y menor del indicado por el manual del fabricante quedando el diseño experimental de la siguiente forma:

- ✓ Cantidad de caña inicial (500 g \pm 100 g de lo indicado por el fabricante):

$$V_1 = 600 \text{ g}$$

$$V_2 = 400 \text{ g}$$

- ✓ Cantidad de agua inicial (1 000 mL \pm 250 mL de lo indicado por el fabricante):

$$W_1 = 1\,250 \text{ mL}$$

$$W_2 = 750 \text{ mL}$$

- ✓ Tiempo (10 min \pm 4 min de lo indicado por el fabricante):

$$t_1 = 14 \text{ min}$$

$$t_2 = 6 \text{ min}$$

Variando estas proporciones, el diseño experimental se realizó con 13 tratamientos, haciendo 3 repeticiones y el tratamiento testigo se realizó con 11 repeticiones, quedando de la siguiente manera:

Tabla IX. **Diseño de tratamientos para la evaluación del método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501**

No. Tratamiento	Diseño
1	$W_1= 1\ 250\ \text{mL}$, $t_1= 14\ \text{min}$ y $V_1= 500\ \text{g}$
2	$W_2= 1\ 250\ \text{mL}$, $t_2= 6\ \text{min}$ y $V_2= 500\ \text{g}$
3	$W_3= 750\ \text{mL}$, $t_3= 14\ \text{min}$ y $V_3= 500\ \text{g}$
4	$W_4= 750\ \text{mL}$, $t_4= 6\ \text{min}$ y $V_4= 500\ \text{g}$
5	$V_5= 600\ \text{g}$, $t_5= 14\ \text{min}$ y $W_5= 1\ 000\ \text{mL}$
6	$V_6= 600\ \text{g}$, $t_6= 6\ \text{min}$ y $W_6= 1\ 000\ \text{mL}$
7	$V_7= 400\ \text{g}$, $t_7= 14\ \text{min}$ y $W_7= 1\ 000\ \text{mL}$
8	$V_8= 400\ \text{g}$, $t_8= 6\ \text{min}$ y $W_8= 1\ 000\ \text{mL}$
9	$V_9= 600\ \text{g}$, $W_9= 1\ 250\ \text{mL}$ y $t_9= 10\ \text{min}$
10	$V_{10}= 600\ \text{g}$, $W_{10}= 750\ \text{mL}$ y $t_{10}= 10\ \text{min}$
11	$V_{11}= 400\ \text{g}$, $W_{11}= 1\ 250\ \text{mL}$ y $t_{11}= 10\ \text{min}$
12	$V_{12}= 400\ \text{g}$, $W_{12}= 750\ \text{mL}$ y $t_{12}= 10\ \text{min}$
13 (testigo)	$V_{13}= 500\ \text{g}$, $W_{13}= 1\ 000\ \text{mL}$ y $t_{13}= 10\ \text{min}$

Fuente: elaboración propia.

- Diseño de tratamiento para la comparación del método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501 con el método de prensa hidráulica

Con respecto a la comparación de los métodos, está se realizó conforme a los datos obtenidos según el fabricante en ambos métodos, de esta manera se logro realizar el análisis comparativo del método de desintegración húmeda con el método de prensa hidráulica para determinar la calidad del jugo de la caña desfibrada.

Para este diseño el muestreo se procedió a hacer utilizando una probabilidad de éxito del 95% por lo que conjuntamente la probabilidad de fracaso será de un 5%, con un nivel de significancia del 5%.

$$N = \frac{Z^2 PQ}{E^2} \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde:

- $Z_{\alpha/2}$ = Confiabilidad
- P = Probabilidad de éxito
- Q = Probabilidad de fracaso (1-P)
- E = Error estimado
- N = Número de corridas

Para la realización de la investigación se procedió a utilizar un error estimado del 13%, con lo cual utilizando la ecuación anterior se obtiene la cantidad de corridas a utilizar:

$$N = \frac{(1,96)^2 \times 0,95 \times 0,05}{(0,13)^2} = 10,79 \approx 11$$

Con el dato obtenido anteriormente se definió que la cantidad de corridas a realizarse iban a ser 11 y por cada una de las corridas se realizaron duplicados, entonces la cantidad de muestras a analizar por cada método para hacer su respectiva comparación fueron de 22 datos.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Consiste en determinar qué resultados de las variables se presentan, los procedimientos y las relaciones entre las variables para dar respuesta al problema.

3.7.1. Procesamiento de la información por medio del método de desintegración húmeda

De la misma manera como se realizó el diseño experimental, el procesamiento de la información se dividió en dos partes, siendo la primera la evaluación del método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501.

3.7.1.1. Porcentaje humedad de caña

Secar 20 g de caña desintegrada hasta un peso constante en la estufa con circulación de aire forzado. La pérdida de peso corresponderá al porcentaje de humedad de caña de azúcar.

$$UC_d = \% \text{ Humedad de caña} \quad [\text{Ec. 2}]$$

3.7.1.2. Porcentaje brix del extracto

Algunas gotas de extracto filtrado se colocan en el prisma del refractómetro para obtener la lectura de brix.

$$b = \% \text{ Brix del extracto del digestor} \quad [\text{Ec. 3}]$$

3.7.1.3. Porcentaje pol del extracto

Algunas gotas del jugo de caña clarificado se colocan directamente en el polarímetro para obtener la lectura de pol.

$$L_d = \% \text{ Pol del extracto del digestor} \quad [\text{Ec. 4}]$$

3.7.1.4. Densidad del extracto

Para obtener la densidad o gravedad específica del extracto (ME_e) puede utilizarse la tabla específica o se calcula por la siguiente ecuación:

$$ME_e = (0,014236 * b^2 + 3,848468 * b + 997,159) \quad [\text{Ec. 5}]$$

Esta ecuación es válida para un brix entre 3 y 8%.

3.7.1.5. Porcentaje fibra caña

La fórmula general para calcular el contenido de fibra de caña por el método de digestor (F_d), con diferentes proporciones de agua y de la caña en el digestor, es el siguiente:

$$\%F_d = \frac{100 - UC_d - \left(\frac{a}{c} + 1\right) * b}{1 - 0,01 * b} \quad [\text{Ec. 6}]$$

Donde:

a = Masa de agua utilizada en el digestor

c = Masa de caña utilizada en el digestor

3.7.1.6. Porcentaje brix caña

Para diferentes proporciones de agua y de caña en el digestor, se puede obtener el porcentaje brix caña ($B_{caña\ d}$) por la siguiente ecuación:

$$\%B_{caña\ d} = b * \left(\frac{a}{c} + 1 - 0,01 * \%F_d\right) \quad [\text{Ec. 7}]$$

3.7.1.7. Porcentaje pol en caña

La fórmula general de cálculo de la pol en caña por el método de digestor ($Pol_{caña\ d}$), con diferentes proporciones de agua y de caña, es el siguiente:

$$\%Pol_{caña\ d} = L_d * \left(\frac{a}{c} + 1 - 0,01 * \%F_d\right) \quad [\text{Ec. 8}]$$

3.7.1.8. Pureza en caña

Para el cálculo de la pureza en caña P_{zd} se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_{zd} = 100 * \frac{\%Pol_{caña\ d}}{\%B_{caña\ d}} \quad [\text{Ec. 9}]$$

Tenga en cuenta que ésta pureza (P_{zd}) se refiere a los componentes en porcentaje de caña, lo que conduce a resultados diferentes de los observados en el jugo extraído por la prensa (P_z).

3.7.2. Procesamiento de la información por medio del método de prensa hidráulica

Se realizó el procesamiento de la información con el método de prensa hidráulica debido a que para cumplir con el objetivo específico de comparar el método de desintegración húmeda con respecto al método de prensa hidráulica, se necesito utilizar las ecuaciones adecuadas correspondientes a este método.

3.7.2.1. Porcentaje de humedad de caña

El porcentaje de humedad de caña puede ser determinado a través del secado de una muestra de caña preparada. El tamaño de la muestra a secar fue de 20 gramos.

$$UC_p = (100 - B_j) * \left(1 - \frac{PBU}{500}\right) + \left(\frac{PBU - PBS}{5}\right) \quad [\text{Ec. 10}]$$

Donde:

B_j = Brix refractométrico del jugo

PBU = Peso del bagazo húmedo

PBS = Peso del bagazo seco

3.7.2.2. Porcentaje brix del extracto

Algunas gotas de extracto filtrado se colocan en el prisma del refractómetro para obtener la lectura de brix.

$$B_j = \% \text{ Brix del extracto del digestor} \quad [\text{Ec. 11}]$$

3.7.2.3. Porcentaje pol del extracto

Algunas gotas del jugo de caña clarificado se colocan directamente en el polarímetro para obtener la lectura de pol.

$$L_j = \% \text{ Pol del extracto del digestor} \quad [\text{Ec. 12}]$$

3.7.2.4. Densidad del extracto

Para obtener la densidad o gravedad específica del extracto (ME_p) puede utilizarse la tabla específica o se calcula por la siguiente ecuación:

$$ME_p = (0,015726 * B_j^2 + 3,81451 * B_j + 997,36) \quad [\text{Ec. 13}]$$

Donde:

ME_p = Densidad del extracto

B_j = Brix refractométrico del jugo

Esta ecuación es válida para un brix entre 10 y 24%.

3.7.2.5. Porcentaje fibra caña

Sistema Tanimoto

El método de la prensa hidráulica en Brasil es conocido como Método de Tanimoto, el cual muestra la secuencia de los cálculos para obtener el porcentaje de fibra de caña con el secado del bagazo.

El bagazo pesado y determinado el brix en el jugo extraído. Una sub-muestra de bagazo debe ser utilizada para el secado en la estufa. El cálculo del porcentaje de fibra, se llevará a cabo mediante la fórmula de Fernández, la cual utiliza la secuencia de los cálculos propuestos por Tanimoto:

$$\%F_p = \frac{100*PBS - B_j*PBU}{5*(100 - B_j)} \quad [\text{Ec. 14}]$$

Donde:

PBS= Peso seco del bagazo después del prensado (g)

PBU = Peso húmedo del bagazo prensado (g)

3.7.2.6. Porcentaje brix caña

El brix de caña es una medida usual de análisis por medio del método de prensa hidráulica siendo comúnmente presentado en porcentaje. Este valor puede ser necesario en los casos del cálculo de humedad de caña.

$$\%B_{caña p} = B_j * (1 - 0,01 * \%F_p) \quad [\text{Ec. 15}]$$

3.7.2.7. Porcentaje pol caña

El porcentaje de pol en caña es obtenido en función del pol en el extracto. La fórmula general de cálculo de la pol en caña, es el siguiente:

$$Pol_{caña p} = L_j * (1 - 0,01 * \%F_d) * (1,0313 - 0,00575 * \%F_d) \quad [Ec. 16]$$

3.7.2.8. Pureza en caña

Para el cálculo de la pureza en caña P_{zp} se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_{zp} = 100 * \frac{\%Pol_{caña p}}{\%B_{caña p}} \quad [Ec. 17]$$

3.7.3. Tabulación de datos

Consiste en presentar los datos en tablas o cuadros, necesarios para alcanzar los objetivos planteados.

Tabla X. Tratamiento experimental de la calidad del jugo proveniente de la caña de azúcar desfibrada, utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501 (para comparación del método)

Fecha:							
Tipo de caña:							
No. Corrida	Envío/Lote	Rep.	Brix extracto (%)	Pol extracto (%)	Masa tara (g)	Masa inicial (g)	Masa final (g)
1		1	X_i	Y_i	Z_i	W_i	A_i
		2	X_i	Y_i	Z_i	W_i	A_i

Continuación tabla X.

		3	X_i	Y_i	Z_i	W_i	A_i
		Promedio	\bar{X}_i	\bar{Y}_i	\bar{Z}_i	\bar{W}_i	\bar{A}_i
2		1	X_i	Y_i	Z_i	W_i	A_i
		2	X_i	Y_i	Z_i	W_i	A_i
		3	X_i	Y_i	Z_i	W_i	A_i
		Promedio	\bar{X}_i	\bar{Y}_i	\bar{Z}_i	\bar{W}_i	\bar{A}_i
...
10		1	X_i	Y_i	Z_i	W_i	A_i
		2	X_i	Y_i	Z_i	W_i	A_i
		3	X_i	Y_i	Z_i	W_i	A_i
		Promedio	\bar{X}_i	\bar{Y}_i	\bar{Z}_i	\bar{W}_i	\bar{A}_i

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. Comparación de la calidad del jugo proveniente de la caña de azúcar desfibrada, por medio del método de desintegración húmeda en relación al método de prensa hidráulica

Fecha:							
Tipo de caña:							
Método:							
No. Corrida	Envío/Lote	Rep.	Brix extracto (%)	Pol extracto (%)	Masa tara (g)	Masa inicial (g)	Masa final (g)
1		1	X_i	Y_i	Z_i	W_i	A_i
		2	X_i	Y_i	Z_i	W_i	A_i
		Promedio	\bar{X}_i	\bar{Y}_i	\bar{Z}_i	\bar{W}_i	\bar{A}_i
2		1	X_i	Y_i	Z_i	W_i	A_i
		2	X_i	Y_i	Z_i	W_i	A_i

Continuación tabla XI.

		Promedio	\bar{X}_1	\bar{Y}_1	\bar{Z}_1	\bar{W}_1	\bar{A}_1
...
10		1	X_i	Y_i	Z_i	W_i	A_i
		2	X_i	Y_i	Z_i	W_i	A_i
		Promedio	\bar{X}_1	\bar{Y}_1	\bar{Z}_1	\bar{W}_1	\bar{A}_1

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

De acuerdo al tipo de investigación que se realizó, se procedió a realizar un análisis estadístico como una herramienta para la evaluación de los resultados obtenidos y para aceptar o rechazar las hipótesis planteadas.

3.8.1. Dato promedio estadístico

El promedio \bar{a} , permite obtener un dato representativo para cada variable en cada medición, de esta forma se tomó en cuenta las posibles variaciones aleatorias junto con la desviación estándar.

$$\bar{a} = \frac{a_1 + a_2 + a_3}{n} = \frac{\sum_i^n a_i}{n} \quad [\text{Ec. 18}]$$

Donde:

- \bar{a} = Valor promedio
- a_i = Valor i
- n = Número de datos

3.8.2. Desviación estándar

La desviación estándar (σ), permite cuantificar la dispersión de los valores para una misma medición respecto al valor promedio, lo cual representa el error aleatorio causado por diversos factores.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^n |\bar{a} - a_i|}{n-1}} \quad [\text{Ec. 19}]$$

Donde:

- \bar{a} = Valor promedio
- a_i = Valor i
- n = Número de datos
- σ = Desviación estándar

3.8.3. Análisis de varianza

El análisis de varianza realizado, permitió determinar si se aceptaba o rechazaba las hipótesis nulas planteadas en la experimentación. Debido a que la experimentación se divide en dos partes, de esta misma forma se analizaron los datos.

