



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

MODELO DE DIAGNÓSTICO PARA LA EVALUACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD DE UN PROCESO AGROINDUSTRIAL AZUCARERO

Sandra Carolina Ordóñez Villegas

Asesorada por Ing. Estuardo Monroy Benítez

Guatemala, agosto de 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MODELO DE DIAGNÓSTICO PARA LA EVALUACIÓN DE LA
PRODUCTIVIDAD DE UN PROCESO AGROINDUSTRIAL AZUCARERO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

SANDRA CAROLINA ORDÓÑEZ VILLEGAS
ASESORADA POR ING. ESTUARDO MONROY BENÍTEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, AGOSTO DE 2004.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David García Celada
VOCAL IV	Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Federico Guillermo Salazar Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. Orlando Posadas Valdéz
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**MODELO DE DIAGNÓSTICO PARA LA EVALUACIÓN DE LA
PRODUCTIVIDAD DE UN PROCESO AGROINDUSTRIAL
AZUCARERO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Química, con fecha 12 de julio de 2003.

Sandra Carolina Ordóñez Villegas

AGRADECIMIENTO

A Dios y a la Virgen María

Por llenarme de bendiciones día con día y darme la oportunidad y la fuerza para seguir adelante.

A mi madre

Por ser mi guía y mi razón en la vida, y por su apoyo constante a lo largo de mi vida.

A mis abuelos

Papá Conrado y mamá Julia, por su cariño y sus enseñanzas.

A mis tíos y primos

Por su cariño durante toda la vida.

A mis amigos

Por los buenos momentos que hemos compartido juntos y ojalá sigamos compartiendo.

Al Ing. Estuardo Monroy

Por la gran ayuda que me ha brindado, por sus buenos consejos y por ser un amigo.

Al Ing. Alberto Arango

Por todos sus consejos y su cariño incondicional.

A Jorge Gamarra

Por su amistad, su apoyo y su cariño.

DEDICATORIA

A mi madre Julia Carolina por ser la luz de mi oscuridad y la alegría de mi vida. Espero que este esfuerzo la llene de orgullo y alegría porque está dedicado a ella con todo mi amor.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIX
OBJETIVOS	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. MARCO TEÓRICO. BASES DEL DIAGNÓSTICO	1
1.1 Agroindustria azucarera	1
1.1.1 Generalidades	1
1.1.2 Medio ambiente	2
1.1.2.1 Lluvia	2
1.1.2.2 Temperatura	3
1.1.2.3 Luminosidad	4
1.1.2.4 Humedad relativa	5
1.1.2.5 Velocidad del viento	5
1.1.2.6 Características del suelo	6
1.1.3 Calidad de la caña	7
1.1.3.1 Semilla	7
1.1.3.2 Variedad de la caña	7
1.1.3.2.1 Variedad CP 731547	8
1.1.3.2.2 Variedad CP 721210	9
1.1.3.2.3 Variedad CP 722086	10
1.1.3.2.3 Variedad Mex 68 – P – 23	11
1.1.3.3 Labores agrícolas	12
1.1.3.3.1 Preparación de suelos	12

1.1.3.3.2	Siembra	13
1.1.3.3.3	Fertilización de la caña de azúcar	14
1.1.3.3.4	Nutrientes	16
1.1.3.3.5	Resiembra	17
1.1.4	Gestión de cosecha	17
1.1.4.1	Quema	17
1.1.4.1.1	Deterioro de la caña ocasionado por la quema	18
1.1.4.1.2	Quema programada	19
1.1.4.1.3	Formas de quema	20
1.1.4.2	Corte	21
1.1.4.3	Transporte	22
1.1.4.4	Deterioro de la caña	22
1.1.5	Recepción de la caña en el ingenio	23
1.1.5.1	Recepción y lavado de la caña	23
1.1.5.2	Balance de materiales en la molienda y sus parámetros	24
1.1.5.3	Clarificación	28
1.1.5.4	Evaporación	30
1.1.5.5	Cristalización	32
1.1.5.6	Centrifugación	35
1.1.5.7	Secado	37
1.1.5.8	Eficiencia en la caña de azúcar	38
2.	EL MODELO DE DIAGNÓSTICO	41
2.1	Antecedentes	41
2.2	Análisis del modelo de diagnóstico	42
2.2.1	Condiciones climatológicas	43
2.2.2	Gestión de cosecha	45
2.2.3	Prácticas de fabricación	47

2.3	Cuestionario de evaluación	47
2.3.1	Bases del diseño	48
2.3.1.1	Bases teóricas	48
2.3.1.2	Ponderación	50
2.3.1.3	Funcionalidad	51
2.3.1.4	Sistema de resultados y recomendaciones	52
2.3.2	Formato del cuestionario de evaluación	54
3.	PRINCIPALES PARÁMETROS DE INFORMACIÓN PARA LA GENERACIÓN DEL MODELO DE DIAGNÓSTICO	63
3.1	Principales parámetros del área agrícola	63
3.2	Principales parámetros del área industrial	73
	CONCLUSIONES	99
	RECOMENDACIONES	100
	BIBLIOGRAFÍA	101

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Molinos de caña de azúcar	27
2.	Clarificador de jugo de caña de azúcar	30
3.	Evaporadores de múltiple efecto	32
4.	Tacho cristizador	35
5.	Máquina centrífuga	36
6.	Máquina secadora de azúcar	37
7.	Diagrama de flujo del proceso agroindustrial azucarero	39
8.	Planeamiento y control de la caña en el campo	64
9.	Modelo de la edad de la caña al aplicarle madurante	65
10.	Modelo de la edad de la caña al corte	65
11.	Precipitación pluvial	66
12.	Modelo de la precipitación pluvial	67
13.	Horas Sol total mensual	68
14.	Modelo de las horas Sol mensual	68
15.	Datos precorte	70
16.	Comparativo precorte por quincena y finca	70
17.	Modelo del precorte	71
18.	Modelo de la curva de madurez	71
19.	Comparativo del rendimiento teórico de la caña recibida por zafra (lb. de azúcar/TC)	72
20.	Sacarosa encontrada en el agua de lavado de mesas de la caña	73

21. Modelo de la sacarosa encontrada en el agua de lavado de mesas de la caña	74
22. Datos de la molienda	75
23. Modelo de la extracción diluida y el porcentaje de imbibición aplicado en los molinos	76
24. Modelo de la calidad de jugo primario	77
25. Modelo de la extracción diluida con respecto al brix primario y al porcentaje de cachaza en la caña	77
26. Evaluación de la caída del brix del jugo <i>core sample</i> al jugo primario	78
27. Modelo de la caída de brix del jugo <i>core sample</i> al jugo primario	79
28. Calidad de los jugos primario, diluido y clarificado	80
29. Pol en la caña	80
30. Pol en la caña calculado en la fábrica	81
31. Pol en el bagazo	81
32. Modelo de la calidad del jugo mezclado	81
33. Modelo del porcentaje de bagazo en la caña y del pol en el bagazo	82
34. Pérdidas en el bagazo	82
35. Balance del porcentaje de pol en la caña	83
36. Modelo del pol del jugo en la cachaza	83
37. Rendimiento diario del jugo de la caña	84
38. Potencial real de azúcar en la caña	85
39. Modelo de los principales parámetros que determinan el potencial de azúcar en la caña en un día de zafra	86
40. Modelo del color del jugo crudo clarificado	87
41. Modelo del porcentaje de reductores primarios	88
42. Modelo del porcentaje de reductores primarios diluidos	88
43. Modelo del pH en el jugo primario	89
44. Modelo del color de la meladura en crudo	90
45. Modelo de los sólidos sedimentables en el jugo primario	91

46. Modelo de los sólidos sedimentables en porcentaje de volumen en el jugo mezclado	91
47. Modelo del porcentaje de conductividad de la ceniza cruda	92
48. Modelo de la dextrana en el azúcar	93
49. Modelo del color del azúcar crudo	94
50. Rendimiento industrial de la caña	94
51. Producción y rendimientos de azúcar en el proceso de zafra	95
52. Modelo de la calidad de la miel final	96
53. Modelo de los rendimientos comparativos entre la zafra 2001 – 2002 y la zafra 2002 – 2003	97
54. Modelo del tiempo perdido en tres temporadas de zafra	98

TABLAS

I. Características agronómicas de las principales variedades de caña	12
II. Cantidades de fertilizante recomendadas	15
III. Ventajas y desventajas de las formas de quema	20

LISTA DE SÍMBOLOS

ppm	Partes por millón
Pza	Pureza
TC	Tonelada de caña
CaO	Óxido de calcio
lb/TC	Libra de azúcar por tonelada de caña
PCC	Potencial de caña en el campo

GLOSARIO

Agua de dilución

Es el agua de imbibición que pasa a formar parte del jugo extraído de la caña por los molinos.

Agua de disolución

Es el agua que se emplea para disolver el azúcar afinado, para hacer el licor de disolución en las refinerías y fábricas de azúcar crudo.

Agua de imbibición

Es el agua que se aplica a la torta de bagazo en los molinos para mejorar la extracción, disminuyendo el porcentaje de pol en el bagazo, el agua de imbibición extrae la sacarosa por lixiviación. Para la imbibición se emplea el agua condensada de los tachos, calentadores y evaporadores; o sea agua que no es apta para calderas. Se puede aplicar bien caliente 140 – 150 °F o fría, pero por experiencia se sabe que es mejor la aplicación en caliente. Esta agua pasa a formar parte del jugo que sale del área de molinos hacia el próximo proceso.

Agua de lavado de mesas

Es el agua que se emplea en las mesas de lavado de caña de azúcar antes de pasar a las prepicadoras.

Azúcar (sacarosa)

Es el compuesto orgánico de mayor producción en forma pura. La sacarosa está formada por una unidad D-glucosa y otra D-fructosa.

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. Esta hidrólisis va acompañada por un cambio en el signo de la rotación, de positivo a negativo; por eso suele llamarse inversión de la sacarosa, y la mezcla levógira de D-glucosa y D-fructosa se ha llamado azúcar invertido.

Azúcares reductores

Monosacáridos (hexosas) en las cuales se convierte la sacarosa, al hidrolizarse en medio ácido con calor o por la presencia de enzimas como la invertasa. Tienen la propiedad de reducir Cu^{+++} a Cu^{++} . No se pueden hidrolizar en compuestos más simples (monosacáridos).

Bagazo

Residuo sólido proveniente de la molienda de la caña de azúcar. Posee aproximadamente 50 % de humedad. Usualmente el que sale del último molino se utiliza como combustible en las calderas.