3.8.3.1. Evaluación método de desintegración húmeda

Para la evaluación del método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501 se utilizó como variables respuesta: porcentaje humedad caña, densidad del jugo, porcentaje fibra caña, porcentaje brix caña y porcentaje pol caña.

El análisis estadístico de los datos se realizó por medio de un análisis de varianza de F de Fisher, con la metodología de un diseño de bloques completamente al azar con una estructura factorial con datos desbalanceados en celdas, además se realizó la prueba de diferencia mínima significativa de medias, para los efectos principales de los factores con un nivel de significancia del 5%.

El diseño de bloques completamente al azar es el que se presenta a continuación:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad \left\{ \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, \tau \\ j = 1, 2, \dots, \tau \end{array} \right\} \quad \text{[Ecuación 20]}$$

Donde:

Y_{ij} = Variable de respuesta de la ij-ésima unidad experimental

μ = Media general de la variable respuesta

τ_i = Efecto del i-ésimo tratamiento (nivel del factor) en la variable dependiente

β_j = Efecto del j-ésimo bloque

ε_{ij} = Error experimental asociado a la ij-ésima unidad experimental

Como la media general y el error experimental son términos que poseen en común todos los modelos, no es necesario el indicarlo entre las fuentes de variación. Este diseño se recomienda cuando existe homogeneidad entre unidades experimentales, esto quiere decir que no existe influencia de la ubicación de la unidad experimental sobre el efecto del tratamiento, esto es muy utilizado en ensayos a nivel laboratorio.

Con respecto a la prueba de la diferencia mínima significativa (DMS), esta se puede emplear para comparar las medias con un testigo o tratamiento estándar. La DMS se define como la diferencia mínima que podría existir entre dos medias de muestras significativamente diferentes.

Para obtener la fórmula para la DMS, se usa la prueba t de Student que utiliza la varianza combinada, quedando su ecuación de la siguiente forma:

$$DSM = t_{\frac{\alpha}{2}, gl(error)} * \sqrt{\frac{2 * CM_{error}}{n}} \quad \text{[Ecuación 21]}$$

Donde:

DSM = Diferencia significativa mínima

$t_{\frac{\alpha}{2}, gl(error)}$ = Valor t de las tablas de t de student

CM_{error} = Cuadrado medio del error

n = Número de repeticiones

Entonces si las diferencias de las medias difieren del valor dado por la DMS, entonces si existe diferencia significativa en el valor de las medias, con un nivel de significancia planteado por el experimentador.

3.8.3.2. Comparación del método de desintegración húmeda con el método de prensa hidráulica

Con respecto a la comparación del método de desintegración húmeda con el de prensa hidráulica se realizó un análisis de varianza de comparación entre dos factores (F de Fisher), además de la prueba DMS.

La finalidad del análisis de varianza es comprobar cuál hipótesis es la que mejor se ajusta a la parte experimental del estudio, aceptando la hipótesis nula o la alternativa, utilizando un nivel de significancia del 5%.

Tabla XII. **Ecuaciones para el análisis de varianza de dos factores**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Repetición	$SSA = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^i x_i^2 - \frac{1}{IJ} x^2$	I-1	SSA/(I-1)	MSA/MSE
Tratamiento	$SSB = \frac{1}{I} \sum_{j=1}^J x_j^2 - \frac{1}{IJ} x^2$	J-1	SSB/(J-1)	MSB/MSE
Error	$SSE = SST - SSA - SSB$	(I-1)(J-1)	SSE/((I-1)(J-1))	
Total	$SST = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ij}^2 - \frac{1}{IJ} x^2$	IJ-1		

Fuente: DEVORE, Jay. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. p. 446.

De este modo la hipótesis nula es aceptada si el valor de F experimental es menor al valor crítico (nivel de significancia del 5%), con lo cual se concluye un efecto nulo sobre la variación de los resultados atribuyéndoselo al error aleatorio, de lo contrario se acepta la hipótesis alternativa. De igual manera con el valor de t, si es menor al valor crítico (nivel de significancia del 5%), se acepta la hipótesis nula, de lo contrario se acepta la hipótesis alternativa.

4. RESULTADOS

A continuación se presenta una serie de tablas e histogramas (diagramas de barras simples) las cuales fueron planteadas de esa manera con la finalidad de cumplir los objetivos específicos del presente trabajo de investigación.

Cada variable de respuesta, fue obtenida a partir de un promedio estadístico de la cantidad de repeticiones que se especificaron en el diseño experimental. Los resultados fueron separados en tres apartados, según el objetivo específico al que corresponden.

4.1. Evaluación del método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501

Para la evaluación del método de desintegración, se realizó por cada variable respuesta una tabla y una figura (gráfico), cada una de estas con respecto al factor y los niveles de dicho factor.

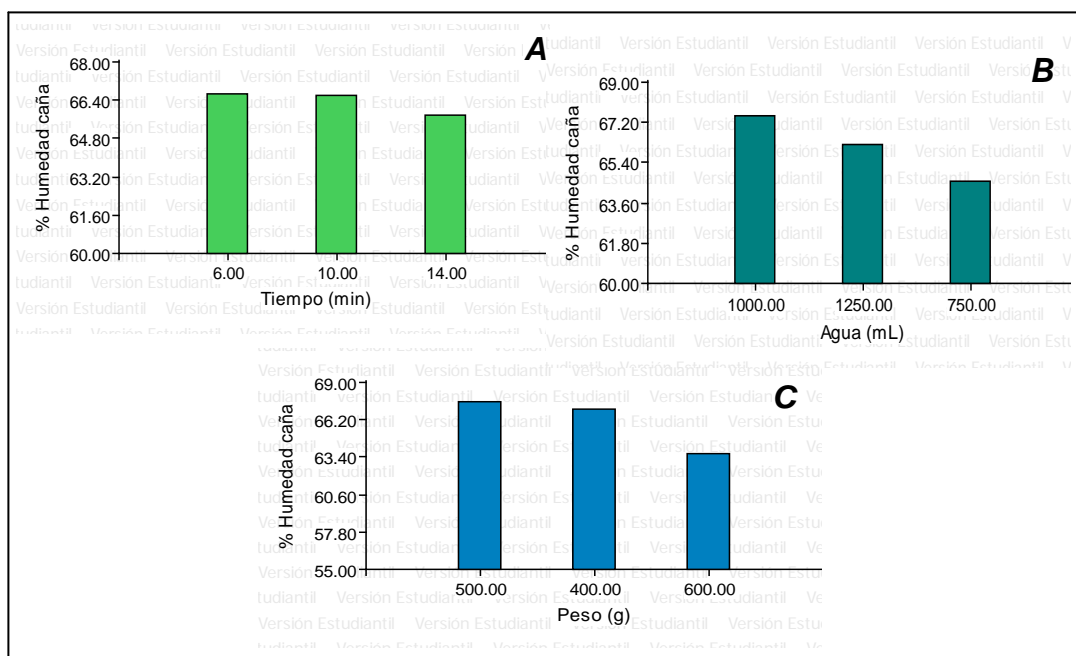
Se efectuó de tal manera para poder observar de mejor forma cual tratamiento era el mejor con respecto al porcentaje de humedad, densidad del jugo, porcentaje de fibra en caña, porcentaje de brix en caña y porcentaje de pol, para posteriormente elegir el mejor tratamiento a utilizar.

Tabla XIII. **Porcentaje humedad caña del método de desintegración húmeda con respecto a cada factor y nivel empleado**

Cantidad de Agua		Cantidad de caña		Tiempo	
Nivel (mL)	Humedad (%)	Nivel (g)	Humedad (%)	Nivel (min)	Humedad (%)
750,0	64,6	400,0	67,0	6,0	66,7
1 000,0	67,5	500,0	67,6	10,0	66,6
1 250,0	66,2	600,0	63,6	14,0	65,8
DMS	1,2	DMS	1,2	DMS	1,2

Fuente: elaboración propia basado en tablas del apéndice 6.

Figura 12. **Representación del porcentaje humedad caña a diferentes factores: A) Tiempo, B) Agua y C) Peso**



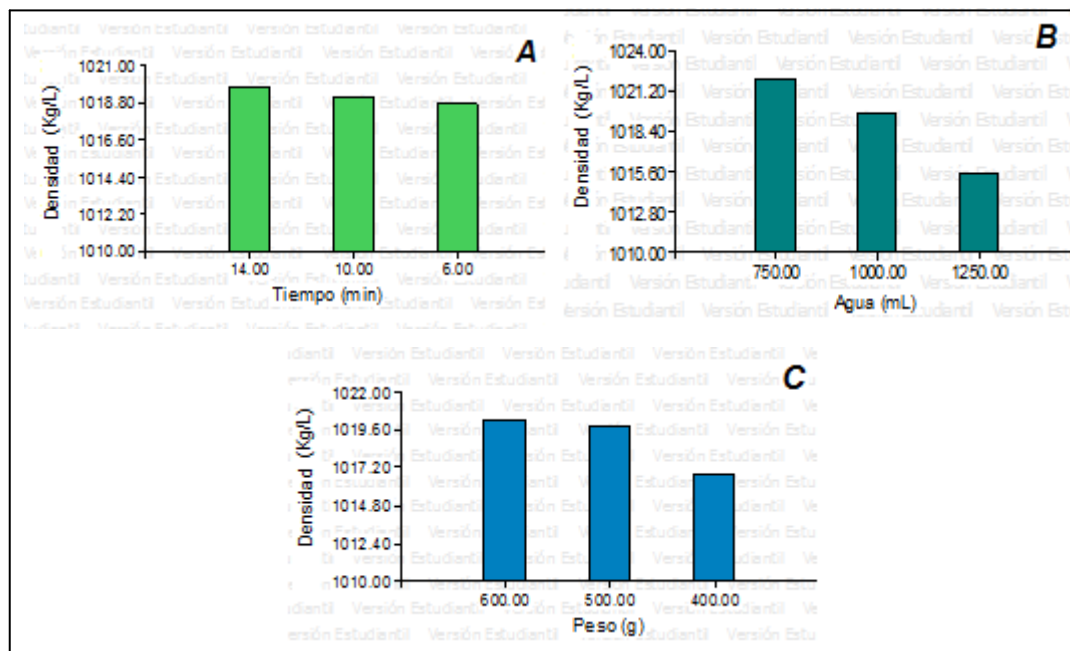
Fuente: elaboración propia basado en tabla XIII.

Tabla XIV. **Densidad del jugo (Kg/L) del método de desintegración húmeda con respecto a cada factor y nivel empleado**

Cantidad de Agua		Cantidad de caña		Tiempo	
Nivel (mL)	Densidad	Nivel (g)	Densidad	Nivel (min)	Densidad
750,0	1 022,0	400,0	1 016,8	6,0	1 018,7
1 000,0	1 019,6	500,0	1 019,8	10,0	1 019,1
1 250,0	1 015,5	600,0	1 020,3	14,0	1 019,8
DMS	1,0	DMS	1,0	DMS	1,0

Fuente: elaboración propia basado en tablas del apéndice 6.

Figura 13. **Representación de la densidad del jugo (Kg/L) a diferentes factores: A) Tiempo, B) Agua y C) Peso**



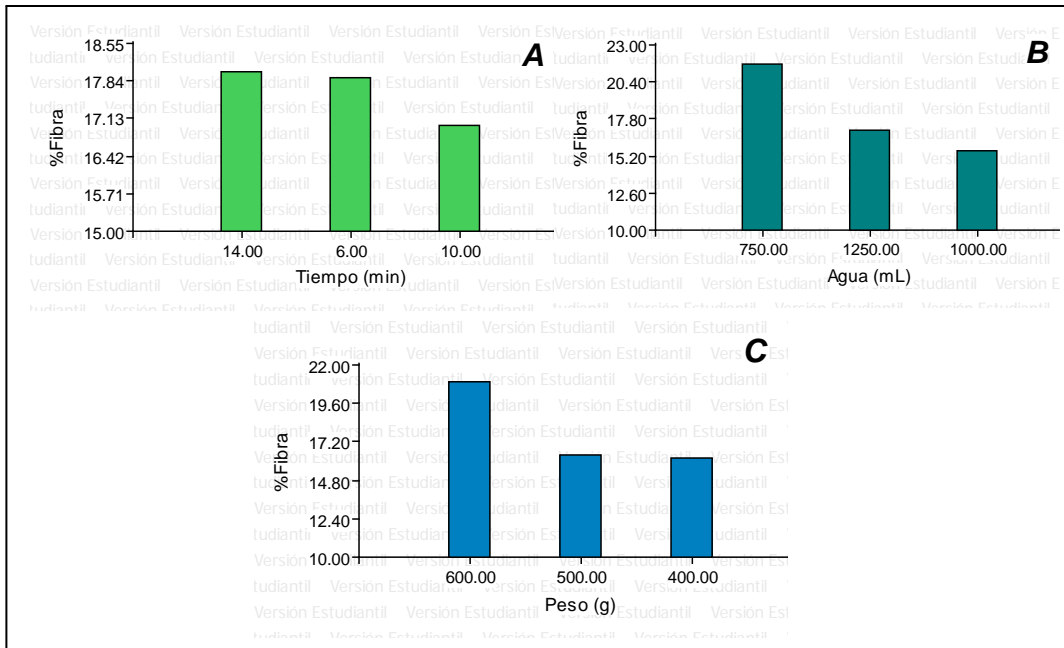
Fuente: elaboración propia basado en tabla XIV.

Tabla XV. **Porcentaje fibra caña del método de desintegración húmeda con respecto a cada factor y nivel empleado**

Cantidad de agua		Cantidad de caña		Tiempo	
Nivel (mL)	Fibra caña (%)	Nivel (g)	Fibra caña (%)	Nivel (min)	Fibra caña (%)
750,0	21,6	400,0	16,2	6,0	17,9
1 000,0	15,6	500,0	16,3	10,0	17,0
1 250,0	17,0	600,0	20,9	14,0	18,0
DMS	0,8	DMS	0,8	DMS	0,8

Fuente: elaboración propia basado en tablas del apéndice 6.