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.
Cachaza	Residuo final que resulta de la filtración de las cachazas, que tiene valor como abono y enmienda para los suelos.
Ceniza	Constituyentes totales de los productos inorgánicos, en los distintos productos desde la caña, hasta las mieles finales y el azúcar.
Clarificación	Proceso de sedimentación del jugo alcalizado y caliente que separa el jugo claro o clarificado de los sedimentos llamados lodos o cachaza.
Color	Determinación espectrofotométrica del color utilizando el método ICUMSA 4.
<i>Core Sample</i>	Muestreo que se le realiza a la caña de azúcar con una sonda mecánica oblicua para determinar sus características de calidad como contenido de sacarosa, fibra y nivel de impurezas.

Dextrana	Polisacárido soluble en el jugo frío, producto de la degradación de la sacarosa y de la polimerización de la dextrosa por medio de la enzima dextranosacarasa. Produce alta viscosidad, interfiriendo con la formación de cristales (cristales de aguja o alargados) y la purga en las centrifugas, reduciendo la calidad del azúcar y el agotamiento de las mieles.
Extracción de pol	Pol extraído por el tandem de molinos como porcentaje de pol en la caña.
Extracción diluida	Jugo mezclado extraído por porcentaje de caña.
Extracción normal o absoluta	Jugo normal o absoluto extraído por porcentaje de caña.
Extracción reducida a 12.5 fibra	Extracción de pol si la fibra fuese de 12.5
Fructosa	Cetosa levógira o levulosa, al igual que la glucosa tiene la formula $C_6 H_{12} O_6$, siendo isómeros.
Glucosa	Aldosa dextrógira o dextrosa, al igual que la fructosa tiene la formula $C_6 H_{12} O_6$, siendo isómeros.
Guarapo	Jugo de caña extraído por el molino 1 del tandem.

ICUMSA 4	Método de análisis para determinar el color del azúcar.
Imbibición	Proceso de aplicar agua caliente al bagazo que sale del penúltimo molino del tandem, para utilizar el jugo de dicho molino y aplicarlo al bagazo del molino anterior, hasta llegar al segundo molino. El jugo del primero y segundo molino llamado mixto, mezclado o diluido se bombea para el proceso. También a la imbibición con jugo entre molinos, se le llama erróneamente maceración.
Jarabe	Mieles en la refinería. Jarabe A, B ,C y D.
Jugo absoluto	Caña – fibra (jugo que viene en la caña).
Jugo alcalizado	Jugo mezclado, ligado generalmente con el filtrado, al que se le añade cal (lechada o sacarato).
Jugo clarificado o defecado	Jugo limpio caliente, procedente del proceso de clarificación y que será procesado en los evaporadores.

Jugo filtrado	Es el jugo resultante del lavado de la cachaza (extraída del proceso de clarificación) en los filtros rotativos al vacío, generalmente este jugo es retornado al proceso de clarificación.
Jugo mixto, mezclado o diluido	Es el jugo que va al proceso, generalmente del primer y segundo molino.
Jugo normal	Jugo mixto – Agua de dilución
Jugo primario	Es el jugo de caña que se extrae de la masa cañera del primer molino.
Jugo residual	Es el jugo extraído por la masa bagacera del último molino.
Magma	Es el residuo que queda después de exprimir el jugo de la caña de azúcar.
Meladura o sirope	Jugo clarificado concentrado en los evaporadores a un brix de 58 a 64 aproximadamente. La meladura se bombea a los tachos donde es cristalizada.
Miel	Licor madre, separado por centrifugación de la masa cocida. Puede ser miel A o de primera, B o de segunda y final o de tercera, dependiendo de la masa cocida de la cual proviene.

Mieles invertidas	Miel o sirope procedente de la meladura invertida que se lleva a 85 brix con pureza de 10 a 20 %. Se utiliza en la industria del alcohol y otros.
Miel virgen	Meladura concentrada a 75 brix, usada en las destilerías.
PCC	Es un método para calcular el potencial total de azúcar en la caña puesta en el campo.
Polarímetro	Instrumento óptico para medir la rotación de la luz polarizada a través de una solución azucarada. Este aparato mide el pol que es la resultante del poder rotativo específico de todos los productos azucarados en la solución. Se le llama sacarímetro, pero no determina la sacarosa; a no ser que la solución sea de sacarosa pura.
Pol	Contenido aparente de sacarosa en el jugo, expresado como porcentaje.
Pureza	Es la razón porcentual entre la sacarosa y el brix.
Rendimiento base 96	Es el dato de rendimiento de azúcar (lb./TC) referenciado a una azúcar de 96% de pol, o sea de concentración de sacarosa.

Rendimiento envasado	Es el dato de rendimiento de azúcar referenciado a la concentración que sea, al envasado en sacos.
Recuperación total	Pol recuperada en fábrica, porcentaje de pol de entrada en la fábrica.
Sacarosa	Es el compuesto orgánico de mayor producción en forma pura. Tiene la fórmula molecular $C_{12}H_{22}O_{11}$. Cuando se hidroliza con ácido acuoso diluido, o por la acción de la enzima invertasa (de la levadura), se obtienen cantidades iguales de D-glucosa y D-fructosa. Esta hidrólisis va acompañada por un cambio en el signo de la rotación, de positivo a negativo.
Tacho	Es un evaporador de un solo efecto, en el cual se lleva a cabo el proceso de cristalización del azúcar.
Támden	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.
Torta de cachaza	Sedimento extraído generalmente por bombas o por gravedad, de las bandejas de los clarificadores, para ser procesado en los filtros. También indebidamente, se utiliza como sinónimo de torta de filtros.

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 modelo de diagnóstico comprende un análisis acerca de las principales variables o factores a controlar con sus causas, para que un ingenio o fábrica pueda extraer la más alta sacarosa de las cañas de azúcar recibidas.

Para dicho propósito se trata de demostrar el comportamiento de la sacarosa en el campo, durante la cosecha y en la fábrica, estudiando las causas y correspondientes puntos de control para detectar y reducir las pérdidas de sacarosa ocurrentes en estos tres procesos, buscando conseguir herramientas que apoyen las decisiones de selección de variedades, prácticas culturales de campo y programación de la cosecha. Así como también mejores métodos de procesamiento en la fábrica.

El trabajo muestra un caso real, el cual se basa en los resultados obtenidos durante dos períodos de zafra, correspondientes a las temporadas 2001-2002 y 2002-2003. Y hace un análisis comparativo de en cada etapa del proceso durante los dos períodos de zafra, para que se puedan observar las variaciones en el contenido de sacarosa, los tiempos de permanencia y las pérdidas ocasionadas durante todo el proceso principalmente.

OBJETIVOS

General

- Establecer un modelo de diagnóstico para la evaluación de la eficiencia en un proceso agroindustrial azucarero, en varios momentos puntuales dados durante la operación de zafra.

Específicos

1. Definir el modelo de diagnóstico de acuerdo a las buenas prácticas de manufactura y buenas prácticas agrícolas en general utilizadas en la agroindustria azucarera.
2. Definir los parámetros óptimos de operación de la agroindustria azucarera.
3. Desarrollar modelos de captura y tratamiento estadístico de datos que muestren las condiciones de trabajo de las diferentes operaciones agrícolas e industriales.
4. Formular sistemas de control que indiquen los resultados del análisis agroindustrial.

INTRODUCCIÓN

La industria azucarera es una de las principales fuentes de divisas para nuestro país; por lo cual es importante que cuente con parámetros de calidad establecidos para de que de esta manera pueda competir en iguales condiciones con otros países exportadores de azúcar a nivel mundial.

El presente trabajo presenta un modelo de diagnóstico para la evaluación de la eficiencia de un proceso agroindustrial azucarero, en el cual se toman en cuenta factores tales como el medio ambiente, la calidad de la caña de azúcar, la gestión de cosecha, etc. que son muy importantes para la determinación y posterior evaluación de los parámetros de la calidad con que cuenta en la actualidad el proceso.

El modelo de diagnóstico inicia con las evaluaciones de clima, siguiendo con las labores agrícolas, la siembra de la caña y finaliza con la evaluación de los parámetros de operación en molinos y la fábrica en general.

La evaluación del proceso se basa en las buenas prácticas de operación generalizadas en los diferentes ingenios, especialmente de Centro América y centros de investigación.

1. MARCO TEÓRICO. BASE DEL DIAGNÓSTICO

1.1 Agroindustria azucarera

1.1.1 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.

La agroindustria azucarera de Guatemala se ha ubicado como tercer exportador más importante de Latinoamérica después de Brasil y Cuba y dentro de los ocho exportadores mayores del mundo. Dentro de la economía del país la actividad azucarera representa un 3% del producto interno bruto (PIB), el 19.4% del valor de la producción agrícola, el 23% del total de las divisas generadas por los productos tradicionales ocupando un segundo lugar después del café.

La industria azucarera despegó en Guatemala a inicio 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. (10-3)

1.1.2 Medio ambiente

1.1.2.1 Lluvia

La lluvia acelera la descomposición de la caña y fomenta la aparición de hongos y bacterias que dificultan el tratamiento del jugo en la fábrica de azúcar. La precipitación pluvial varía desde los 956 hasta los 4591 mm anuales en Guatemala.

La caña de azúcar por la conformación de sus raíces no puede buscar el agua en las regiones profundas del suelo, necesariamente tiene que abastecerse del agua que existe en la capa superficial.

El agua no sólo es necesaria a la caña en su período de crecimiento, sino que debe mantener la humedad durante todo el desarrollo de la planta. Es menester que siempre esté disolviendo los diferentes elementos nutritivos, los que son transportados a las regiones más alejadas de los puntos de absorción. Al faltar agua inmediatamente se notará la detención de su desarrollo, los entrenudos también detienen su crecimiento obteniéndose una planta raquílica y pobre, originándose con ello un rendimiento pobre a la hora de la molienda por falta de jugo y exceso de material leñoso carente de sacarosa.