Figura 14. **Representación del porcentaje fibra caña a diferentes factores: A) Tiempo, B) Agua y C) Peso**



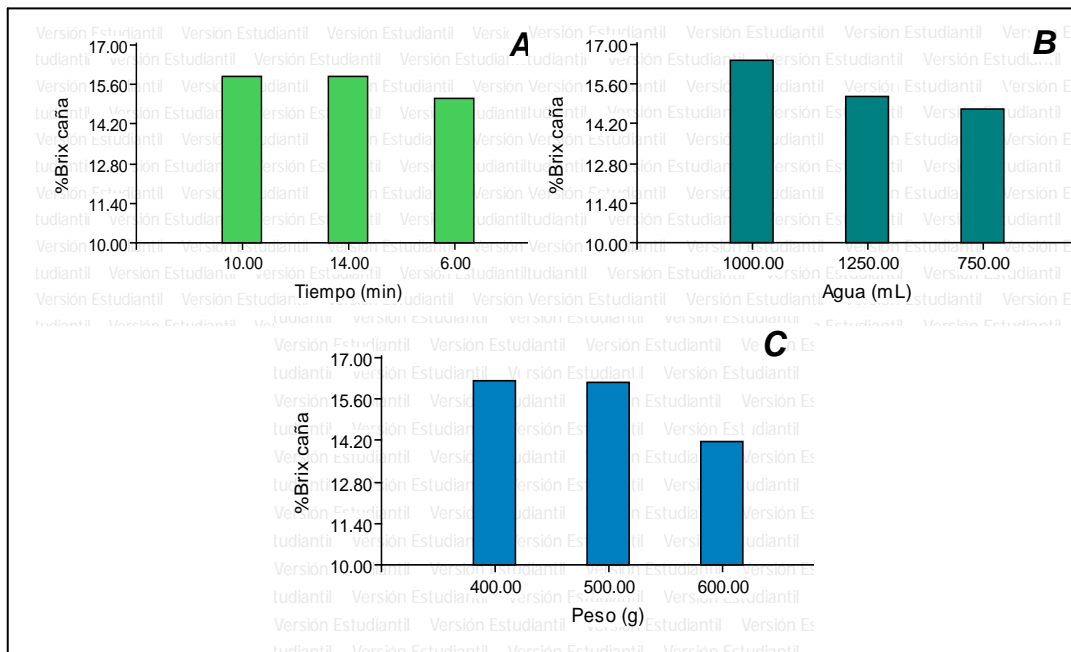
Fuente: elaboración propia basado en tabla XV.

Tabla XVI. **Porcentaje brix caña del método de desintegración húmeda con respecto a cada factor y nivel empleado**

Cantidad de agua		Cantidad de caña		Tiempo	
Nivel (mL)	Brix caña (%)	Nivel (g)	Brix caña (%)	Nivel (min)	Brix caña (%)
750,0	14,7	400,0	16,2	6,0	15,1
1 000,0	16,4	500,0	16,2	10,0	15,9
1 250,0	15,2	600,0	14,2	14,0	15,9
DMS	0,5	DMS	0,5	DMS	0,5

Fuente: elaboración propia basado en tablas del apéndice 6.

Figura 15. **Representación del porcentaje brix caña a diferentes factores: A) Tiempo, B) Agua y C) Peso**



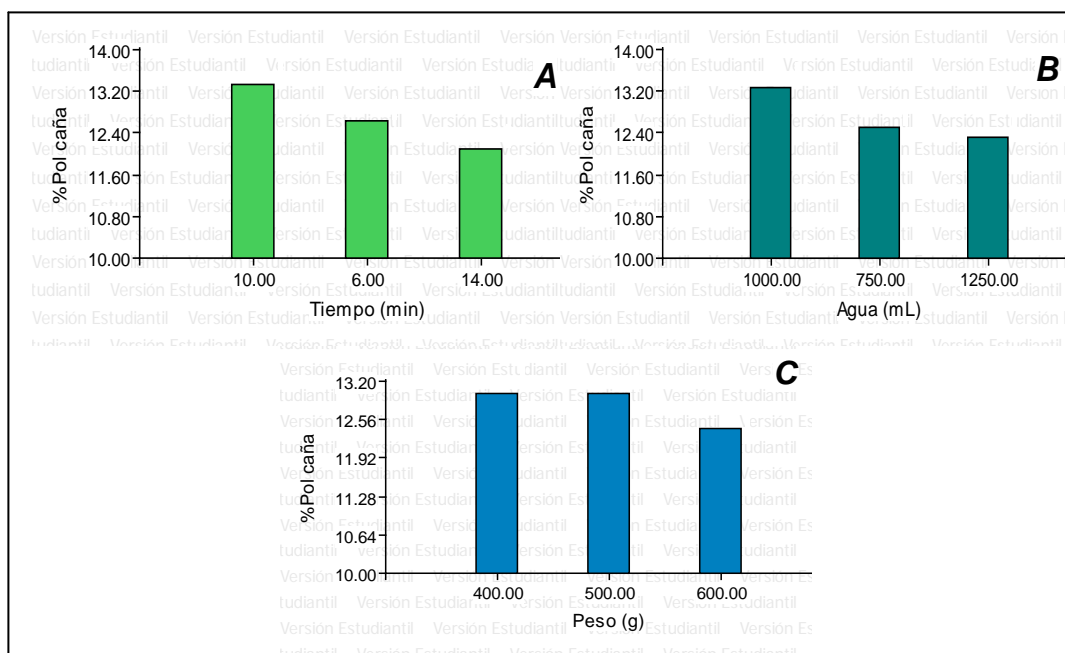
Fuente: elaboración propia basado en tabla XVI.

Tabla XVII. **Porcentaje pol caña del método de desintegración húmeda con respecto a cada factor y nivel empleado**

Cantidad de agua		Cantidad de caña		Tiempo	
Nivel (mL)	Pol caña (%)	Nivel (g)	Pol caña (%)	Nivel (min)	Pol caña (%)
750,0	12,5	400,0	13,0	6,0	12,6
1 000,0	13,3	500,0	13,0	10,0	13,3
1 250,0	12,3	600,0	12,4	14,0	12,1
DMS	0,5	DMS	0,5	DMS	0,5

Fuente: elaboración propia basado en tablas del apéndice 6.

Figura 16. **Representación del porcentaje pol caña a diferentes factores:**
A) Tiempo, B) Agua y C) Peso



Fuente: elaboración propia basado en tabla XVII.

4.2. Documentación del método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501 (mejor tratamiento empleado)

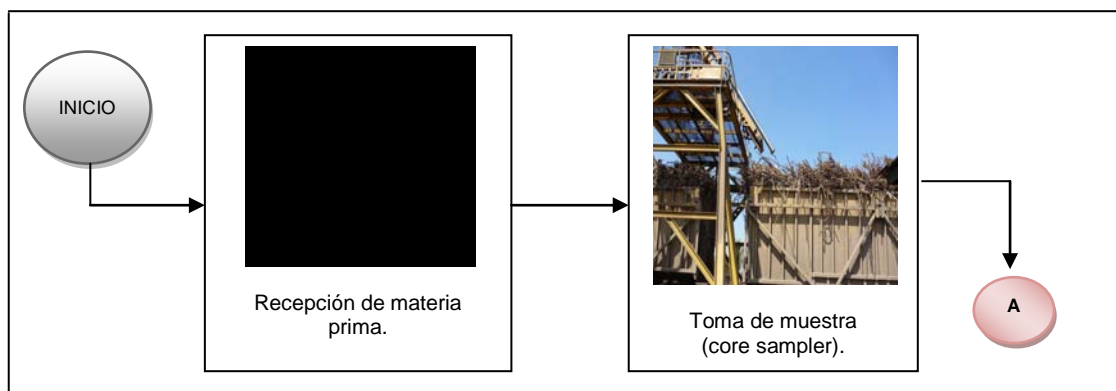
Para la documentación del método de desintegración húmeda, está se realizó a partir del mejor tratamiento que se analizó en el objetivo número uno, siendo el mejor tratamiento el número 8 el cual corresponde a las siguientes proporciones:

Tabla XVIII. Tratamiento escogido en la evaluación del método de desintegración húmeda

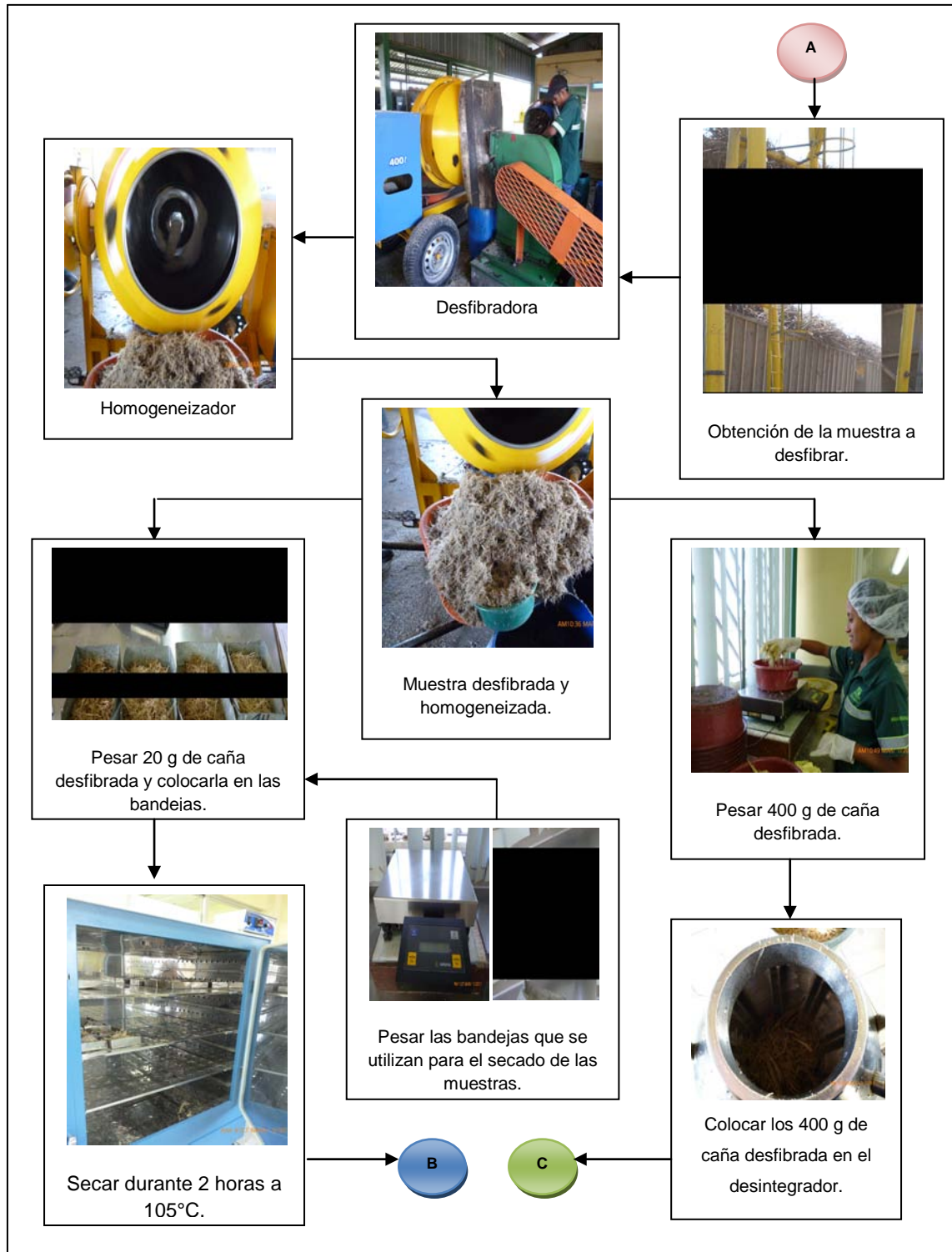
No. Tratamiento	Diseño
8	$V_8 = 400$ g, $t_8 = 6$ min y $W_8 = 1\ 000$ mL

Fuente: elaboración propia basado en tabla IX.

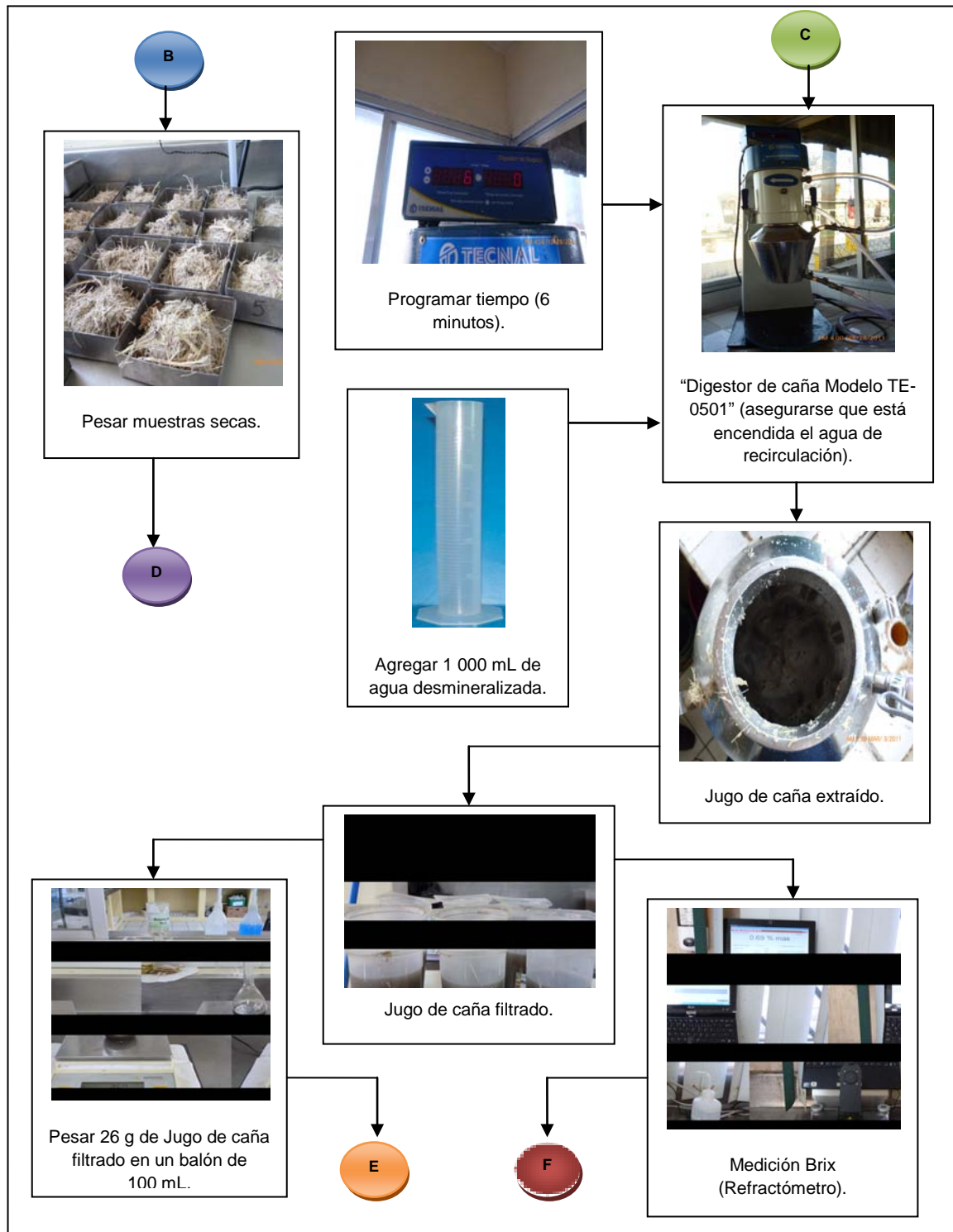
Figura 17. Diagrama de flujo del método de desintegración húmeda propuesto a partir del tratamiento escogido



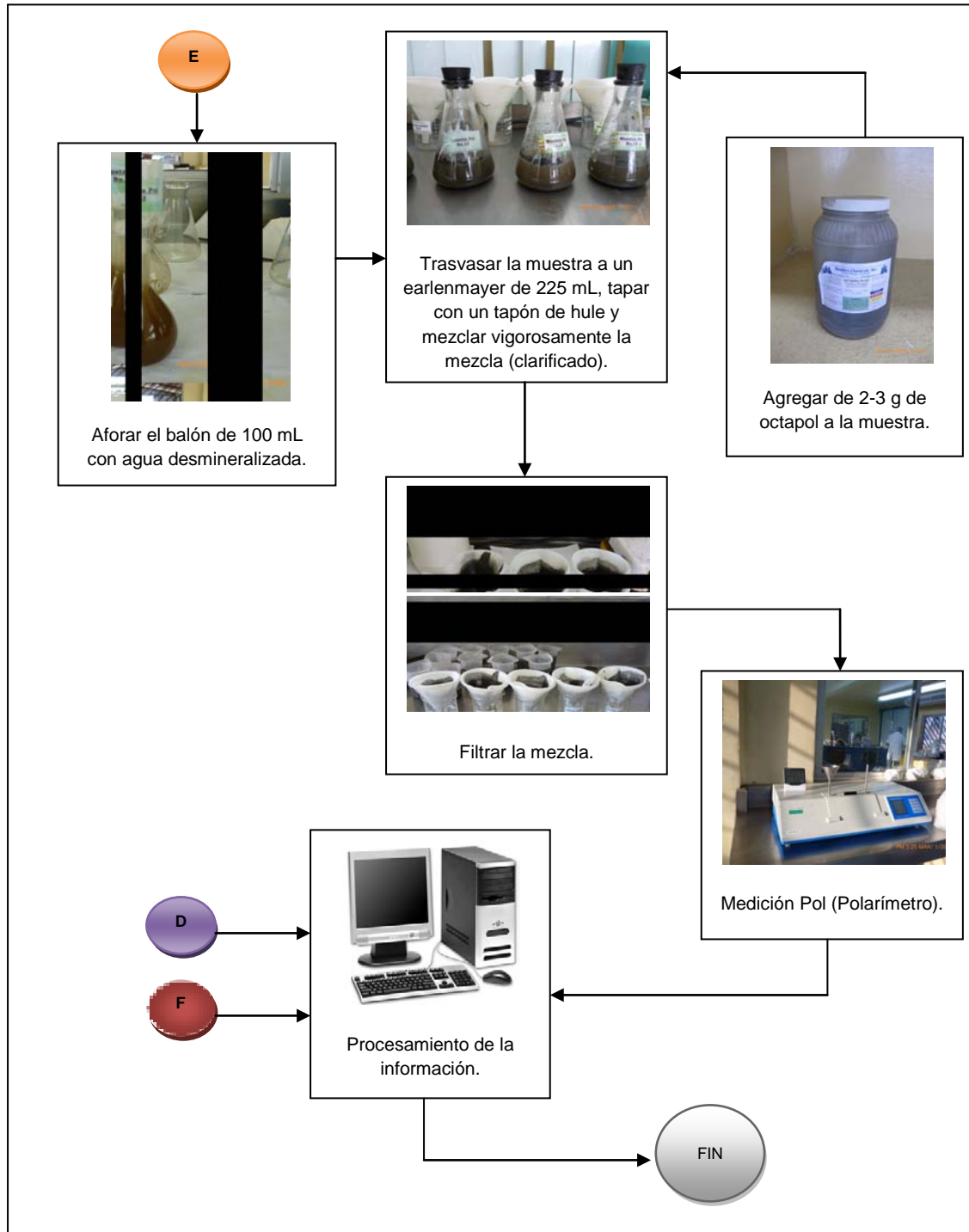
Continuación figura 17.



Continuación figura 17.

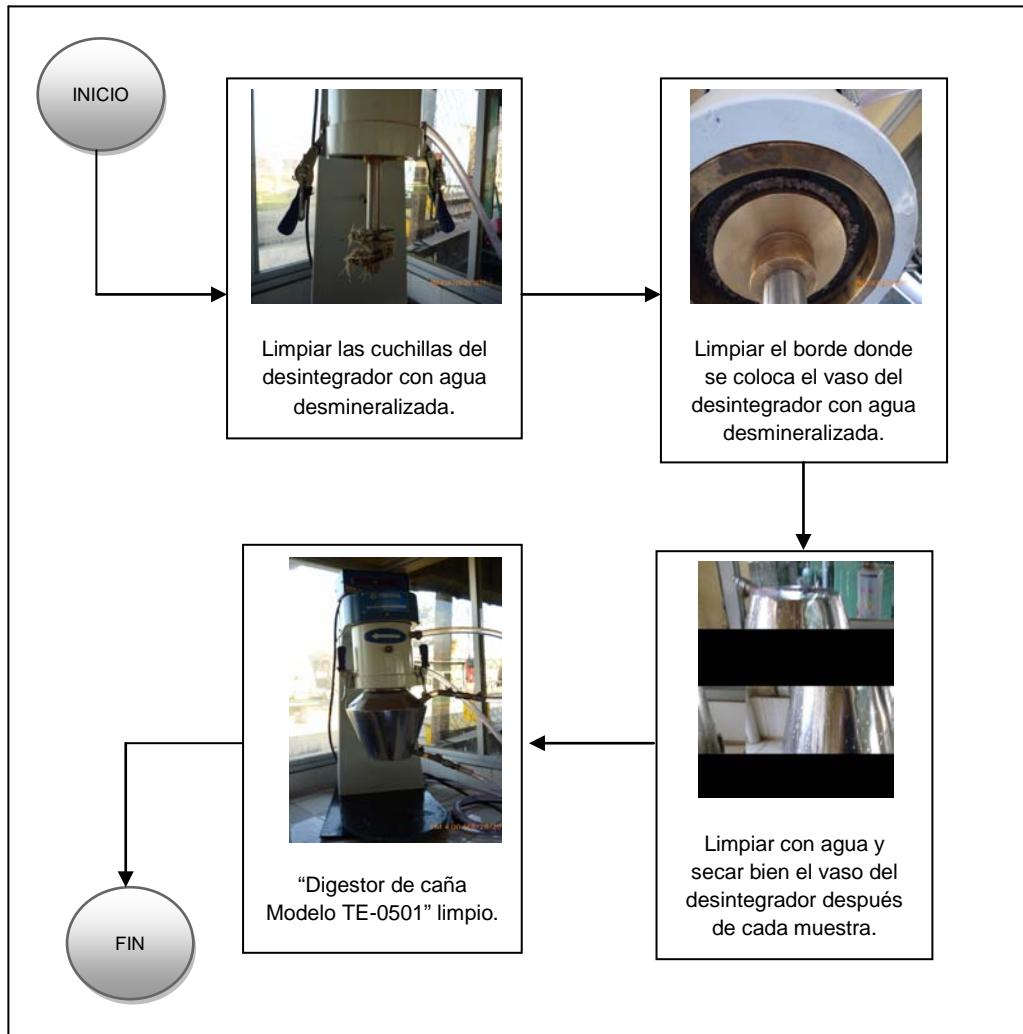


Continuación figura 17.



Fuente: elaboración propia.

Figura 18. Diagrama de flujo de la limpieza del Digestor de caña modelo TE-0501



Fuente: elaboración propia.

4.3. Comparación del método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501 en relación al método de prensa hidráulica

Para la comparación del método de desintegración húmeda con relación al método de prensa hidráulica, se realizó por cada variable respuesta un gráfico, y se realizó una tabla en conjunto con todas las variables respuesta.

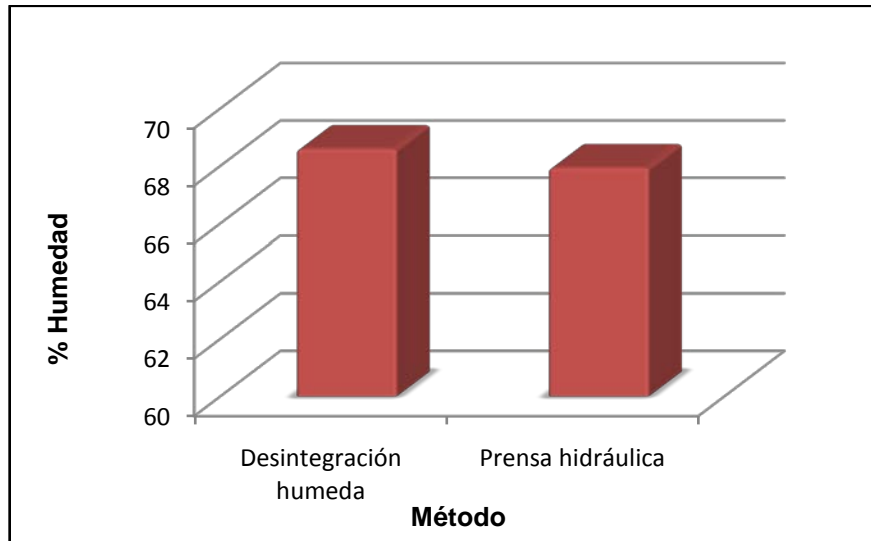
Tabla XIX. **Comparación método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501 en relación al método de prensa hidráulica**

Variable	Método	Promedio	σ	Valor min.	Valor máx.	R ²	CV
Porcentaje humedad	DH	68,59 a*	0,98	67,00	70,50	0,78	1,74
	PH	67,93 a	1,29	66,22	69,53		
Densidad (Kg/L)	DH	1 020,2 a	1,44	1 017,68	1 021,81	1,00	0,24
	PH	1 078,12 b	4,89	1 066,75	1 081,99		
Porcentaje fibra caña	DH	16,8 a	2,03	14,27	19,47	0,92	6,28
	PH	17,3 a	0,31	16,97	17,93		
Porcentaje brix caña	DH	15,88 a	1,40	14,14	18,22	0,85	6,90
	PH	15,56 a	1,34	13,50	16,84		
Porcentaje pol caña	DH	13,11 a	1,51	10,18	13,96	0,79	7,52
	PH	12,69 a	0,97	10,47	13,13		

Fuente: elaboración propia basado en las tablas del apéndice 6.

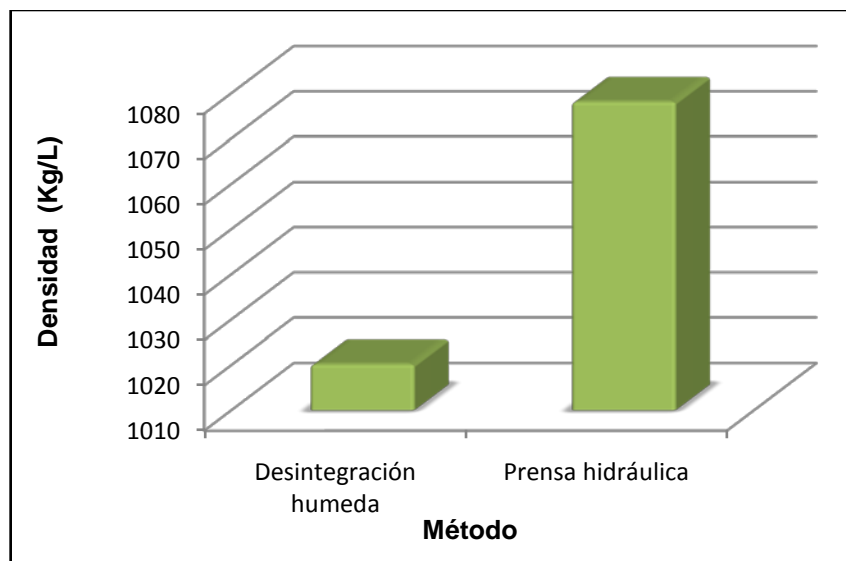
* Medias dentro de la misma variable y con la misma letra no son diferentes significativamente ($P \leq 0,05$) de acuerdo con la DMS.

Figura 19. **Porcentaje humedad caña en función del método empleado**



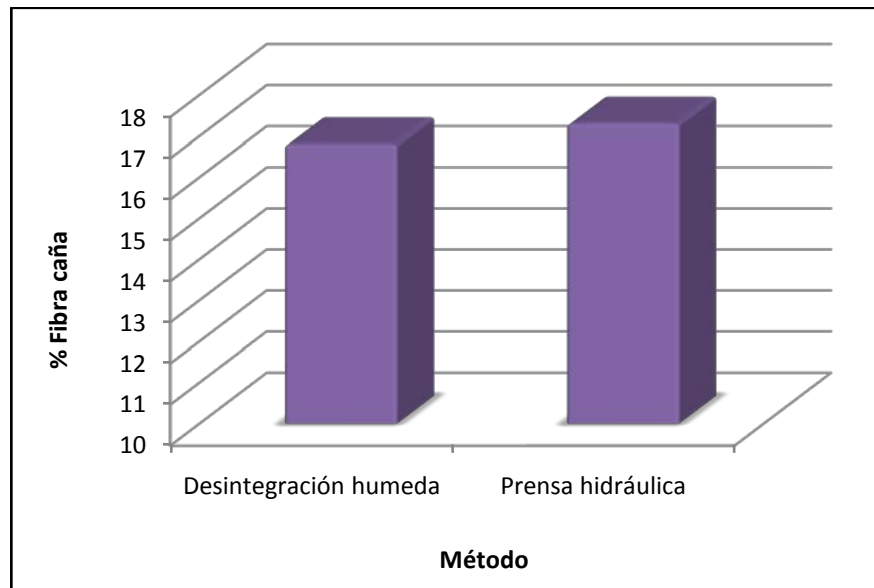
Fuente: elaboración propia basado en tabla XIX.