(2-16)

Si la humedad del suelo es elevada (plantas regadas cada dos días), se obtiene un aumento de la longitud del tallo y del número de flores, mientras que si la humedad del suelo es baja (plantas regadas después de la primera marchitez) se produce un aumento irregular en la longitud del tallo y especialmente en el número de flores, notándose que el aumento repentino siempre se produce dos días después del riego. (7-21)

1.1.2.2 Temperatura

En las plantas, todos los procesos fisiológicos elementales que no sean fotoquímicos dependen de la temperatura. Cada uno de ellos tiene un mínimo, un óptimo y un máximo, con un coeficiente de temperatura Q_{10} de 2 a 3, o sea, que la proporción del proceso se aumenta de 2 a 3 veces por cada aumento de temperatura de 10°C entre el mínimo y el óptimo. En la producción vegetal, la situación es complicada, porque cada proceso tiene su propia temperatura cardinal. (7-26)

La caña de azúcar es una planta tropical y se desarrolla mejor en lugares calientes y soleados. Cuando prevalecen temperaturas altas la caña de azúcar alcanza un gran crecimiento vegetativo y bajo estas condiciones la fotosíntesis se desplaza hacia la producción de carbohidratos de alto peso molecular, como celulosa y otras materias que constituyen el follaje y el soporte fibroso del tallo. Se tienen reportes que a bajas temperaturas todas las variedades de caña tienen una menor eficiencia y más baja proporción de desarrollo.

Pueden señalarse los índices de temperatura así

- Para germinación óptima 32 a 38°C
- Para el desarrollo y absorción de nutrientes 27°C
- Para desarrollo normal de la caña de azúcar 21 a 38°C
- Margen en que la caña retarda su desarrollo 10°C
- Margen en que la caña paraliza sus funciones, menos de 10°C
- Margen en que la caña se daña, menos de 2°C (2-35)

1.1.2.3 Luminosidad

Todo cultivador de caña debe preocuparse que su plantación produzca abundantes hojas en buenas condiciones con el objeto que la acción de la luz obre sobre la clorofila y fije en los tejidos de la planta el carbono para tener la mejor producción de azúcar.⁽²⁻⁴³⁾

La cantidad de energía solar disponible para sintetizar materia vegetal o cantidad de luz incidiendo en el cultivo durante toda su vida, depende de las condiciones climáticas, la latitud y del intervalo de tiempo del desarrollo del cultivo.

Son tres factores los críticos en la producción de caña de azúcar

- La intensidad de la luz que incide en el cultivo
- La intensidad de la luz acumulada
- La duración del ciclo de crecimiento

La magnitud de la superficie foliar es la que determina la cantidad de luz solar que el cultivo puede recibir. La capacidad fotosintética de la caña de azúcar es especialmente alta debido a que para atrapar el CO₂, usa la senda bioquímica especializada del carbono C₄, esto permite que la caña asimile mayores cantidades de CO₂ a tasas más altas que las de otras plantas con sendas C₃, para producir mayores cantidades de material por unidad de energía solar.

En condiciones de crecimiento activo, teórico y experimental, la caña de azúcar produce 1.7 gramos de biomasa por cada Mega Joule (MJ) de radiación solar interceptada. La luz juega un papel muy importante, como principal fuente de energía de la caña de azúcar en el almacenamiento de la sacarosa. A menor luminosidad, menor almacenamiento de azúcares.

1.1.2.4 Humedad relativa

La humedad relativa del aire influye en gran medida sobre el número de flores. Un cambio diurno de 50 al 90 por 100 y viceversa produce un número doble de flores cuando la humedad por la noche es de 90 en lugar del 50 por 100. Por tanto, la humedad relativa durante la noche debe ser elevada.

En casos entre 90 y 50 por 100 de humedad relativa, se obtienen mejores plantas tanto si la humedad del suelo varía desde muy seco al seco, como desde el húmedo al muy húmedo. Así mismo, cualquiera que sea el grado de humedad del suelo, el 90 por 100 de humedad relativa es siempre mejor que el 50 por 100. Este resultado se manifiesta por la longitud del tallo principal y por el incremento medio diario en la longitud del mismo. (7-29)

Para el cultivo de la caña de azúcar se recomienda una humedad promedio de 70 por 100. (12-52)

1.1.2.5 Velocidad del viento

Desde hace tiempo se ha reconocido que existe una relación aparente entre el crecimiento de la planta y la exposición al viento. Es de suponer que los efectos del viento están afectados por una serie de factores tales como temperatura, disponibilidad de agua en el suelo, humedad, insolación, etc.

Se ha demostrado que todas las especies de plantas no reaccionan en la misma forma a la exposición del viento y parece que pueden dividirse en tres grupos

- a) Exposición evasiva. Se trata de especies que por la forma de su crecimiento sólo tienen partes aéreas en la zona de aire tranquilo próxima a la superficie. Usualmente la forma de crecimiento parece estar determinada por la intensidad de la luz. El peso seco también muestra pequeña disminución con el aumento de la velocidad del viento.
- b) Exposición tolerante. Se trata de especies que, aunque muestran una disminución de altura con el aumento de la velocidad del viento, presentan una disminución mucho más pequeña de peso seco. Parece que esto se debe en parte a un aumento de la raíz a expensas del desarrollo del tallo.
- c) Exposición sensible. Son especies en las cuales no sólo la altura sino también el peso seco muestra una acentuada disminución con el aumento de la velocidad del viento. (7-116)

1.1.2.6 Características del suelo

La caña de azúcar se cultiva con éxito en la mayoría de suelos, éstos deben contener materia orgánica y presentar buen drenaje tanto externo como interno, y que su pH oscile entre 5.5 a 7.8 para su óptimo desarrollo.

1.1.3 Calidad de la caña

1.1.3.1 Semilla

Como regla general para el cultivo de caña, se recomiendan semillas (estacas) de variedades de caña que han dado buenos resultados bajo las condiciones climáticas y típicas del lugar.

Existe una variedad especial para cada forma de procesamiento. 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.

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, garantizando la pureza y fitosanidad varietal de acuerdo a las demandas del campo según los planes de renovación y siembras nuevas.

1.1.3.2 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 corresponde a una clave compuesta por letras y números. Las letras señalan el lugar de origen de la variedad y el número el año cuando fue producida y el número de cruza de la variedad.

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, lb 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.

A continuación se muestra una breve descripción de las principales variedades de caña de azúcar en la industria guatemalteca.

1.1.3.2.1 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. (1-35)

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. No tiene rajadura de crecimiento. 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.

Su vaina es de muy buen despaje pues desprende fácilmente. La longitud promedio de ésta es de 32 cm. y su pilosidad es poca y suave. (3-12)

1.1.3.2.2 Variedad CP721210

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 secano con texturas desde franco arcillosas a muy arcillosas con poca retención de agua, se expresa con tamaño pequeño o mediano (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.

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. Siempre florece en el rango de altitud de 0 a 550 msnm. (3-20)

1.1.3.2.3 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. (1-35)

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. (3-24)

1.1.3.2.4 Variedad Mex 68-P-23

Esta variedad ocupa el tercer lugar en área sembrada. Los datos indican que la tendencia de la variedad Mex68P23 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. (1-40)

Su tallo generalmente supera a la dimensión de grueso (31mm); 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. Posee muy buen amacollamiento, alcanzando hasta los 20 tallos molederos por metro lineal. 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. Tiene pocas rajaduras de crecimiento de ancho mediano y de profundidad intermedia, que generalmente no son causa de deterioro. Es de crecimiento erecto. 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.

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 68-P-23	16	84 - 87	10 – 12

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

1.1.3.3 Labores agrícolas

1.1.3.3.1 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. Luego 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. (10-8)

1.1.3.3.2 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. (3-9)

Existen ciertas modalidades de siembra como son cadena simple, y simple traslapada, cadena doble simple y doble traslapada. Se recomienda utilizar cadena simple traslapada, con el objeto de evitar las altas densidades poblacionales, reduciendo así la competencia por el agua y los nutrientes del suelo.

Se recomienda que la siembra se realice de norte a sur para lograr mayor captación de la luz solar. 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. (10-11)

La profundidad de siembra oscila entre 20 a 25 cm., con una distancia entre surco de 1.30 a 1.50 m. 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.

1.1.3.3 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. (5-14)

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. (10-14)

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, año 2001.** Pág. 16

1.1.3.3.4 Nutrimientos

Los nutrientes necesarios para el crecimiento, desarrollo y producción comercial de una planta son un grupo específico de elementos químicos que se pueden clasificar según la cantidad requerida

- a) Macronutrientes. Son los elementos que se absorben en grandes cantidades: nitrógeno (N), fósforo (P); en forma de fertilizante formulado se utiliza el compuesto P_2O_5 , potasio (K); en forma de fertilizante formulado se utiliza K_2O .

Comercialmente, los fertilizantes de elementos mayores o de macronutrientes se formulan bajo el siguiente orden: nitrógeno- fósforo (P_2O_5) – potasio (K_2O)

- b) Mesonutrientes. Son los elementos que se absorben en menor cantidad que los macronutrientes, y que por su disposición en el suelo, en la mayoría de los casos no presentan problemas de deficiencia, no perdiendo su importancia en el estudio de la fertilidad del suelo: azufre (S), calcio (Ca) y magnesio (Mg)
- c) Micronutrientes. Son los elementos que se absorben en cantidades menores, pero que desempeñan un papel importante e indispensable para el funcionamiento de muchos procesos bioquímicos dentro de las plantas, nutriendo también a muchos microorganismos benéficos del suelo. Los micronutrientes más importantes son: hierro (Fe), manganeso (Mn), cloro (Cl), zinc (Zn), boro (B) y molibdeno (Mo). (5)

1.1.3.3.5 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. (5-17)

1.1.4 Gestión de cosecha

1.1.4.1 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; estos efectos se inician desde que se quema y aumentan progresivamente a medida que transcurre el tiempo hasta que se muele.

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. (6-27)

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. (4-6)

1.1.4.1.1 Deterioro en la caña ocasionado por quemas

En una quema, ocurre inicialmente la destrucción de las barreras físicas de protección con que cuenta la planta: capa cerosa y pared celular, lo que permite el escape de los jugos, es decir, exudación, en donde se forman gotitas de miel o cristales en los tallos, que con el manejo del alce adhieren tierra y basura, o lo que se llama fibra mineral, dañina para los molinos.

Las altas temperaturas (120 - 400°C en la base de la planta, 400 - 900°C en la parte media y más de 1000°C en la parte alta), provocan un daño fisiológico que como consecuencia trae la degradación de la sacarosa, principalmente por hidrólisis y la inversión a otros azúcares no cristalizables. (4-10)

1.1.4.1.2 Quema programada

Tiene como objetivo disminuir el tiempo de quema y entrega, sistematizar la recepción por hora y hacer más eficientes las actividades de corte, alce y transporte. Cuando la caña es quemada, se debe de transportar al patio de fábrica en un tiempo menor de 12 horas, o bien entre 24 a 36 horas para evitar las pérdidas ocasionadas por inversión de sacarosa; si la caña es transportada después de 36 horas de haber sido quemada, la eficiencia en la recuperación de azúcar será mínima.