Figura 20. **Densidad (Kg/L) en función del método empleado**



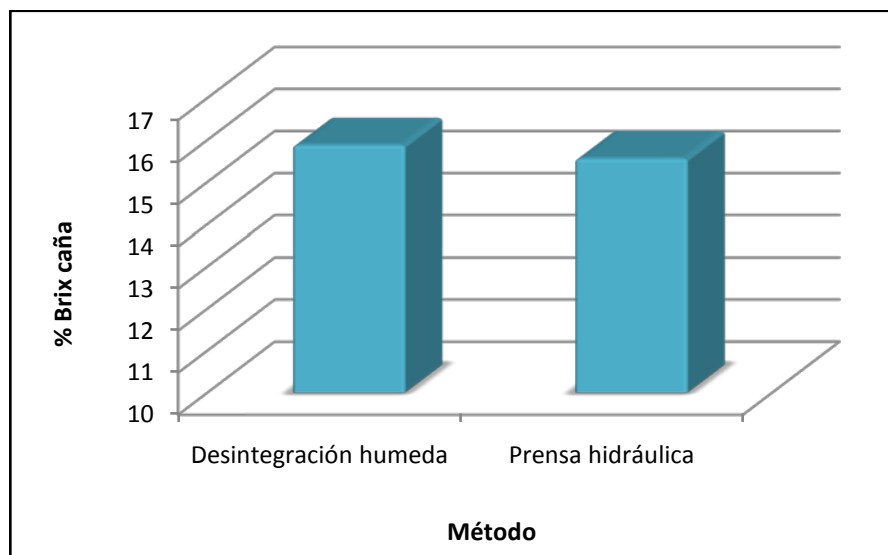
Fuente: elaboración propia basado en tabla XIX.

Figura 21. **Porcentaje fibra caña en función del método empleado**



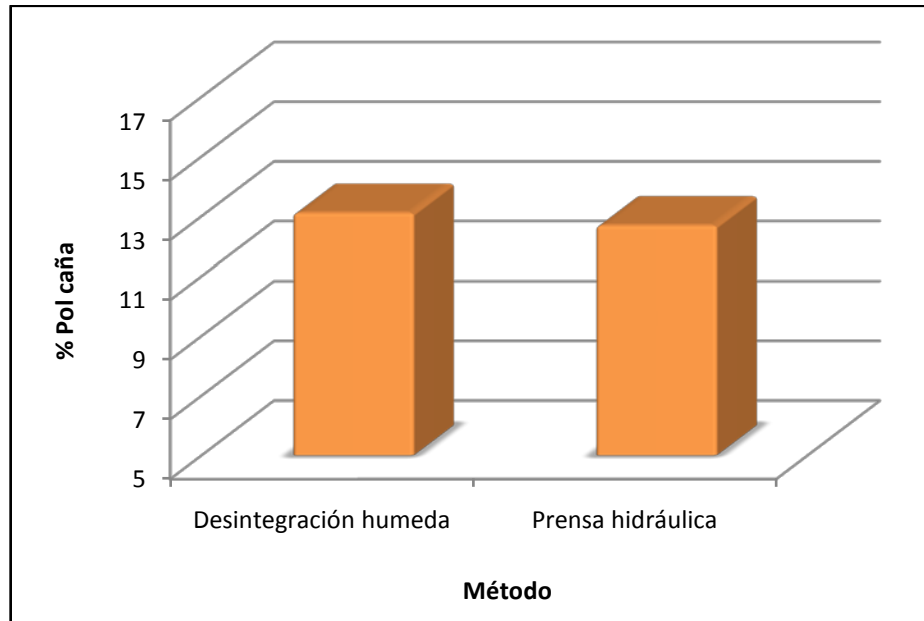
Fuente: elaboración propia basado en tabla XIX.

Figura 22. **Porcentaje brix caña en función del método empleado**



Fuente: elaboración propia basado en tabla XIX.

Figura 23. **Porcentaje pol caña en función del método empleado**



Fuente: elaboración propia basado en tabla XIX.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El objetivo general del presente trabajo de graduación fue evaluar y comparar el método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501 a nivel laboratorio como un método alternativo para el análisis de la calidad del jugo proveniente de la caña de azúcar desfibrada en relación al método de prensa hidráulica.

Las muestras de caña analizadas tanto para la evaluación del método de desintegración húmeda como para la comparación de los métodos, fueron las del tipo cosecha, este tipo de caña es la que ingresa al ingenio para la fabricación del azúcar. El estudio fue realizado en un ingenio azucarero ubicado en la costa sur del país.

El primer objetivo que se realizó fue la evaluación del método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501, para llevar a cabo este objetivo se plantearon 13 tratamientos los cuales fueron analizados bajo un diseño de bloques completamente al azar. Para el análisis de estos datos se realizó primero un análisis de varianza con una estructura factorial con datos desbalanceados en celdas y posteriormente se hizo la prueba de diferencia de medias significativas mínimas (DSM) de Fisher, ambos con un nivel de significancia del 5%.

El análisis descrito anteriormente se realizó para los efectos principales de los factores, para evaluar cuál de estos tratamientos era igual o mejor que la metodología establecida por el método de desintegración húmeda (testigo).

De acuerdo a los datos experimentales obtenidos en la tabla XIII la cual describe el porcentaje de humedad de caña con respecto a cada factor y nivel empleado, se observó que no existen diferencias significativas en el tiempo y la cantidad de agua utilizada, en este caso se puede utilizar el menor tiempo y cualquier cantidad de agua (se recomienda 1 000 mL, por el diseño y la operación del equipo); en el caso de la cantidad de caña utilizada si existen diferencias significativas entre los niveles, siendo el mejor nivel a utilizar el de 400 g, razón por la cual el tratamiento que mejor se acomodo a esta variable respuesta fue el tratamiento número 8 (véase tabla IX).

En la tabla XIV la cual describe la densidad del jugo con respecto a cada factor y nivel empleado, se observó que no existen diferencias significativas en el tiempo, en el caso de la cantidad de agua y caña utilizada si existieron diferencias significativas entre los niveles, siendo la mejor proporción a utilizar 1 000 mL y 600 g respectivamente, razón por la cual el tratamiento que mejor se acomodo a esta variable respuesta fue el tratamiento número 6 (véase tabla IX).

En el caso del análisis del porcentaje de fibra de caña con respecto a cada factor y nivel empleado el cual se observa en la tabla XV, se observó que si existen diferencias significativas en el tiempo siendo el mejor nivel a utilizar el correspondiente a 6 minutos, en el caso de la cantidad de agua y caña utilizada también existieron diferencias significativas entre los niveles, siendo la mejor proporción a utilizar 1 000 mL y 400 g respectivamente, razón por la cual el tratamiento que mejor se acomodo a esta variable respuesta fue el tratamiento número 8 (véase tabla IX).

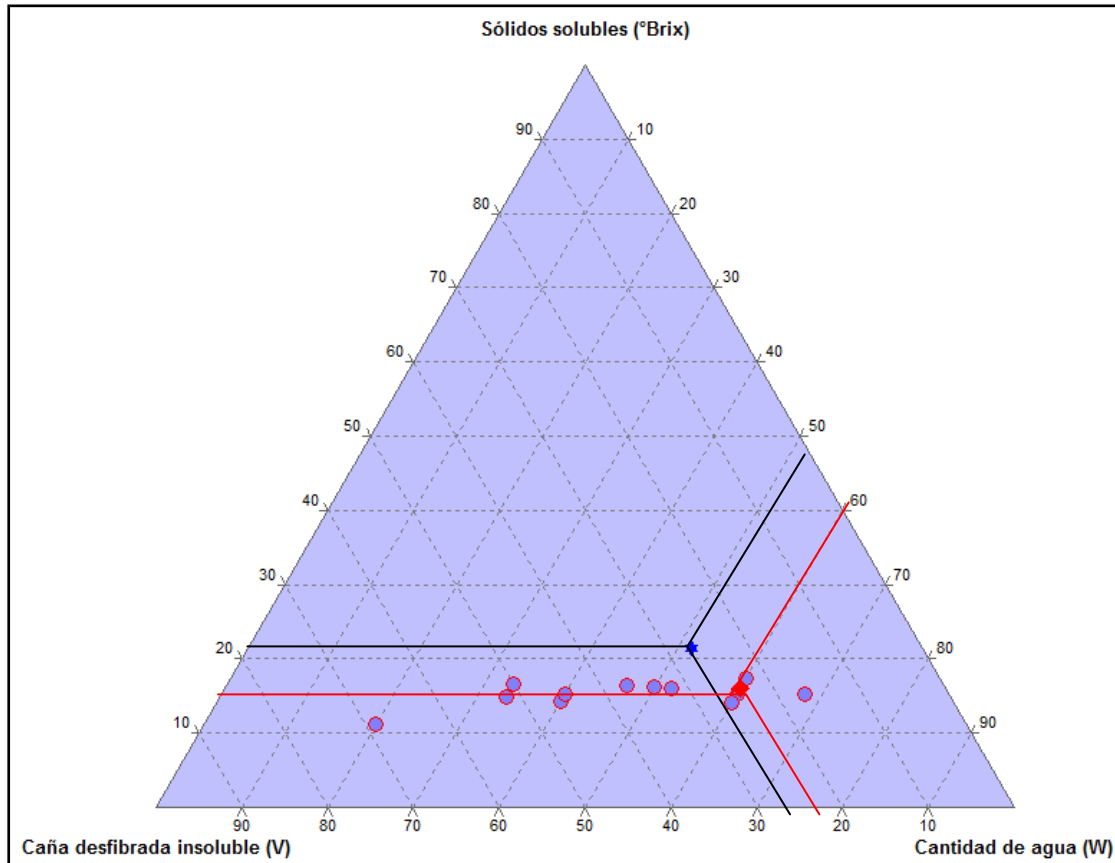
Con respecto al análisis del porcentaje de brix caña con respecto a cada factor y nivel empleado el cual se observa en la tabla XVI, se observó que si existen diferencias significativas en el tiempo siendo el mejor nivel a utilizar el correspondiente a 10 minutos, en el caso de la cantidad de agua y caña utilizada también existieron diferencias significativas entre los niveles, siendo la mejor proporción a utilizar 750 mL y 400 g respectivamente, razón por la cual el tratamiento que mejor se acomodó a esta variable respuesta fue el tratamiento número 12 (véase tabla IX).

En la tabla XVII la cual describe el porcentaje pol caña con respecto a cada factor y nivel empleado, se observó que si existen diferencias significativas en el tiempo siendo el mejor nivel a utilizar el correspondiente a 6 minutos, en el caso de la cantidad de agua y caña utilizada también existieron diferencias significativas entre los niveles, siendo la mejor proporción a utilizar 1 000 mL y 400 g respectivamente, razón por la cual el tratamiento que mejor se acomodó a esta variable respuesta fue el tratamiento número 8 (véase tabla IX).

Entonces a través del análisis de cada una de las variables respuesta con respecto a cada factor y nivel empleado en cuanto a la evaluación del método de desintegración húmeda se observó que la tendencia del tratamiento a utilizarse fue el tratamiento número 8, el cual sus proporciones se evidencian en la tabla XVIII.

En sí, el análisis del método de desintegración, lo que llegó a establecer es que la operatoria del equipo Digestor de caña modelo TE-0501 requiere una cantidad de caña desfibrada más diluida en la suspensión, lo cual permite una mejor transferencia de masa, tal como se puede observar en la figura siguiente:

Figura 24. **Diagrama ternario de la cantidad de caña desfibrada con la cantidad de agua y los sólidos solubles de la evaluación del método de desintegración húmeda**



Fuente: elaboración propia basado en tabla del apéndice 6.

Como se observa en el gráfico, la mayoría de puntos con respecto a la cantidad de sólidos solubles se ubica en el rango de 10-20%, con respecto a la cantidad de agua se ubica en un 60% y con respecto a la cantidad de caña desfibrada insoluble se ubica en el rango de 20-30%, y dentro de estos rangos es donde se ubica el tratamiento escogido (diamante rojo).

Entonces, la tendencia que se evidencia en el diagrama indica que se necesita una cantidad de caña menor con respecto a la cantidad de agua a utilizar, es decir, se necesita una solución más diluida para que la operatividad del equipo sea efectiva. El punto azul que se observa en el diagrama nos indica las proporciones con las cuales se encontraba la caña desfibrada al inicio, es decir, sin añadirle agua, sino que distribuyéndolo según la composición de la caña de azúcar (fibra, agua y sacarosa).

Entonces a partir de este punto se observa que hay una mayor cantidad de sólidos solubles con respecto a los calculados según los diferentes tratamientos, esto debido a que según el método de desintegración húmeda se le añade agua a la caña lo cual también se evidencia en la proporción de agua con respecto al tratamiento escogido, pero con respecto a proporción de caña desfibrada es menor.

Lo descrito anteriormente nos indica que en la caña desintegrada, aun existían sólidos solubles sin extraer, pero debido a que el estudio manejo la operación que indica el método en donde se recomienda una etapa de maceración, entonces por esta razón se tuvo una menor proporción de sólidos solubles con respecto al punto inicial. Con respecto a la cantidad de agua una parte del disolvente también permaneció ligada a la caña desfibrada, debido a esto el tratamiento escogido tuvo una mayor proporción de agua con respecto al punto inicial.

Entonces, conforme a la operación unitaria extracción sólido líquido se recomienda realizar un estudio con etapas múltiples de maceración para determinar la cantidad de sólidos solubles y agua que aun retiene la caña desintegrada.

Para llevar a cabo el segundo objetivo, a partir del tratamiento no. 8 fue que se documentó el método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501 el cual está descrito en las figuras 17-18.

Para el cumplimiento del último objetivo específico, el cual corresponde a la comparación del método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501 en relación al método de prensa hidráulica, esta comparación se realizó por medio de un análisis de varianza de dos factores para evaluar la hipótesis nula y posteriormente se hizo la prueba de diferencia de medias significativas mínimas (DSM) de Fisher, ambos con un nivel de significancia del 5%.