Las diferentes formas de quema programada son

- a) Quemadas calientes. Cuando los campos no son brechados de acuerdo con la cuota diaria y son quemados al medio día o por la tarde, las temperaturas a las que son sometidos los tallos son elevadas.

La descomposición de la sacarosa y consecuente formación de dextranas será más favorecida por este tipo de quemadas. Además, las quemadas violentas arrojan mayor cantidad de partículas sólidas al aire.

- b) Quemadas frías. Son las que se realizan en las horas frescas en el ámbito comprendido entre las 8:00 de la noche y las 6:00 de la mañana, por lo cual la caña no se quema violentamente y es menor el tiempo que tiene que esperar para ser cortada y entregada. Este tipo de quema disminuye las pérdidas.
- c) Doble quema. Se logra quemando la mitad del área a rozar en horas frescas (quema fría) y el resto entre las 8:00 y 10:00 de la mañana del día de roce. Esta asegura menos tiempo entre quema y entrega al ingenio, lo que garantiza menor pérdida de azúcar. (4-16)

1.1.4.1.3 Formas de quema

Realizar la quema es un trabajo de mucho cuidado, que debe estar bajo la responsabilidad y/o supervisión de personal capacitado porque si se comete un error o descuido, el fuego podría extenderse y afectar a las plantaciones o áreas vecinas.

Al realizar la quema es recomendable establecer un horario para la misma, siendo más adecuado realizarla por la madrugada, debido a que la temperatura es más fresca y por ende se evita quemar la caña de azúcar a temperaturas violentas que le provocan pérdidas de sacarosa.

Es aceptable también quemar la caña de 5 de la tarde a 10 de la noche mas no al medio día, para evitar la descomposición de la sacarosa como consecuencia de las altas temperaturas.

Tabla III. Ventajas y desventajas de las formas de quema.

FORMA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Tradicional	Menor esfuerzo físico por parte del rozador. Menor costo de brachado.	Mayor número de horas de quema. Menor flexividad en caso de quemas no programadas. Abastecimiento irregular en el ingenio en horas de la mañana.
Doble quema	Menos de 24 horas entre corte y entrega. Mayor calidad de materia prima. Suministro de materia prima en horas críticas.	Trabajo adicional del caporal. Mayor esfuerzo físico por parte del rozador. Cambio en la cultura del roce.

Fuente: Revista **Compañía Azucarera Salvadoreña S.A. de C.V. C.A.S.S.A.** Pág. 19

1.1.4.2 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 elevar de 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 barata que necesita fuentes de trabajo no calificada. 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%. Estos porcentajes corresponden también a los daños que sufre la caña cuando es cortada.

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. La pérdida de agua crea un aparente aumento en el contenido de azúcar.

1.1.4.3 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. (10-15)

1.1.4.4 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 10^3 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.

1.1.5 Recepción de la caña en el ingenio

1.1.5.1 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.

La efectividad del lavado en una mesa a 45° se comprende mejor si se menciona que la ceniza en el bagazo se reduce del 27 al 49%. Esto significa que el aumento de la energía en el bagazo es de un 3 a un 4.6%. Además, el lavado ahorra de 6 a 8 libras de azúcar por TC.

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.

1.1.6 Balance de materiales en la molienda y sus parámetros

El primer paso en el proceso fabril 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.

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 cristizable, 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. Este proceso llamado imbibición (o menos frecuente, maceración o saturación) tiene muchas variantes. 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.

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 por bagazo que sale del último molino no deberá sobrepasar entonces el 3%, manteniéndose en valores menores a 1%.

Dentro y alrededor de los molinos tienen lugar pérdidas considerables de azúcar. Estas pérdidas son indeterminadas, de hecho no se registran, ya que el control de azúcar que entra en la fábrica empieza en los tanques de pesaje después de que el jugo ha salido de los molinos. Pero, a pesar de que no son registradas las pérdidas indeterminadas, se recomiendan valores menores a 0.2% y que no sobrepasen valores de 1.1%

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.

Tanto las pérdidas indeterminadas como las pérdidas por inversión química son cuantificadas como pérdidas totales, las cuales no pueden sobrepasar valores de 3% y su rango se debe mantener por debajo del 1.7%.

Entre los parámetros que se manejan en la molienda se encuentran los siguientes

a) Especificaciones jugo diluido

- Brix > 14.5
- Pol > 12.7
- Pureza > 87 %

b) Especificaciones bagazo

- Pol < 2.0
- Humedad: 49 – 51 %

c) Parámetros operativos

- Tasa de molienda (velocidad/hora efectiva)
- Imbibición galones/min. 27 % (de 100 toneladas de caña, 27 son agua)
- Temperatura: 60°C H₂O a la entrada para no descomponer la sacarosa y de esta manera exista la lixiviación.
- Tiempo perdido (producción * tiempo total)
- Insumos utilizados
- Bacterias: 11 ppm

d) Laboratorio

- Cada 30 minutos realizar un análisis de brix, pol, pureza, reductores, dextrana, sólidos insolubles y corrida de tandem (para observar la eficiencia de los molinos).

Figura 1. Molinos de caña de azúcar



1.1.7 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. El pH óptimo al que se debe llevar el jugo mediante la alcalinización depende de muchas condiciones y varía según la localización de la fábrica, la variedad y la madurez de la caña, la capacidad del equipo de decantación y otras condiciones locales.

Para la clarificación se utiliza lechada de cal, ± 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.

Así mismo, debe evitarse alcalinizar el jugo mixto a un pH de 8.5 o mayor. Entre las desventajas reconocidas de lo anterior se incluye la presencia de una cantidad excesiva de sales solubles de calcio, la descomposición de los azúcares reductores con el consecuente aumento de color y que nuevamente se pongan en solución algunos cuerpos nitrogenados.

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.

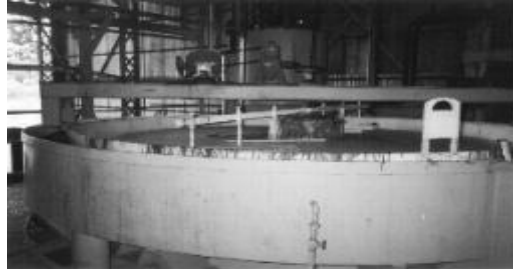
Todos los clarificadores están aislados a fin de conservar el calor y facilitar la sedimentación de las cachazas.

Al jugo en los clarificadores se le baja su velocidad puntual para permitir la decantación de los flóculos formados para así poder separar en forma continua el jugo claro y el material extraño se extrae del fondo del clarificador.

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.

Figura 2. Clarificador de jugo de caña de azúcar



1.1.8 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 los evaporadores de múltiple efecto para asegurar la 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, y a su vez se provee haciendo que la presión de vapor en el lado del líquido sea más baja que la presión de vapor en el lado del vapor.

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 (alrededor del 75% del material inicial), también hacer mínima la descomposición de sacarosa por altas temperaturas durante tiempos largos.

En este proceso 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, que debe mantenerse lo suficientemente bajo para mantener una buena velocidad de evaporación 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% (de 240 a 10 lb., o de 109 a 4.5 kg. de azúcar por hora) mediante la instalación de un separador centrífugo interno además de controles de presión absoluta y nivel.

El azúcar que es arrastrada llega al condensador, el cual mantiene una concentración de 5 ppm o menor, manteniéndose frecuentemente en 2 ppm de azúcar.

Figura 3. Evaporadores de múltiple efecto



1.1.9 Cristalización

La cristalización tiene lugar en 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. Los cristales y el jarabe forman una masa densa llamada masa cocida.

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 reprocessa.

La mayor pérdida de azúcar en la fábrica es la que se debe a las melazas residuales. Muchos factores del proceso, tales como carácter de los cristales, densidad de las masas cocidas finales, grado de enfriamiento en los cristalizadores y tratamiento posterior de las masas cocidas, afectan la pureza de las mieles finales.

La viscosidad también tiene una gran importancia en el agotamiento de las melazas, puesto que es uno de los factores que limitan la concentración de la masa cocida y la sobresaturación de las melazas.

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

La composición de la no sacarosa, como lo son los azúcares reductores y las cenizas de las mieles tiene gran influencia sobre el grado de agotamiento de éstas. Es bien sabido que, tanto el contenido de azúcares reductores como de cenizas influyen en la cantidad de azúcar que es posible extraer.

Figura 4. Tacho cristalizador



1.1.10 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.

Las mieles o melazas finales o residuales, un material denso y viscoso que contienen aproximadamente una tercera parte de sacarosa, una quinta parte de azúcares reductores y el resto ceniza, compuestos orgánicos no azúcares y agua, se desechan.

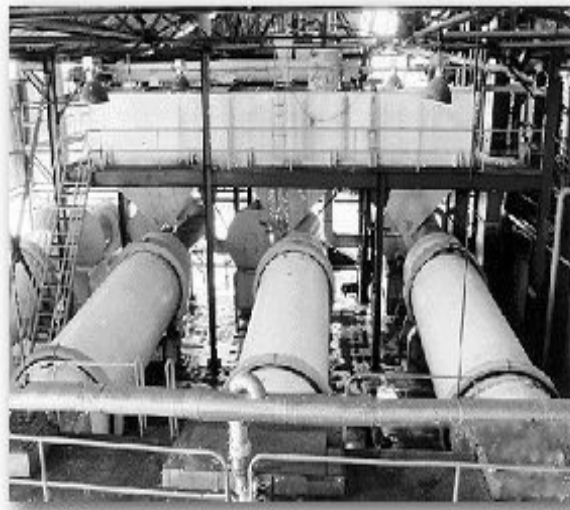
Figura 5. Máquina centrífuga



1.1.11 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%; y 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 atterronamiento, debido al carácter higroscópico del azúcar. (2-256)

Figura 7. Máquina secadora de azúcar



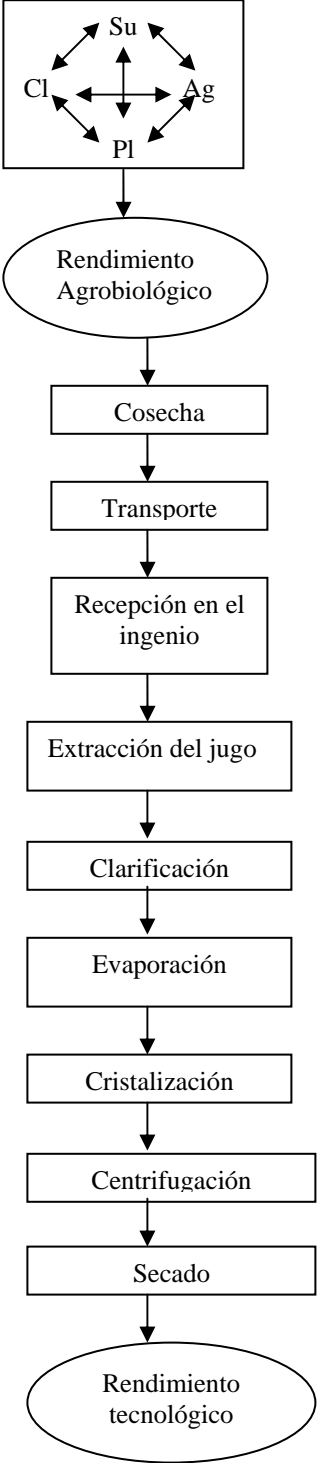
1.1.12 Eficiencia en la caña de azúcar

La eficiencia económica de las tecnologías aplicadas en la caña de azúcar depende de la participación del rendimiento de caña y del contenido comercial de sacarosa en la producción de una tonelada de azúcar por hectárea. Dos tecnologías que producen el mismo tonelaje de azúcar por hectárea pueden ser diferentes en eficiencia, ya que mientras una lo puede lograr por vía del tonelaje, la otra por el rendimiento. La que lo hace por la vía del tonelaje generalmente tiene más costos de corte, alce y transporte, de molienda y de fabricación.

Para obtener resultados de las eficiencias en el proceso azucarero, se toma en cuenta la recuperación de azúcar al final de la operación agroindustrial. En donde los resultados se reflejan en porcentajes de eficiencia de recuperación de sacarosa, prácticas de fabricación y retención de pol en la fabricación superior al 86% y el porcentaje de extracción de sacarosa a 12.5% de fibra, superior a 96%.

El rendimiento potencial de libras de azúcar por tonelada de caña debe sobrepasar de 340 lb/TC, valor que muestra una buena práctica de fabricación y buena eficiencia en la recuperación.

Figura 7. Diagrama de flujo del proceso agroindustrial azucarero



Su = Suelo

Cl = Clima

Pl = Planta

Ag = Agua

2. EL MODELO DE DIAGNÓSTICO

2.1 Antecedentes

El modelo de diagnóstico permite evaluar integralmente la calidad del proceso agroindustrial azucarero mediante el monitoreo de todas las etapas, iniciando con las condiciones climáticas, las labores agrícolas y finalizando con las prácticas fabriles o industriales las cuales darán como resultado un producto terminado.

Las condiciones climáticas abarcan el monitoreo de los diferentes parámetros que intervienen en el desarrollo de la caña de azúcar, tales como la precipitación pluvial, las horas luz, la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento.

Dentro de las labores agrícolas se enmarcan todas aquellas actividades que se realizan en el campo como lo son la siembra de la caña de azúcar, la fertilización, la aplicación de madurantes, el riego, etc.

Las labores agrícolas también se refieren a las prácticas culturales realizadas durante la cosecha de la caña de azúcar, dentro de las cuales la más importante es la quema.

El modelo de diagnóstico para el área agrícola finaliza con el muestreo de la caña antes de su corte, evaluando el potencial de sacarosa que posee, así como su grado de madurez.

Las labores fabriles se inician con la recepción de la caña en el ingenio en donde es muestreada para determinar sus características de calidad como contenido de sacarosa, contenido de fibra y nivel de impurezas presentes.

Luego de analizada la caña se conduce a las mesas de lavado para eliminar las impurezas y materia extraña, después a los molinos en donde se le extrae el jugo, el cual sufrirá una serie de cambios hasta convertirse en el azúcar deseado.

En cada etapa del proceso industrial se analizan distintos parámetros, siendo los principales el contenido de sacarosa o pol, los grados brix, la acidez y la pureza del jugo. También son analizados otros parámetros, aunque los mismos no se presentan durante todo el proceso, sino que en diferentes etapas.

Mediante el monitoreo de cada fase, tanto de las condiciones climatológicas del área agrícola como del área industrial, el modelo pretende encontrar los puntos críticos o de mejora del proceso, a fin de optimizar la calidad del producto terminado reduciendo de igual manera los costos de operación de la zafra.

2.2 Análisis del modelo

Tanto las actividades agrícolas como las industriales influyen de manera directa en la recuperación de azúcar al final del proceso; las primeras por ser en el campo en donde se produce la sacarosa, y las segundas porque es en la fábrica en donde es extraída y procesada la caña hasta obtener cristales de azúcar.

Evidentemente, es el contenido de sacarosa el factor que determina la cantidad de azúcar a obtener por unidad de caña.

La recuperación de la sacarosa depende básicamente de

- a) las condiciones agro-ecológicas y
- b) las condiciones de procesamiento de la fábrica.

2.2.1 Condiciones climatológicas

Tanto la composición química y física de la caña y de sus jugos varían considerablemente con las condiciones ambientales y de cultivo.

Durante la etapa de población de campo, la cual corresponde al desarrollo de la planta, se requiere de mayor cantidad de agua, alcanzando niveles de humedad mayores a 85%. Posteriormente, para la formación de tonelaje, cuando empieza la etapa de maduración, se requiere que la humedad se encuentre entre 78 y 80% esto con el fin de obtener mayores niveles de concentración de sacarosa en la planta. La última etapa del desarrollo de la caña es la de maduración, en la cual se requiere que la humedad del ambiente se encuentre entre 73 y 75% para obtener un nivel óptimo de maduración.

Entre las condiciones ambientales que limitan la maduración de la caña se encuentran la luminosidad, la precipitación pluvial y la temperatura.

La cantidad de energía solar disponible es uno de los principales parámetros para sintetizar la materia vegetal mediante el proceso de la fotosíntesis. Esta cantidad de luz queda determinada directamente por la magnitud de la superficie foliar de la planta. Y además, es una de las principales causas del almacenamiento de sacarosa en la caña.

La precipitación pluvial juega un papel importante en el cultivo de la caña de azúcar, pues cuando es elevada ayuda a la formación de tonelaje de la caña cuando ésta se encuentra en su primera etapa de desarrollo; pero al final del mismo, las excesivas lluvias perjudican de manera significativa la concentración de la sacarosa en los tallos.

Cuando ocurre el caso contrario, es decir, cuando se tiene una precipitación pluvial pobre, ocurre el riesgo de que se seque la caña o bien de que la formación de tonelaje y posterior concentración de sacarosa sea mínima.

Además, cabe señalar que la lluvia excesiva acelera la descomposición de la caña y fomenta la aparición de hongos y bacterias que dificultan el tratamiento del jugo en la fábrica.

La temperatura tiene participación similar a la luz solar, pues a menor temperatura ocurre menor formación de sacarosa y la planta no se desarrolla de manera adecuada, pero cuando la temperatura es muy elevada surge el problema del deterioro de la caña.

La velocidad del viento es otro factor determinante en el desarrollo de la caña de azúcar, pues la misma se ve afectada por vientos muy fuertes, pero de igual manera no se desarrolla adecuadamente con escasez del mismo.

Es importante señalar que, al no ser las condiciones climatológicas modificables para el cultivo de la caña de azúcar se hace necesario cambiar los sistemas de cultivo basándose en pronósticos climáticos confiables, o bien llevando un registro de los cambios climáticos para determinar el momento óptimo de siembra y cosecha.

La caña no madura igual todos los años porque éstos son climatológicamente distintos, con diferentes niveles de acumulación de radiación, precipitación pluvial y temperatura.

2.2.2 Gestión de cosecha

El objetivo fundamental de la cosecha es no perder sacarosa de la caña hasta su entrega a la fábrica para su recuperación.

La gestión de cosecha involucra todas aquellas actividades culturales, tales como la aplicación de madurantes a la planta, la programación de quema, el corte y transporte de la caña al ingenio.

Para la aplicación de madurantes a la caña se hace necesario crear un sistema de programación que indique la edad de la caña al aplicarle madurantes, el tipo y la cantidad de madurantes adicionados. A fin de no crear efectos negativos en la planta que perjudiquen su desarrollo, implicando una disminución en la concentración de sacarosa.

La quema de la caña de azúcar antes de ser cosechada es una práctica muy utilizada en el país, pero posee efectos negativos sobre la misma, como lo son la pérdida de peso por evaporación del agua y una baja en el contenido de azúcar por inversión de la sacarosa principalmente.

Estos efectos negativos de la quema aumentan progresivamente a medida que transcurre el tiempo hasta que se muele la caña. Por tal razón es importante que exista un programa de quema para evitar las pérdidas de sacarosa en la caña, ya que éste registraría el tipo de quema efectuado, el tiempo en que se realizó la quema de la caña y el tiempo de permanencia de la misma en el campo y en la fábrica después de haber sido quemada.

Los resultados obtenidos del programa de quema servirán para evaluar el grado de sostenibilidad de sacarosa que poseen las distintas variedades de caña y de esta manera elegir la variedad que presente menor pérdida de sacarosa, cuyo resultado sería un aumento en la productividad de azúcar en la fábrica.

Tanto en las prácticas de aplicación de madurantes como en la quema, lo que se pretende es sostener la cantidad de sacarosa en la caña, evitando posibles pérdidas por un desarrollo irregular de la planta o bien, por inversión de sacarosa.

Las pérdidas de sacarosa pueden ocurrir en cualquier parte de la gestión de cosecha, incluyendo el corte, alce y transporte de la caña, ya que si dichas actividades no se realizan de manera rápida después de la quema, el tiempo perdido entre quema y molienda se traducirá en reducción de la cantidad de sacarosa en la caña.

Los puntos de control que se deben tomar en cuenta en la cosecha son

- a) Seguimiento de maduración
- b) Materia extraña
- c) Tiempo de permanencia de la caña entre la quema, corte, alce y transporte
- d) Inventario de la caña en el campo
- e) Flujo de entrada de la caña
- f) Inventario de la caña en el patio de la fábrica

2.2.3 Prácticas de fabricación

La fábrica tiene el objetivo de extraer la mayor cantidad de sacarosa de la caña recibida minimizando las pérdidas para producir más azúcar.

En el lavado de mesas de caña, se puede determinar un punto de medición o control para las pérdidas potenciales de sacarosa; pues durante esta operación el agua que se utiliza para lavar la caña que proviene del campo no sólo arrastra la basura que pueda contener la misma, sino que también puede diluir pequeñas cantidades de sacarosa, las cuales se pueden contabilizar como partes por millón (ppm) de sacarosa.