Como se observa en la tabla XIX, con respecto a las variables respuestas porcentaje humedad, porcentaje fibra caña, porcentaje brix caña y porcentaje pol caña no existieron diferencias significativas entre ambos métodos, gráficamente esto se evidencia en las figuras 19, 21-23, ahora con respecto a la variable respuesta densidad del jugo existieron diferencias significativas entre ambos métodos con un error del 6,09 (véase figura 20), pero debido a la forma de operación del método de desintegración húmeda se esperaba que la densidad fuera menor que la de la prensa hidráulica, debido a que en el método de desintegración húmeda en el proceso se le añade agua a la caña desfibrada.

Entonces, respondiendo a la hipótesis planteada se afirma que no existen diferencias significativas entre ambos métodos, con lo cual se acepta la hipótesis nula con un nivel de significancia del 5%, lo cual nos indica que se puede utilizar el método de desintegración húmeda por medio del equipo de Digestor de caña modelo TE-0501 como una metodología analítica alternativa a nivel laboratorio para determinar la calidad del jugo de caña de azúcar desfibrada, obtenida en un ingenio azucarero de Guatemala.

CONCLUSIONES

1. El mejor tratamiento a utilizar para el método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501 es aquel que corresponde a las proporciones: V= 400 g, t= 6 min y W= 1 000 mL, de acuerdo con la DMS.
2. El mejor tratamiento a utilizar para el método de desintegración húmeda, permite utilizar un tiempo de desintegración de 6 minutos y no implica diferencia significativa respecto al tiempo recomendado de 10 minutos.
3. El mejor tratamiento a utilizar para el método de desintegración húmeda, permite utilizar una cantidad de caña desintegrada de 400 gramos y no implica diferencia significativa respecto a la cantidad de caña desfibrada recomendada de 500 gramos.
4. El mejor tratamiento a utilizar para el método de desintegración húmeda, permite una mejor versatilidad y operación del equipo ya que la operatoria requiere una cantidad de caña desfibrada mas diluida en la suspensión lo cual permite una mejor transferencia de masa.
5. No existieron diferencias significativas en las variables respuesta: porcentaje humedad, porcentaje brix caña, porcentaje pol caña y porcentaje fibra caña por medio del método de desintegración húmeda en relación al método de prensa hidráulica ($P \leq 0,05$) de acuerdo con la DMS.

6. Existe diferencia significativa en la variable respuesta densidad del jugo por medio del método de desintegración húmeda con respecto al método de prensa hidráulica ($P \leq 0,05$) de acuerdo con la DMS.

7. El método de desintegración húmeda utilizando del equipo Digestor de caña modelo TE-0501 se puede utilizar como un método alternativo a nivel laboratorio para el análisis del jugo de la caña desfibrada en un ingenio azucarero del país.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio sobre la comparación del método de desintegración húmeda utilizando el equipo de Digestor de caña modelo TE-0501 con respecto a otros equipos alternos fabricados artesanalmente.
2. Al realizar cualquier análisis, se debe usar equipo de seguridad personal, sobre todo guantes de latex debido a que al momento de sacar la caña del desintegrador el jugo puede ser muy irritante para la piel.
3. Estudiar el efecto que tiene el tiempo que dura la muestra desfibrada en su recipiente antes de ser desintegrada por el desintegrador sobre los análisis de porcentaje de brix y pol.
4. Limpiar y secar bien el desintegrador antes de cada muestra con agua desmineralizada, para evitar el acumulamiento de residuos de caña en el empaque.
5. Realizar un estudio del método de desintegración húmeda utilizando el equipo Digestor de caña modelo TE-0501 realizando etapas múltiples de maceración dinámica, es decir, volviendo a macerar la caña desfibrada hasta que el porcentaje de sólidos solubles sea mínimo.
6. Realizar un estudio económico sobre la utilización del equipo Digestor de caña modelo TE-0501 con respecto a otros equipos alternos fabricados artesanalmente.

BIBLIOGRAFÍA

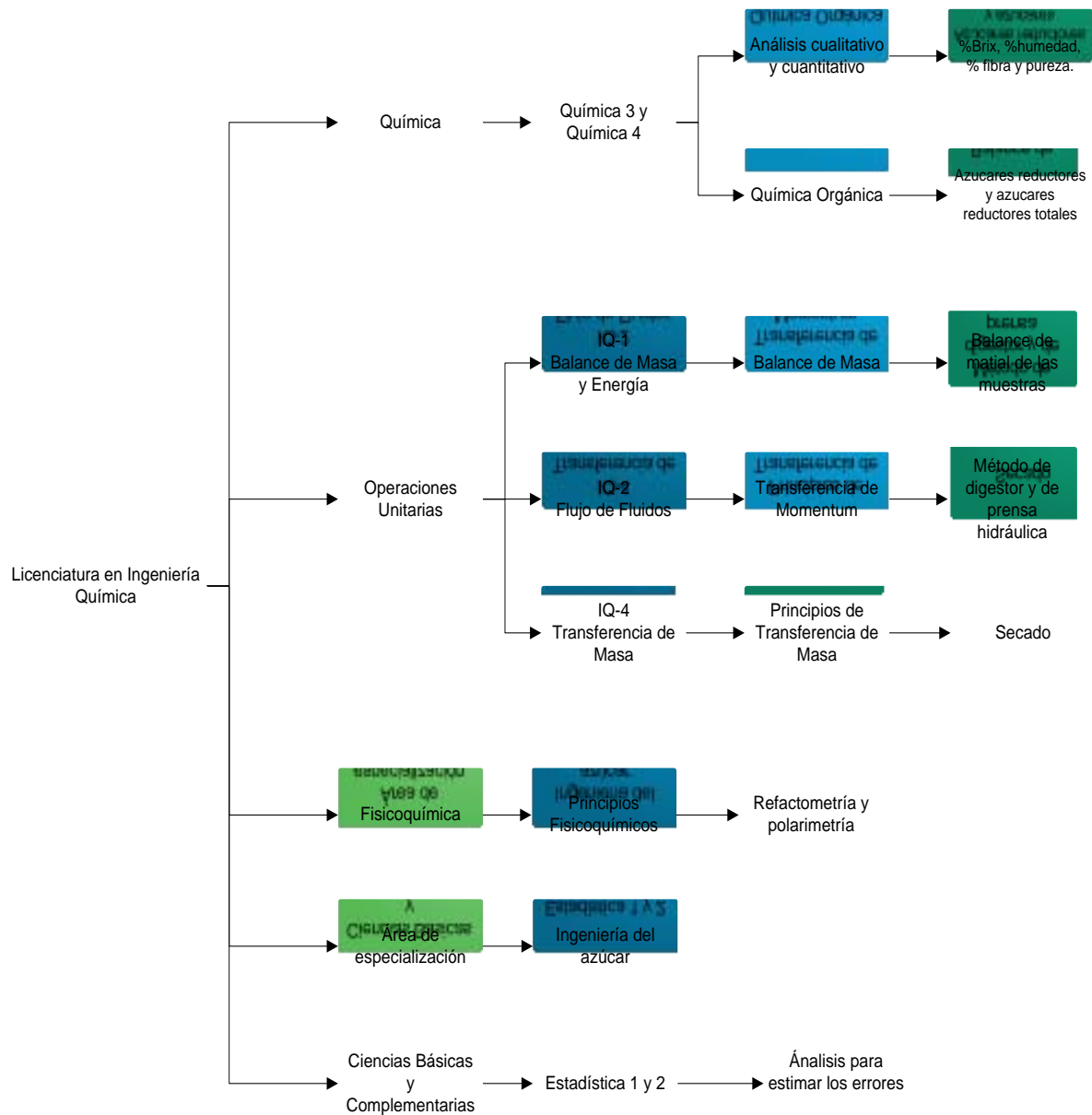
1. BUENAVENTURA, Carlos. *Manual de laboratorio para la industria azucarera*. Colombia: Graficali de Occidente, 1989. 215 p.
2. Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la caña de azúcar. *InfoStat. Manual de uso: ejemplos de los principales métodos utilizados en la industria cañera*. Guatemala: CENGICAÑA, 2009. 43 p.
3. CHECA, Ana. *Validación del método de la prensa hidráulica para determinar la calidad de la caña que ingresa al ingenio azucarero del norte*. Quito: Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería Química. Escuela Politécnica Nacional, 2010. 135 p.
4. CHEN, James. *Manual del azúcar de caña: para fabricantes de azúcar de caña y químicos especializados*. México: Limusa, 1991. 1200 p. ISBN 9681836626.
5. GEANKOPLIS, Christie. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. México: Continental, 1998. 993 p. ISBN 9682613167.
6. CONSECAN. *Manual de instruções*. Brasil: Piracicaba-SP, 2006. 112 p.

7. GARCÍA, Lily. *Evaluación de un nuevo método para el análisis de jugo residual en un ingenio azucarero de Guatemala*. Guatemala: Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1999. 69 p.
8. HERNÁN, Jaime. *El análisis directo de sacarosa en caña (DAC): una herramienta para verificar la precisión del balance de sacarosa*. Colombia: CENICAÑA, 2002. 2 p.
9. International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis. *ICUMSA methods of sugar analysis: official and tentative methods recommended by the International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis*. New York: ICUMSA, 2008. 153 p.
10. LARRAHONDO, Jesús. *Calidad de la caña de azúcar*. Colombia: CENICAÑA, 1995. 354 p.
11. ORDÓÑEZ, Sandra. *Modelo de diagnóstico para la evaluación de la productividad de un proceso agroindustrial azucarero*. Guatemala: Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2004. 126 p.
12. ROMERO, Eduardo. *Manual de cañero*. Argentina: Zafra, 2009. 232 p. ISBN 9789872128371.

APÉNDICES

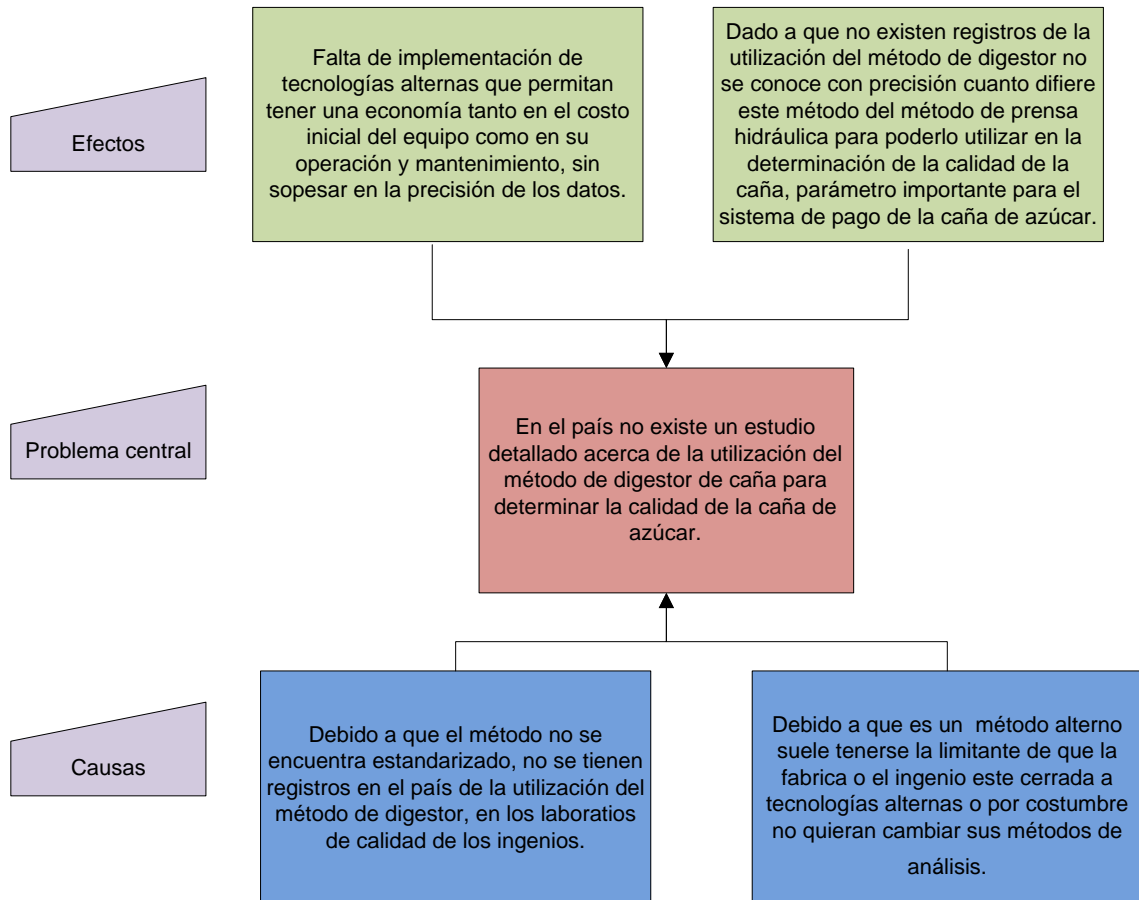
- Apéndice 1. Tabla de requisitos académicos
- Apéndice 2. Árbol de problemas
- Apéndice 3. Presentación e identificación del equipo Digestor de caña modelo TE-0501
- Apéndice 4. Análisis estadístico
- Apéndice 5. Datos originales
- Apéndice 6. Datos calculados