En la operación de molienda debe establecerse el equilibrio adecuado entre las velocidades de molienda con la operación del área de producción y el área de calderas, a fin de optimizar la extracción de sacarosa con una eficiente recuperación en evaporadores, tachos y centrífugas, mediante el suministro de energía calorífica adecuada con temperaturas bien reguladas para el control de la inversión de la sacarosa, lo que permitirá obtener el mejor rendimiento de azúcar.

Así resultan como puntos de control la velocidad de molienda, el tiempo perdido durante el proceso de extracción, las pérdidas en miel final, las pérdidas en el bagazo y las pérdidas indeterminadas, es decir, las que no se pueden cuantificar en el proceso.

2.3 Cuestionario de evaluación

El modelo de diagnóstico finaliza con el desarrollo de un cuestionario de evaluación, el cual permite monitorear el proceso de zafra asignándole a cada etapa del mismo un valor que permitirá evaluar su productividad.

El cuestionario de evaluación se divide en varias secciones, dentro de las cuales se realizan una serie de preguntas. Al finalizar se suman los puntos acumulados de todas las preguntas y se obtiene un porcentaje correspondiente para todas las secciones.

Los porcentajes de todas las secciones de que consta el cuestionario son sumados y así se obtiene un valor que permite conocer la productividad del proceso azucarero que se está evaluando.

2.3.1 Bases del diseño

2.3.1.1 Bases teóricas

El diseño del cuestionario de evaluación se basa en los principales parámetros de procesamiento de la caña de azúcar, así como también por los resultados de operación obtenidos en zafas anteriores.

Al combinar estas dos fuentes de información resulta una base de datos teórica que ayuda a la realización de una serie de cuestionamientos acerca de todo el proceso azucarero y que permite además dividirlo en varias secciones.

Las secciones que abarca el cuestionario de evaluación son las siguientes

- Sección 1. Condiciones climatológicas. Tales como la precipitación pluvial, las horas luz, la temperatura, la velocidad del viento, la evaporación y la humedad relativa. Todos estos parámetros son importantes para el desarrollo adecuado de la caña de azúcar y ayudan a la formación de sacarosa en la caña.

- Sección 2. Gestión de cosecha. Evalúa las variedades y calidad de caña cultivada basándose en información bibliográfica que indica qué variedades poseen mayor potencial de azúcar. Además, en esta sección se toman en cuenta también las labores agrícolas descritas anteriormente, como lo son la aplicación de madurantes y nutrientes, el tipo de suelo, la edad de la caña al corte, la programación de quema y transporte de la caña al ingenio; todo ello a fin de maximizar la sostenibilidad de la sacarosa en la caña para su posterior extracción en la fábrica.
- Sección 3. Prácticas de fabricación. Se refiere a todas aquellas actividades que se realizan desde que la caña ingresa al ingenio y el tiempo en que tarda en llegar a éste. Se evalúan también cada una de las etapas del proceso de obtención de azúcar desde el lavado de la caña en las mesas hasta obtener el producto final, basándose este análisis en el tiempo perdido durante todo el proceso.
- Sección 4. Pérdidas de sacarosa. Contabiliza las posibles pérdidas de sacarosa durante todo el proceso azucarero, tanto en el campo como en la fábrica y las compara con los valores obtenidos en zafas anteriores para realizar un análisis comparativo y encontrar puntos de control que permitan minimizar dichas pérdidas.
- Sección 5. Eficiencias y recuperaciones. En esta sección básicamente se pretende evaluar la eficiencia de recuperación de sacarosa obtenida en la fábrica.
- Sección 6. Resultados generales de rendimiento. Se evalúan los rendimientos agrícolas y de fábrica obtenidos, así como también los rendimientos potenciales de azúcar y se comparan con los valores de zafas anteriores haciendo un análisis de la productividad del proceso actual.

2.3.1.2 Ponderación

A cada sección del cuestionario de evaluación se le asigna un valor de 0 a 10. De acuerdo a este rango se puede calificar la eficiencia del proceso como crítica, media o mayor. Para valores entre 0 y 4 el proceso se establece como crítico, lo cual indica que éste se está llevando a cabo en forma inadmisible en la calidad o seguridad de los productos. Cuando el proceso se evalúa como medio, es decir, de 5 a 6, se refiere a que la forma como se está realizando puede influir en forma seria en la calidad o seguridad del producto. Y si el proceso se califica como mayor, de 7 a 10, indica que se opera de forma satisfactoria con las necesidades del cliente, y que su realización no afecta la calidad del producto.

Al finalizar la evaluación de cada sección de que consta el cuestionario de evaluación se obtendrá una nota, la suma de todas las secciones arrojará un valor, el cual mostrará la situación del proceso agroindustrial azucarero como un porcentaje.

Así cada sección tendrá entonces asignado cierto porcentaje, siendo las de mayor porcentaje aquellas secciones que requieran un control más elevado pues es donde se pueden presentar elevadas pérdidas de sacarosa que afectan de manera directa la productividad de la fábrica.

Las secciones con bajos porcentajes representan las etapas en las cuales únicamente se pretende evaluar y comparar la productividad y los rendimientos totales del proceso actual con respecto a las obtenidas en zafras anteriores.

De esta manera, se tiene que los porcentajes asignados a cada sección son los siguientes

- Sección 1. Condiciones climatológicas 15.94 %
- Sección 2. Gestión de cosecha 34.78 %
- Sección 3. Condiciones de la fábrica 23.20 %
- Sección 4. Pérdidas de sacarosa 14.50 %
- Sección 5. Eficiencia y recuperaciones 5.79 %
- Sección 6. Resultados generales de rendimiento 5.79 %

Sumando todas las secciones un total del 100 %, indica que el proceso se está llevando a cabo en excelentes condiciones y que no necesita mejora alguna.

Para porcentajes obtenidos entre 96 y 100 % se evalúa al proceso como excelente, aunque para valores por debajo de 100 % es posible realizar todavía alguna mejora que permita óptimos resultados. Entre el 85 y 95 % se califica de muy bueno; de 84 a 65% de bueno; de 65 a 50 % de regular y para valores menores de 50 % el proceso se toma como malo, lo cual indica que existe más de un punto dentro del mismo que debe ser monitoreado o mejorado para obtener resultados satisfactorios.

2.3.1.3 Funcionalidad

La funcionalidad del cuestionario de evaluación se refiere al uso y utilidad que el mismo puede tener para evaluar el proceso de zafra y de esta manera encontrar los puntos críticos y posibles puntos de mejora.

Este cuestionario permite monitorear cada etapa del proceso agroindustrial azucarero dividiéndolo en distintas secciones a fin de observar los principales parámetros a ser evaluados, obteniendo resultados que posteriormente llevarán a formular un juicio con respecto a la manera en que se trabaja en un ingenio proporcionando así información para la mejora de las actividades agrícolas e industriales, además de presentar recomendaciones que ayuden a elevar la productividad de la fábrica.

2.3.1.4 Sistema de resultados y recomendaciones

Por medio de los datos obtenidos durante el proceso agroindustrial azucarero utilizando el cuestionario de evaluación se llega a los resultados que permitirán evaluar la productividad de dicho proceso.

La tabulación de los resultados se mostró anteriormente y, como se observa según sea la ponderación de cada una de las secciones, se tendrá entonces un porcentaje o resultado global, el cual enmarca la eficiencia y productividad de todo el proceso.

Para la obtención de los resultados de evaluación se requiere hacer una serie de análisis, como el de causa – efecto, en el cual se examina el proceso etapa por etapa encontrando los diferentes problemas que llevan al sistema a no ser óptimo.

Con estos datos se encuentran las causas que hacen fallar el proceso y ya con esta información se pueden evaluar los efectos que tienen dichos problemas sobre el mismo.

Básicamente, el análisis de causa – efecto permite dar a conocer las causas de un problema y los efectos que éstas proporcionan para un proceso determinado.

Similar al análisis de causa – efecto es el diagrama de Ishikawa, en el cual se presenta un problema en uno o varios puntos de un proceso, y este problema se desglosa en las posibles causas que lo provocan. Todos los resultados obtenidos por medio de este análisis servirán para la mejora del sistema.

Ya encontradas todas las causas que hacen al proceso ineficiente, se procede a emitir recomendaciones que ayudarán a la mejora de la operación de zafra.

Las recomendaciones formuladas pueden referirse tanto a las operaciones que se llevan a cabo en el área agrícola como a las del área industrial, y su objetivo primordial es sugerir modelos de mejora a seguir para aumentar el rendimiento del proceso agroindustrial azucarero.

2.3.2 Formato del cuestionario de evaluación

Diagnóstico agroindustrial azucarero				
Fecha	Ingenio o central Azucarera	Día de zafra	Núm. de evaluación	Pág. 1 de 9
Núm.	Sección Condiciones climatológicas	Valor total	Puntos ganados	Porcentaje de la prueba
1.1	¿Fue mayor la precipitación pluvial durante los primeros 4-5 meses de edad de la caña comparada con la del año anterior?	10		
1.2	¿Fue menor la precipitación pluvial durante los 4 ó 5 a 8 ó 9 meses de edad de la caña comparada con la del año anterior?	10		
1.3	¿Fue menor la precipitación pluvial durante los últimos 2 meses de edad de corte de la caña que el año anterior?	10		
1.4	¿Fueron mayores las horas luz de la zona durante los primeros 2 a 7 meses de edad de la caña comparadas con el año anterior?	10		
1.5	¿Fueron mayores las horas luz luego de los 7 meses de edad de la caña comparadas con el año anterior?	10		
1.6	¿Fue mayor la temperatura de la zona luego de los 7 meses de edad de la caña comparada con la del año anterior?	10		
1.7	¿Fue mayor la velocidad del viento de la zona luego de los 7 meses de edad de la caña comparada con la del año anterior?	10		
1.8	¿Fue mayor la evaporación de la zona luego de 7 meses de edad de la caña, comparada con el año anterior?	10		
1.9	¿Fue mayor la humedad relativa de la zona durante los primeros 4-5 meses de edad de la caña comparada al año anterior?	10		

Continuación del diagnóstico agroindustrial azucarero				Página 2 de 9
Núm.	Sección Condiciones Climatológicas	Valor total	Puntos ganados	Porcentaje de la prueba
1.10	¿Fue mayor la humedad relativa de la zona durante los 4 ó 5 a 8 ó 9 meses de edad de la caña, comparada con el año anterior?	10		
1.11	¿Fue menor la humedad relativa de la zona durante los últimos 2 meses de edad de corte de la caña comparada con el año anterior?	10		
	Total de la sección	110		
	Sección Gestión de cosecha			
2.1	¿Existen variedades de azúcar con alto potencial total de azúcar por tonelada de caña (lb./T.C o Kg./T.C)?	10		
2.2	¿Es alto el porcentaje de variedad de caña de más rendimiento existente?	10		
2.3	¿Existen variedades de caña correspondientes a tres tercios diferentes de zafra?	10		
2.4	¿Existe la variedad temprana en mayor porcentaje que las otras variedades?	10		
2.5	¿Presentan las diferentes plantaciones de caña una pureza varietal adecuada de la semilla?	10		
2.6	¿Presenta de manera general la calidad de la caña de los lotes de investigación agrícola mayores rendimientos comparados con la zafra anterior?	10		

Continuación del diagnóstico agroindustrial azucarero				Página 3 de 9
Núm.	Sección Gestión de cosecha	Valor total	Puntos Ganados	Porcentaje de la prueba
2.7	¿Presenta de manera sistemática la calidad de la caña de los lotes de investigación agrícola mayores rendimientos en los diferentes cortes evaluados desde su siembra inicial?	10		
2.8	¿Presenta el programa de aplicación de madurantes un valor o rango estandarizado adecuado con la edad de la caña?	10		
2.9	¿Presenta el programa de aplicación de madurantes un estándar en el producto y dosis adecuada de aplicación?	10		
2.10	¿Presenta el programa de cosecha de caña un valor o rango estandarizado adecuado en la edad de la caña a cortarse?	10		
2.11	¿Presentan los informes de rendimiento de caña precorte de laboratorio valores mayores a los de la zafra anterior?	10		
2.12	¿Es la edad de la caña en la actual temporada mayor que la anterior y adecuada?	10		
2.13	¿Es la edad de la caña en la actual temporada menor que la anterior y adecuada?	10		
2.14	¿Existe un adecuado estándar en la calidad de los suelos en la zona de cosecha de caña?	10		
2.15	¿Existe un adecuado manejo del riego, acorde a la edad de la caña y del tipo de suelo?	10		

Continuación del diagnóstico agroindustrial azucarero				Página 4 de 9
Núm.	Sección Gestión de cosecha	Valor total	Puntos ganados	Porcentaje de la prueba
2.16	¿Existe un horario adecuado para la quema de la caña?	10		
2.17	¿Es adecuado el tiempo entre quema y transporte al patio de caña?	10		
2.18	¿Es mínimo el valor del porcentaje de materia extraña en la caña cortada manualmente?	10		
2.19	¿Es mínimo el valor del porcentaje de materia extraña en la caña cortada mecánicamente?	10		
2.20	¿Es mínimo el valor del porcentaje de material machacado o aplastado en el corte mecanizado?	10		
2.21	¿Es menor el porcentaje de materia extraña en general, en la presente zafra comparada con la anterior?	10		
2.22	¿Es amplio el rango de años de edad de la caña (cortes) existente?	10		
2.23	¿Es el porcentaje mayor de caña a cosechar menor a 6 cortes?	10		
2.24	¿Es el porcentaje mayor de caña a cosechar con fibra menor al 12%?	10		
	Total de la sección	240		

Continuación del diagnóstico agroindustrial azucarero				Página 5 de 9
Núm.	Sección Prácticas de fabricación	Valor total	Puntos ganados	Porcentaje de la prueba
3.1	¿Es el tiempo entre patio de caña a molienda adecuado?	10		
3.2	¿Es lavada adecuadamente la caña antes de descargarse al patio del ingenio?	10		
3.3	¿Es lavada adecuadamente la caña en las mesas y conductores de descargar del ingenio?	10		
3.4	¿Es el índice de preparación de la caña superior a 91% (relación de brix)	10		
3.5	¿Es adecuado el valor de porcentaje de sólidos sedimentables del jugo en el primer molino?	10		
3.6	¿Es el porcentaje de imbibición de la caña adecuado?	10		
3.7	¿Es el porcentaje de extracción diluida adecuado?	10		
3.8	¿Existe correspondencia entre el porcentaje de imbibición más el jugo en caña con el porcentaje de extracción diluida?	15		
3.9	¿Es adecuado el valor del porcentaje por bagazo, saliendo del último molino?	10		
3.10	¿Es adecuada la diferencia de pureza entre el jugo del primer molino y la del último molino?	10		
3.11	¿Es adecuada la diferencia de pureza entre el jugo del primer molino y la del jugo clarificado?	10		

Continuación del diagnóstico agroindustrial azucarero				Página 6 de 9
Núm.	Sección Prácticas de fabricación	Valor total	Puntos ganados	Porcentaje de la prueba
3.12	¿Es menor el valor de galones de miel final por tonelada de caña en comparación con la zafra anterior?	10		
3.13	¿Es mayor el valor de porcentaje sacarosa recobrado - porcentaje caña, que el de la zafra anterior?	10		
3.14	¿Es el rendimiento industrial base 96 mayor que el de la zafra anterior?	10		
3.15	¿Es el tiempo perdido por falta de caña mayor que el de la zafra anterior?	10		
3.16	¿Es el tiempo perdido por paradas del ingenio mayor que el de la zafra anterior?	10		
	Total de la sección	160		
	Sección Pérdidas de sacarosa			
4.1	¿Es mínima la pérdida por inversión en molinos?	10		
4.2	¿Es adecuada la caída de pol en la caña total entre mesas/conductores y caña en el primer molino?	10		
4.3	¿Es la caída de brix en jugo de caña menor a 1.0 entre patio y molino?	10		
4.4	¿Es la caída de brix en jugo de caña menor a 0.5 entre mesas/conductores y el primer molino?	10		

Continuación del diagnóstico agroindustrial azucarero				Página 7 de 9
Núm.	Sección Pérdidas de sacarosa	Valor total	Puntos ganados	Porcentaje de la prueba
4.5	¿Es mínimo el valor de pérdidas totales de sacarosa por porcentaje de caña?	10		
4.6	¿Es menor el valor de pérdidas totales de sacarosa por porcentaje de caña comparado con el de la zafra anterior?	10		
4.7	¿Es menor el valor de pérdidas por miel final por porcentaje de caña comparadas con las de la zafra anterior?	10		
4.8	¿Es menor el valor de pérdidas por pol en cachaza por porcentaje de caña comparado con el de la zafra anterior?	10		
4.9	¿Es mínimo el valor de pérdidas indeterminadas por porcentaje de caña?	10		
4.10	¿Es menor el valor de pérdidas indeterminadas totales por porcentaje de caña comparadas con las de la zafra anterior?	10		
	Total de la sección	100		
	Sección Eficiencias y recuperaciones			
5.1	¿Es el porcentaje de extracción de sacarosa a 12.5% de fibra adecuado?	10		
5.2	¿Es el porcentaje de eficiencia de recuperación de la sacarosa adecuado?	10		
5.3	¿Es el porcentaje de eficiencia de fábrica (BHE) adecuado?	10		
5.4	¿Es el porcentaje de retención pol en la fabricación adecuado?	10		
	Total de la sección	40		

Continuación del diagnóstico agroindustrial azucarero				Página 8 de 9
Núm.	Sección Resultados generales de rendimiento	Valor total	Puntos ganados	Porcentaje de la prueba
6.1	¿Cuál es la diferencia de rendimiento agrícola en patio (lb/TC) comparado con la zafra anterior?	10		
6.2	¿Cuál es la diferencia del rendimiento industrial comparado con el de la zafra anterior?	10		
6.3	¿Cuál es la diferencia de rendimiento potencial total de azúcar comparado con la zafra anterior?	10		
6.4	¿Cuál es el rango de rendimiento potencial total de azúcar por tonelada de caña (lb./TC ó kg./TC)	10		
	Total de la sección	40		
	Resultado global	690		

Continuación del diagnóstico agroindustrial azucarero		Página 9 de 9
Informe de resultados		
Sección	Puntos ganados	Porcentaje de la prueba
Condiciones climatológicas		
Gestión de cosecha		
Prácticas de fabricación		
Pérdidas de sacarosa		
Eficiencias y recuperaciones		
Resultados generales de rendimiento		
		Resultado total
Observaciones		

Ponderación: 96 – 100% excelente, 95 – 85% muy bueno, 84 – 65% bueno, 64 – 50% regular, menor de 49% malo.

3. PRINCIPALES PARÁMETROS DE INFORMACIÓN PARA LA GENERACIÓN DEL MODELO DE DIAGNÓSTICO

3.1 Principales parámetros del área agrícola

Dentro del área agrícola quedan enmarcadas todas aquellas actividades de gestión de cosecha de la caña de azúcar. Dichas actividades influyen de manera significativa en la calidad de la caña, en especial lo que se refiere al rendimiento de azúcar (libras de azúcar/ tonelada de caña)

El contenido de sacarosa de la caña se ve influenciado directamente por los procesos de maduración, edad de la caña al corte, edad de la caña al aplicarle fertilizante, tipo de fertilización y suelo.

De esta manera, cada ingenio deberá tener un sistema de control de la caña en el campo, por finca y lote, que le permita monitorear la edad de la caña al realizar cada una de las actividades mencionadas anteriormente.

Dicho sistema puede presentar datos comparativos entre dos o más zafras, a fin de determinar los posibles puntos de mejora en cada actividad, y evaluar con base en resultados anteriores la mejor etapa para la realización de cada proceso.

A continuación se presenta un modelo de captura de datos que se puede utilizar para el planeamiento y control de la caña de azúcar en el campo

Figura 8. Planeamiento y control de la caña en el campo

Encargado:			Fecha:		AAF – 08	
Finca	Lote	Variedad de la caña	Zafra 1		Zafra 2	
			Edad de la caña al aplicarle fertilizante (meses)	Edad de la caña al corte (meses)	Edad de la caña al aplicarle fertilizante (meses)	Edad de la caña al corte (meses)

Con base en la información del formato anterior se pueden realizar los correspondientes gráficos comparativos que indican de manera visual y más sencilla los resultados obtenidos para esta etapa del área agrícola.