Apéndice 1. Tabla de requisitos académicos



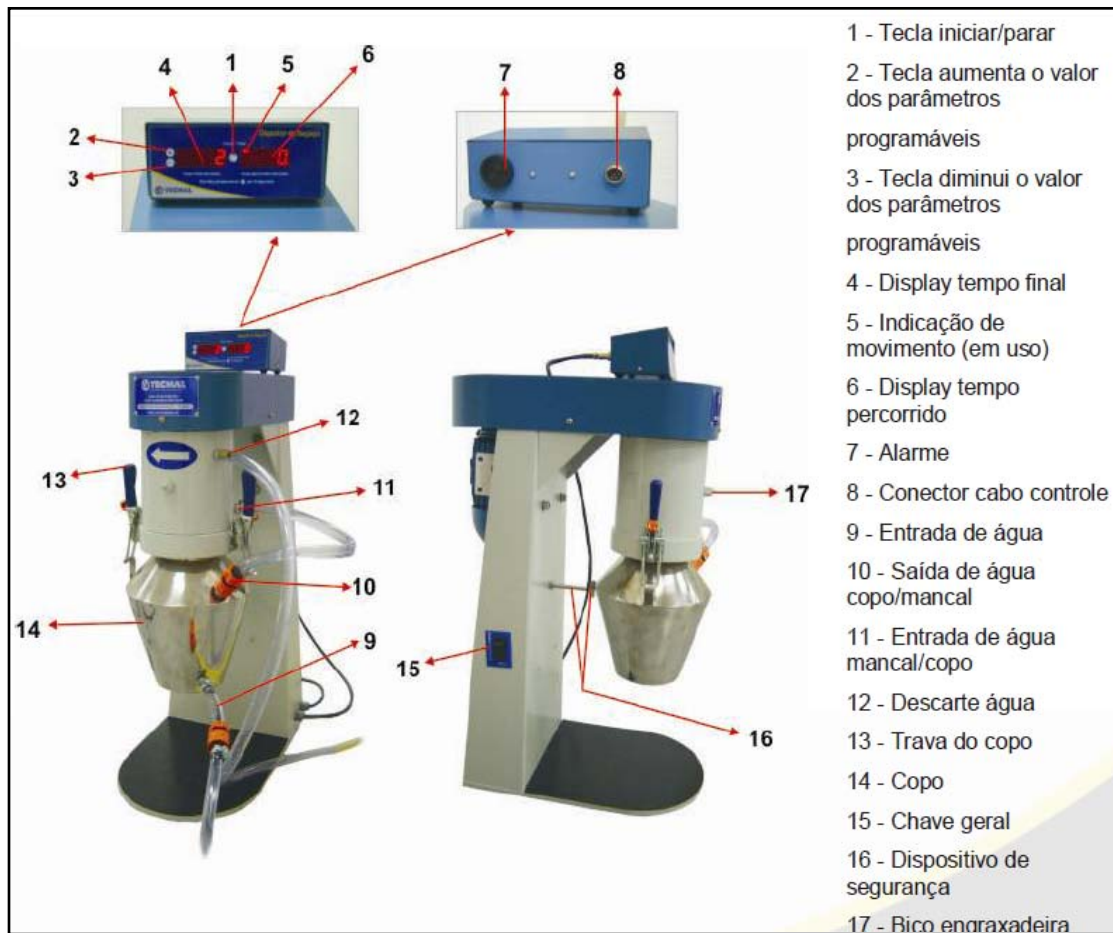
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

Apêndice 3. **Presentación e identificación del equipo**
Digestor de caña modelo TE-0501



Fuente: TECNAL

Apéndice 4. **Análisis estadístico**

Como se había descrito en la sección 3.8.3 la cual corresponde al análisis de varianza, se explicó que este análisis se dividió en dos partes según el objetivo que se quería cumplir. En este caso se comenzó con el análisis de varianza de la evaluación del método de desintegración húmeda puesto que se quería conocer cuál de los 12 tratamientos era mejor o igual que el tratamiento testigo, el cual es el tratamiento propuesto por el fabricante.

Además del análisis de varianza se realizaron comparaciones de medias utilizando la diferencia mínima significativa (DMS). A continuación se presenta el análisis varianza y DSM:

Análisis de varianza del porcentaje humedad con los tratamientos utilizados según el método de desintegración húmeda

Factor de variación	Sumatoria de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	p-valor
Modelo	344,89	22,00	15,68	6,25	<0,0001
Repetición	103,85	10,00	10,39	4,14	0,0021
Tratamiento	241,04	12,00	20,09	8,00	<0,0001
Error	60,22	24,00	2,51		
Total	405,11	46,00			

Fuente: elaboración propia basado en tablas del apéndice 6.

Análisis de varianza de la densidad del jugo (Kg/L) con los tratamientos utilizados según el método de desintegración húmeda

Factor de variación	Sumatoria de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	p-valor
Modelo	457,65	22,00	20,80	12,47	<0,0001
Repetición	17,54	10,00	1,75	1,05	0,44
Tratamiento	440,11	12,00	36,68	21,98	<0,0001
Error	40,05	24,00	1,67		
Total	497,69	46,00			

Fuente: elaboración propia basado en tablas del apéndice 6.

Análisis de varianza del porcentaje fibra caña con los tratamientos utilizados según el método de desintegración húmeda

Factor de variación	Sumatoria de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	p-valor
Modelo	786,00	22,00	35,73	33,35	<0,0001
Repetición	141,35	10,00	14,13	13,20	<0,0001
Tratamiento	644,65	12,00	53,72	50,15	<0,0001
Error	25,71	24,00	1,07		
Total	811,70	46,00			

Fuente: elaboración propia basado en tablas del apéndice 6.

**Análisis de varianza del porcentaje brix caña con los tratamientos
utilizados según el método de desintegración húmeda**

Factor de variación	Sumatoria de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	p-valor
Modelo	118,01	22,00	5,36	11,38	<0,0001
Repetición	22,09	10,00	2,21	4,69	0,0009
Tratamiento	95,93	12,00	7,99	16,96	<0,0001
Error	11,31	24,00	0,47		
Total	129,32	46,00			

Fuente: elaboración propia basado en tablas del apéndice 6.

**Análisis de varianza del porcentaje pol caña con los tratamientos
utilizados según el método de desintegración húmeda**

Factor de variación	Sumatoria de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	p-valor
Modelo	60,03	22,00	2,73	6,95	<0,0001
Repetición	16,69	10,00	1,67	4,25	0,0018
Tratamiento	43,35	12,00	3,61	9,19	<0,0001
Error	9,43	24,00	0,39		
Total	69,46	46,00			

Fuente: elaboración propia basado en tablas del apéndice 6.

Como se observa en las tablas mostradas anteriormente, la probabilidad del valor nos indica que se rechaza la hipótesis nula, con un $\alpha = 0,05$. Entonces surge la pregunta de cuál de los pares de medias son diferentes, puesto que este rechazo podría deberse a uno o varios de los pares de diferencias que pueda tener.

Por esta razón se procedió a realizar la comparación de medias utilizando la diferencia mínima significativa, la cual se presenta a continuación.

**Comparación de medias de los niveles de cada factor para
cada variable respuesta según el método de
desintegración húmeda**

Factor	Nivel	Medias de las variables respuesta				
		Humedad (%)	Densidad (Kg/L)	Fibra caña (%)	Brix caña (%)	Pol caña (%)
Tiempo	6.00	66,69 a	1 018,69 a	17,89 a	15,09 b	12,62 b
	10.00	66,60 a	1 019,13 a	16,99 b	15,87 a	13,34 a
	14.00	65,77 a	1 019,75 a	18,01 a	15,87 a	12,11 b
Cantidad de agua	1000.00	67,49 a	1 019,64 b	15,57 c	16,43 a	13,28 a
	1250.00	66,19 b	1 015,48 c	16,98 b	15,18 b	12,33 b
	750.00	64,56 c	1 022,00 a	21,64 a	14,72 b	12,51 b
Cantidad de caña	500.00	67,56 a	1 016,80 b	16,34 b	16,16 a	12,99 a
	400.00	67,00 a	1 019,84 a	16,22 b	16,23 a	12,99 a
	600.00	63,63 b	1 020,29 a	20,93 a	14,19 b	12,40 b

Fuente: elaboración propia basado en tablas del apéndice 6.

Como se observa en la tabla XXV medias dentro del mismo factor de cada variable respuesta y con la misma letra no son diferentes significativamente ($P \leq 0,05$) de acuerdo con la DMS.

Entonces el análisis de varianza y de DMS para la evaluación del método nos indico que si existen diferencias significativas en tiempo, cantidad de agua y cantidad de caña en los tratamientos propuestos con respecto al tratamiento testigo, siendo la variación de los tratamientos más dependientes de la cantidad de agua y caña a utilizar que del tiempo de desintegración.

Como también lo que se buscaba era encontrar cual era el mejor tratamiento a utilizar del método de desintegración, a través del análisis de diferencia de medias se pudo estimar que el mejor tratamiento fue el número 8 el cual nos permite reducir el tiempo de desintegración y la cantidad de caña desfibrada a utilizar, lo cual permite una mejor operación del equipo.

Ahora con respecto a la comparación del método de desintegración húmeda con el de prensa hidráulica se realizó un análisis de varianza de comparación entre factores por cada variable respuesta, para comprobar la hipótesis nula, este análisis es el que se presenta a continuación:

Análisis de varianza del porcentaje humedad de la comparación de los métodos de desintegración húmeda y prensa hidráulica

Factor de variación	Sumatoria de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	p-valor
Modelo	19,99	11,00	1,82	1,29	0,44
Repetición	18,87	10,00	1,89	1,34	0,42
Tratamiento	1,12	1,00	1,12	0,79	0,42
Error	5,64	4,00	1,41		
Total	25,63	15,00			

Fuente: elaboración propia basado en tablas del apéndice 6.

Análisis de varianza de la densidad de la comparación de los métodos de desintegración húmeda y prensa hidráulica

Factor de variación	Sumatoria de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	p-valor
Modelo	12 837,47	10,00	1 283,75	210,64	<0,0001
Repetición	2 773,93	9,00	308,21	50,57	0,0002
Tratamiento	10 063,54	1,00	10 063,54	1 651,22	<0,0001
Error	30,47	5,00	6,09		
Total	12 867,94	15,00			

Fuente: elaboración propia basado en tablas del apéndice 6.

Análisis de varianza del porcentaje fibra caña de la comparación de los métodos de desintegración húmeda y prensa hidráulica

Factor de variación	Sumatoria de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	p-valor
Modelo	27,08	11,00	2,46	2,14	0,36
Repetición	26,71	10,00	2,67	2,32	0,34
Tratamiento	0,38	1,00	0,38	0,33	0,63
Error	2,30	2,00	1,15		
Total	29,38	13,00			

Fuente: elaboración propia basado en tablas del apéndice 6.

Análisis de varianza del porcentaje brix caña de la comparación de los métodos de desintegración húmeda y prensa hidráulica

Factor de variación	Sumatoria de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	p-valor
Modelo	19,96	10,00	2,00	1,69	0,37
Repetición	19,76	9,00	2,20	1,86	0,33
Tratamiento	0,21	1,00	0,21	0,18	0,70
Error	3,55	3,00	1,18		
Total	23,51	13,00			

Fuente: elaboración propia basado en tablas del apéndice 6.

Análisis de varianza del porcentaje pol caña de la comparación de los métodos de desintegración húmeda y prensa hidráulica

Factor de variación	Sumatoria de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	p-valor
Modelo	15,69	8,00	1,96	2,39	0,18
Repetición	15,16	7,00	2,17	2,64	0,15
Tratamiento	0,53	1,00	0,53	0,64	0,46
Error	4,10	5,00	0,82		
Total	19,79	13,00			

Fuente: elaboración propia basado en tablas del apéndice 6.

Como se observa en las tablas, la probabilidad del valor nos indica que se acepta la hipótesis nula, con una $\alpha = 0,05$, en el caso de todas las variables respuesta, exceptuando la densidad, la cual muestra que si existieron diferencias significativas entre ambos métodos.

Pero como las variables más importantes y de interés para la industria cañera es el porcentaje de humedad, fibra, brix caña y pol caña, se procede a aceptar la hipótesis nula la cual nos dice que no existen diferencias significativas entre el método de desintegración húmeda con respecto al método de prensa hidráulica. Con respecto al análisis de DMS, ese es el que se encuentra en la sección de resultados por esa razón no se incluyo en esta sección.

Entonces a partir de este análisis se puede concluir que se puede utilizar el método de desintegración como un método alterno a nivel laboratorio para el análisis del jugo de la caña desfibrada y debido a que es de bajo costo inicial y de mantenimiento podría permitir reducir costos en el ingenio azucarero.

**Mediciones del porcentaje de humedad, brix y pol de extracto
por medio del método de desintegración húmeda
(datos comparación métodos y tratamientos 1 y 2)**

FECHA: 20 de Enero del 2012 TURNO: _____ ANALISTA: María Mercedes Cerezo Pérez CODIGO: _____
 Pre-cosecha: _____ Pre-quema: _____ Aprovech: _____ Investigación: _____ Cosecha: Tandem: _____ Otros: _____
 Unidades: _____

No.	Eneol. Lit	Bogal	Número	Forma	Fecha	Tratamiento	Repeticiones	Temper.	JUGO				TORTA HUMEDA				Observ.	
									% Brix	% Pol	Hum. Pol (g)	ml. Sólidos A. R.	Acidez	% H ₂ O Humedad	% H ₂ O Humedad	Hum. Tota		Hum. Tota
1	144103396			R1-1					4.05	3.77								N=50g W=
2	144103395			R1-1					5.13	3.87								
3	12409882			N1-7					5.36	4.47								
4	12409882			N1-7					5.10	4.27								
5	144103397			R1-1					5.84	4.78								
6	144103397			R1-1					5.70	4.43								
7	12409882			N1-7					4.88	4.40								N=50g W=
8	12409882			N1-7					4.88	3.90								
9	144103396			S1-4					4.52	3.64								
10	144103396			S1-4					4.86	3.39								
11	12409882			U1-6					4.46	3.57								
12	12409882			U1-6					4.30	3.41								
13	118001801			H1-10					4.30	3.38								
14	118001801			H1-10					4.27	3.22								
15	124100845			Y1-9					5.11	4.30								
16	124100845			Y1-9					5.14	4.36								
17	12409882			U1-6					4.27	3.40								
18	12409882			U1-6					4.12	3.24								
19																		
20																		

Firma: [Firma] Asistente de Caba
 Ejeado: María Mercedes Cerezo Pérez
 Firma: [Firma] Supervisor de Turno
 Reviso: [Firma]
 Firma: _____ Supervisor Laboratorio de Caba
 Aprobado: _____

Fuente: elaboración propia (medición experimental).

**Mediciones del porcentaje de humedad, brix y pol de extracto
por medio del método de desintegración húmeda
(datos tratamientos 7-11)**

FECHA: 01 de Marzo del 2012 TURNO: _____ ANALISTA: Mayra María Cuevas Pérez CODIGO: _____
 Pre-cosecha: _____ Pre-quema: _____ Investigación: _____ Cosecha: Tandem: _____ Otros: _____
 Aprobado: _____ Validado: _____

No.	Evid o Lab	Bocun	Número	Prima	Papel	Tratamiento	Repecho	Tandem	JUGO		TORTA HUMEDA						Observaciones
									% Brix	% Pol	ml. Caudales A.R.	Acidez	%H ₂ O Humeda	%H ₂ O Humeda	Hum. Tota	Hum. Húmeda	
1	14404550			V1-0					4.03	4.00			50.4	30.4	50.0		V=400g W=1L
2	114903407			M4-13					5.20	4.10			41.2	71.2	59.8		V
3	120998808			W1-15					5.37	3.70			50.4	30.4	50.0		V
4	114903403			W4-13					4.01	4.01			50.0	30.0	50.0		V=400g W=1L
5	130993504			R1-1					4.50	3.07			50.0	30.0	50.0		V
6	140002231			C1-3					5.13	4.40			49.0	61.0	50.0		V
7	107910524			V1-0					3.00	3.04			50.2	30.2	50.0		V=400g W=1L
8	124924404			R1-9					4.30	3.30			50.2	30.2	50.0		V
9	1450			T-23					3.03	3.00			40.8	60.8	50.0		V
10	110910854			V1-0					0.25	5.15			51.2	31.2	52.8		V=400g W=1L
11	10080505			T1-5					0.20	5.19			50.0	30.0	50.0		V
12	120002440			M1-3					5.57	4.59			51.4	31.4	52.4		V
13	100998834			P1-2					5.30	4.70			51.4	31.4	52.2		V=400g W=1L
14	134094470			T1-9					0.00	5.90			50.0	30.0	50.0		V
15																	
16																	
17																	
18																	
19																	
20																	

Firma: [Firma] Analista de Café
 Firma: [Firma] Supervisor Laboratorio de Café
 Ejección: Mayra Cuevas Pérez Revisó: [Firma] Aprobó: _____

Fuente: elaboración propia (medición experimental).

**Mediciones del porcentaje de humedad, brix y pol de extracto
por medio del método de prensa hidráulica
(datos comparación métodos)**

No	Envío o lote	Frente	Jugo		Torta Húmeda				
			Brix (%)	Pol (%)	Masa tara (g)	Masa inicial (g)	Masa total inicial (g)	Masa final (g)	Masa torta húmeda (%)
1	103999650	T1-5	19,13	17,20	80,80	20,00	100,80	91,40	139,60
2	103999650	T1-5	19,13	17,20	80,80	20,00	100,80	91,40	139,60
3	130993357	R1-1	17,00	14,60	79,40	20,00	99,40	90,00	144,00
4	130993357	R1-1	17,00	14,60	79,40	20,00	99,40	90,00	144,00
5	135600029	M1-11	20,46	18,42	80,20	20,00	100,20	90,80	119,00
6	135600029	M1-11	20,46	18,42	80,20	20,00	100,20	90,80	119,00
7	94904439	V1-8	20,11	17,70	75,80	20,00	95,80	86,80	144,20
8	94904439	V1-8	20,11	17,70	75,80	20,00	95,80	86,80	144,20
9	121007964	S4-14	18,94	15,86	71,00	20,00	91,00	82,40	141,00
10	121007964	S4-14	18,94	15,86	71,00	20,00	91,00	82,40	141,00
11	188998322	W1-15	16,26	13,50	75,60	20,00	95,60	86,60	136,40
12	188998322	W1-15	16,26	13,50	75,60	20,00	95,60	86,60	136,40
13	120985404	M4-13	22,04	20,13	79,20	20,00	99,20	90,60	132,80
14	120985404	M4-13	22,04	20,13	79,20	20,00	99,20	90,60	132,80
15	109999521	P1-2	18,96	16,81	81,80	20,00	101,80	93,40	145,20
16	109999521	P1-2	18,96	16,81	81,80	20,00	101,80	93,40	145,20
17	144903735	R1-1	18,62	15,59	80,20	20,00	100,20	91,60	126,80
18	144903735	R1-1	18,62	15,59	80,20	20,00	100,20	91,60	126,80
19	12409882	N1-7	20,16	17,38	80,60	20,00	100,60	90,80	174,60
20	12409882	N1-7	20,16	17,38	80,60	20,00	100,60	90,80	174,60
21	144903737	R1-1	16,07	14,58	80,40	20,00	100,40	91,20	134,40
22	144903737	R1-1	16,07	14,58	80,40	20,00	100,40	91,20	134,40

Fuente: elaboración propia (medición experimental).

Apéndice 6. Datos calculados

Determinación de: porcentaje humedad, porcentaje brix caña, porcentaje pol caña, porcentaje fibra caña, pureza y densidad del jugo del método de desintegración húmeda para la comparación de los métodos

		Análisis del Extracto			Análisis caña				
		Porcentaje				Porcentaje			
No.	Envío o lote	Humedad	Brix	Pol	Densidad del jugo (Kg/L)	Fibra	Brix	Pol	Pureza
1	103999650	69,00	5,95	5,01	1 020,56	13,98	17,02	14,33	84,20
2	130993357	67,00	5,03	3,62	1 016,88	18,86	14,14	10,18	71,97
3	135600029	69,00	6,26	5,59	1 021,81	13,04	17,96	16,04	89,30
4	94904439	68,50	6,03	5,13	1 020,88	14,27	17,23	14,66	85,07
5	121007964	63,50	6,07	4,74	1 021,04	19,47	17,03	13,30	78,09
6	188998322	69,00	5,37	3,92	1 018,24	15,73	15,27	11,13	72,91
7	120985404	70,50	6,31	5,33	1 022,01	11,28	18,22	15,37	84,39
8	109999521	66,50	5,88	4,93	1 020,26	16,87	16,63	13,96	83,91
9	144903735	65,50	4,89	3,82	1 016,32	20,85	13,65	10,66	78,12
10	12409882	69,00	5,23	4,62	1 017,68	16,15	14,85	13,11	88,34
11	144903737	69,50	5,65	4,61	1 019,34	14,38	16,12	13,15	81,58

Fuente: elaboración propia (ecuaciones 2-9).

Determinación de: porcentaje humedad, porcentaje brix caña, porcentaje pol caña, porcentaje fibra caña, pureza y densidad del jugo del método de prensa hidráulica para la comparación de los métodos

No.	Envío o lote	Análisis del Extracto			Análisis caña				
		Porcentaje			Densidad del jugo (Kg/L)	Porcentaje			
		Humedad	Brix	Pol		Fibra	Brix	Pol	Pureza
1	103999650	66,45	19,13	17,20	1 076,09	17,84	15,72	13,13	83,50
2	130993357	68,38	17,00	14,60	1 066,75	17,61	14,01	11,19	79,87
3	135600029	65,48	20,46	18,42	1 081,99	17,68	16,84	14,10	83,70
4	94904439	66,38	20,11	17,70	1 080,43	16,91	16,71	13,74	82,21
5	121007964	68,03	18,94	15,86	1 075,25	16,08	15,89	12,50	78,62
6	188998322	69,53	16,26	13,50	1 063,54	16,97	13,50	10,47	77,52
7	120985404	64,21	22,04	20,13	1 089,07	17,63	18,15	15,42	84,93
8	109999521	66,22	18,96	16,81	1 075,34	18,29	15,49	12,72	82,11
9	144903735	66,79	18,62	15,59	1 073,84	17,93	15,28	11,88	77,72
10	12409882	65,74	20,16	17,38	1 080,65	17,67	16,60	13,30	80,15
11	144903737	68,92	16,07	14,58	1 062,72	17,89	13,20	11,12	84,24

Fuente: elaboración propia (ecuaciones 10-17).

Determinación de: porcentaje humedad, porcentaje brix caña, porcentaje pol caña, porcentaje fibra caña, pureza y densidad del jugo del método de desintegración húmeda (tratamientos 1-4)

No.	Envío o lote	Análisis del Extracto			Análisis caña				
		Porcentaje			Densidad del jugo (Kg/L)	Porcentaje			
		Humedad	Brix	Pol		Fibra	Brix	Pol	Pureza
Tratamiento 1									
1	129007507	65,00	4,78	4,15	1 015,88	19,19	15,81	13,73	86,82
2	145994718	64,50	4,69	3,74	1 015,52	20,02	15,48	12,34	79,74
3	107985151	71,00	4,38	3,49	1 014,29	14,30	14,70	11,72	79,68
Tratamiento 2									
1	118001801	70,00	4,34	3,30	1 014,11	15,50	14,50	11,04	76,12
2	127100845	68,50	5,13	4,33	1 017,26	14,30	17,20	14,54	84,49
3	107985157	66,50	4,20	3,35	1 013,55	19,64	13,86	11,05	79,74
Tratamiento 3									
1	137700785	69,00	7,38	6,15	1 026,34	13,55	17,45	14,53	83,27
2	138995672	65,50	5,68	4,48	1 019,46	21,53	12,97	10,22	78,85
3	135500084	64,50	6,79	5,33	1 023,93	19,89	15,61	12,27	78,56
Tratamiento 4									
1	133995163	66,50	6,18	5,91	1 021,49	19,24	14,26	13,63	95,55
2	120985501	65,00	6,60	6,26	1 023,18	19,81	15,19	14,41	94,85
3	130993448	71,00	6,40	4,86	1 022,37	13,89	15,11	11,46	75,86

Fuente: elaboración propia (ecuaciones 2-9).

Determinación de: porcentaje humedad, porcentaje brix caña, porcentaje pol caña, porcentaje fibra caña, pureza y densidad del jugo del método de desintegración húmeda (tratamientos 5-8)

No.	Envío o lote	Análisis del Extracto			Análisis caña				
		Porcentaje			Densidad del jugo (Kg/L)	Porcentaje			
		Humedad	Brix	Pol		Fibra	Brix	Pol	Pureza
Tratamiento 5									
1	133995171	69,00	5,66	4,87	1 019,40	16,86	14,14	12,17	86,04
2	109999586	62,00	5,96	4,69	1 020,60	23,51	14,49	11,40	78,69
3	94904520	66,00	6,74	5,86	1 023,74	17,18	16,82	14,62	86,94
Tratamiento 6									
1	127100916	69,00	6,07	5,01	1 021,04	15,77	15,23	12,57	82,54
2	141994529	67,00	5,98	5,14	1 020,68	18,14	14,86	12,77	85,95
3	127100917	64,00	6,38	5,16	1 022,29	20,28	15,72	12,71	80,88
Tratamiento 7									
1	94904556	69,00	4,83	4,08	1 016,08	14,81	16,19	13,68	84,47
2	114903907	67,00	5,28	4,18	1 017,88	15,33	17,67	13,99	79,17
3	138998969	68,00	5,37	3,70	1 018,24	13,95	18,05	12,43	68,90
Tratamiento 8									
1	114903903	67,00	4,81	4,01	1 016,00	16,98	16,02	13,35	83,37
2	130993504	65,00	4,58	3,67	1 015,08	19,88	15,12	12,12	80,13
3	140002031	66,00	5,13	4,40	1 017,28	16,91	17,09	14,66	85,77

Fuente: elaboración propia (ecuaciones 2-9).

Determinación de: porcentaje humedad, porcentaje brix caña, porcentaje pol caña, porcentaje fibra caña, pureza y densidad del jugo del método de desintegración húmeda (tratamientos 9-12)

No.	Envío o lote	Análisis del Extracto			Análisis caña				
		Porcentaje			Densidad del jugo (Kg/L)	Porcentaje			
		Humedad	Brix	Pol		Fibra	Brix	Pol	Pureza
Tratamiento 9									
1	137700827	68,00	5,54	4,44	1 018,92	15,79	16,21	12,99	80,14
2	98903968	65,00	5,71	5,16	1 019,60	18,45	16,55	14,96	90,37
3	127101015	63,00	5,37	4,78	1 018,24	21,60	15,40	13,71	89,01
Tratamiento 10									
1	109999634	61,00	5,36	4,78	1 018,20	28,47	10,53	9,39	89,18
2	134994479	56,00	6,08	5,98	1 021,08	32,28	11,72	11,52	98,36
3	119007422	69,00	6,73	5,29	1 023,70	17,00	14,00	11,00	78,60
Tratamiento 11									
1	107985274	67,00	3,88	3,04	1 012,31	17,68	15,32	12,00	78,35
2	134994464	68,00	4,30	3,36	1 013,97	14,90	17,10	13,36	78,14
3	1459	64,00	3,83	3,00	1 012,11	21,01	14,99	11,74	78,33
Tratamiento 12									
1	116900854	67,00	6,25	5,15	1 021,77	16,03	16,97	13,98	82,40
2	106805585	66,00	6,28	5,19	1 021,89	17,01	16,99	14,04	82,64
3	129007648	70,00	5,57	4,59	1 019,04	14,81	15,19	12,52	82,41

Fuente: elaboración propia (ecuaciones 2-9).

Análisis de varianza para el ajuste de la ecuación del modelo de bloques completamente al azar (comparación de métodos)

Variable	n	R²	R²_{Aj}	CV
Humedad Caña (%)	16,00	0,78	0,17	1,74
Densidad del jugo (Kg/L)	16,00	1,00	0,99	0,24
Fibra (%)	14,00	0,92	0,49	6,28
Brix caña (%)	14,00	0,85	0,350	6,90
Pol caña (%)	14,00	0,79	0,46	7,52

Fuente: elaboración propia (ecuaciones 18-21).

Análisis de varianza para el ajuste de la ecuación del modelo de bloques completamente al azar (evaluación método de desintegración húmeda)

Variable	n	R²	R²_{Aj}	CV
Humedad Caña (%)	47,00	0,85	0,72	2,39
Densidad del jugo (Kg/L)	47,00	0,92	0,85	0,13
Fibra (%)	47,00	0,97	0,94	5,92
Brix caña (%)	47,00	0,91	0,83	4,38
Pol caña (%)	47,00	0,86	0,74	4,88

Fuente: elaboración propia (ecuaciones 18-21).

Datos utilizados para la realización del diagrama ternario

Trat.	Agua (mL)	Peso (g)	Agua (%)	°Brix (%)	Humedad (%)	Caña inicial	Brix caña inicial (%)	Fibra (%)
1	1 250,00	500,00	60,00	15,33	64,75	29,74	21,16	19,61
2	1 250,00	500,00	60,00	14,18	68,33	26,36	22,08	14,90
3	750,00	500,00	33,33	16,53	66,33	29,30	17,32	20,71
4	750,00	500,00	33,33	14,85	65,75	29,21	19,77	19,52
5	1 000,00	600,00	40,00	14,32	64,00	29,17	25,81	17,02
6	1 000,00	600,00	40,00	15,27	66,67	28,63	18,83	19,21
7	1 000,00	400,00	60,00	17,30	68,00	26,46	22,84	14,70
8	1 000,00	400,00	60,00	16,08	66,00	28,53	21,54	17,92
9	1 250,00	600,00	52,00	16,05	65,33	28,58	23,63	17,12
10	750,00	600,00	20,00	11,13	58,50	36,88	15,74	30,37
11	1 250,00	400,00	68,00	15,16	66,33	27,82	23,22	16,29
12	750,00	400,00	46,67	16,38	67,67	27,04	21,68	15,95
13	1 000,00	500,00	50,00	16,19	67,91	26,89	21,39	15,90

Fuente: elaboración propia.