Los gráficos serán entonces

Figura 9. Modelo de la edad de la caña al aplicarle fertilizante

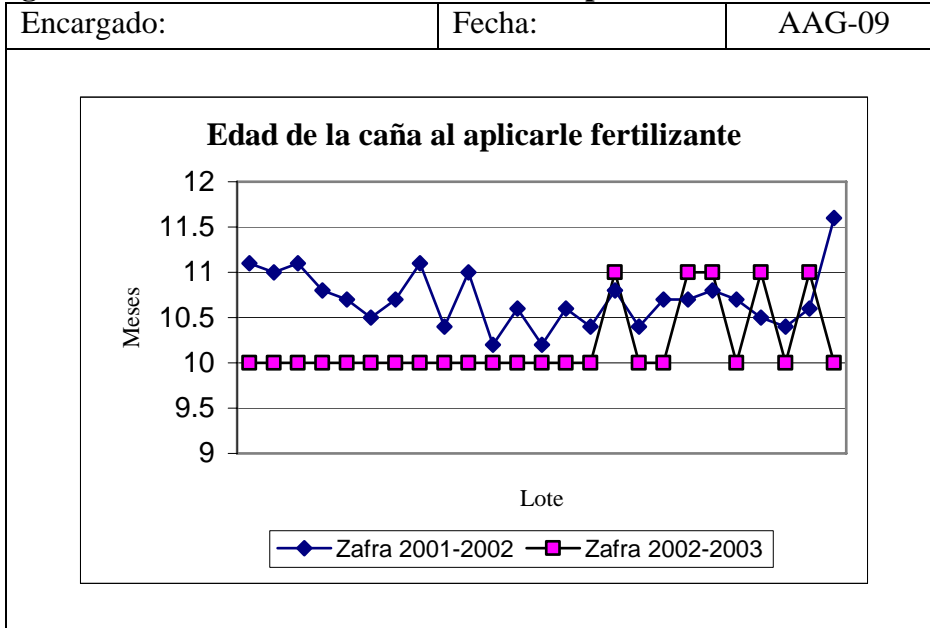
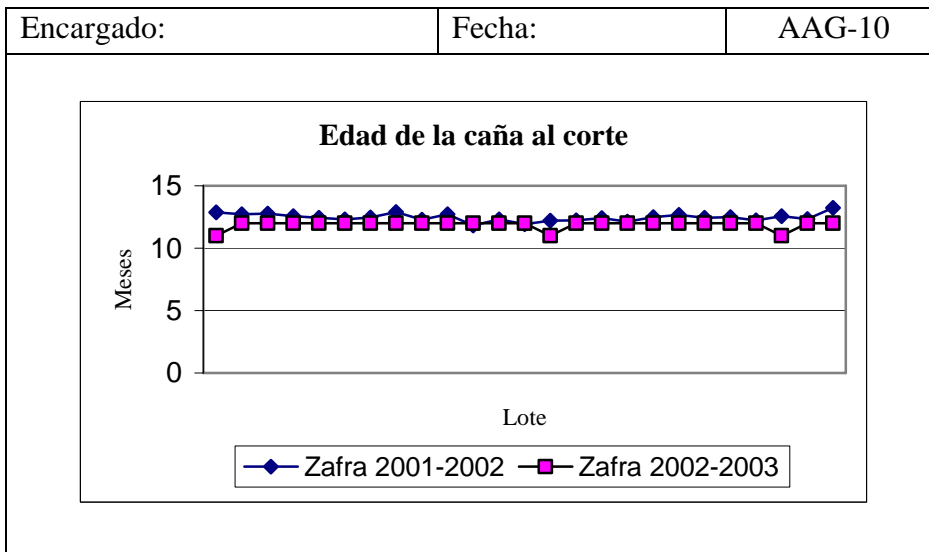


Figura 10. Modelo de la edad de la caña al corte



Las condiciones ambientales también afectan la maduración de la caña, en especial la humedad relativa, la temperatura, la velocidad del viento y la precipitación pluvial. De todas estas condiciones los factores que poseen mayor importancia para el desarrollo óptimo de la caña son la precipitación pluvial y la temperatura. Existe otro factor importante para el desarrollo y concentración de sacarosa en la caña, este es la luminosidad.

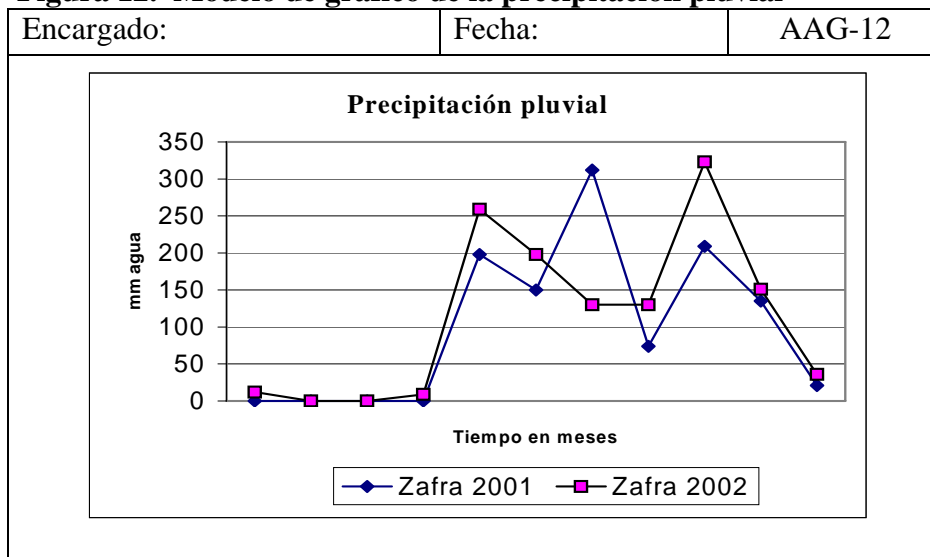
De estos factores se tomará en cuenta primero la precipitación pluvial, debido a que es un punto clave para el desarrollo de la caña de azúcar, pues ayuda a la maduración de la caña, lo que se traduce en acumulación de sacarosa en la misma; pero a la vez la excesiva precipitación pluvial puede traer problemas tales como la descomposición de la caña de azúcar o bien propiciar la aparición de hongos en la misma. Se puede emplear en este caso un sistema de captura de datos, como el que se muestra a continuación, que permita observar la cantidad de lluvia (en mm.) que ha caído durante el año y comparar dicho dato con datos de años anteriores para poder tener un estimado de la calidad de la caña de azúcar para la presente zafra.

Figura 11. Precipitación pluvial

Encargado:		Fecha:	AAF-11
Mes	Año		

Al igual que en el caso anterior, los resultados tabulados se pueden graficar como un comparativo entre dos zafras para observar de esta manera el comportamiento de la precipitación pluvial en dos temporadas de zafra

Figura 12. Modelo de gráfico de la precipitación pluvial



Como se mencionó anteriormente, la luminosidad es otro factor importante para el desarrollo de la caña de azúcar, ya que la producción de azúcar en la planta, proceso que se conoce con el nombre de asimilación, es consecuencia directa de la presencia de energía lumínica (luz solar), que mediante el proceso de fotosíntesis ayuda a la planta a obtener los elementos esenciales para la síntesis de la sacarosa.

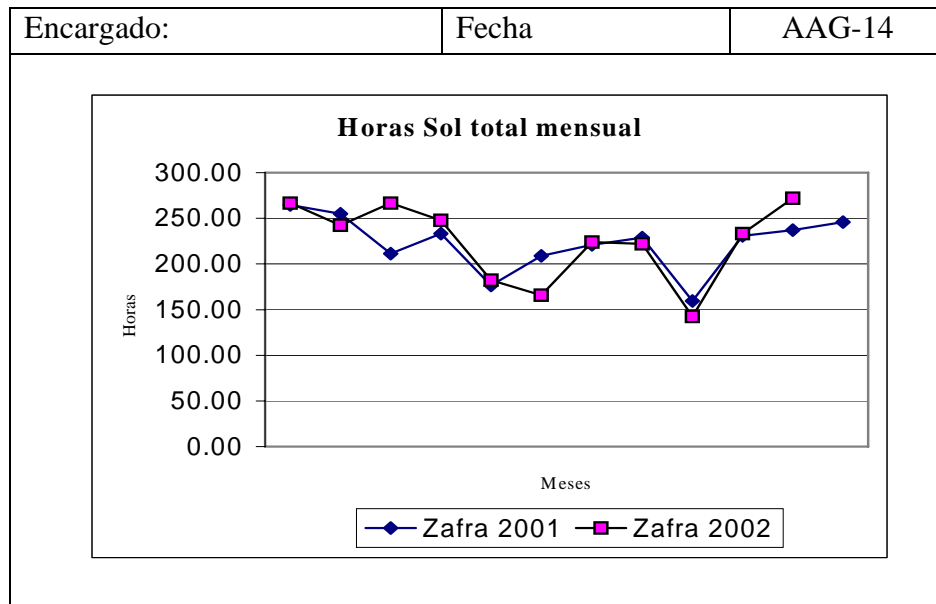
Es por esta razón que se hace necesario tener un sistema de contabilización de las horas sol totales que la planta recibe cada mes y compararlas con las de años anteriores a razón de estimar la cantidad de sacarosa que la planta ha podido producir durante el tiempo transcurrido.

Figura 13. Horas Sol total mensual

Encargado:		Fecha:	AAF-13
Mes	Año		

La contabilización de las horas sol total se puede representar de manera gráfica para observar claramente las variaciones existentes entre distintas zafras

Figura 14. Modelo de las horas Sol mensual



Como punto final del área agrícola se requiere también del monitoreo o control de la caña en la etapa de precorte, pues es en esta etapa donde se podrá evaluar la calidad de la caña antes de ser cortada, a la vez que se puede comparar con los rendimientos que la misma tuvo con respecto a la temporada de zafra anterior.

Uno de los análisis que requiere la caña antes de su corte es el pol, que es la lectura del aparato llamado polarímetro, el cual muestra el contenido aparente de sacarosa en el jugo y es expresado como un porcentaje.

Para los cálculos y mediciones en el área agrícola, se considera al pol como la cantidad de azúcar contabilizada de los análisis de las partes que constan la caña como sólidos solubles y los sólidos insolubles; básicamente lo que son el bagazo húmedo y el jugo.

Además, también se analizan los grados brix, que son una unidad de medida de los sólidos solubles en el jugo como la sacarosa, los azúcares reductores y otras impurezas disueltas.

Se toman en cuenta también la evaluación del potencial de la caña en el campo (PCC) es decir, la cantidad de azúcar que daría la caña en campo, la cual se expresa como un porcentaje y la pureza del jugo en el campo (Pza) es decir, la calidad del jugo que se lograría extraer de la caña, expresada como un porcentaje.

Los análisis realizados en esta etapa del proceso mostrarán el tiempo óptimo de maduración de la caña de azúcar, además de poder servir como un punto de comparación de la presente zafra con la o las zafras anteriores.

Dichos análisis se pueden resumir de la siguiente manera

Figura 15. Datos precorte

Encargado:			Fecha:		AAF-15	
Número de zafra						
Fecha	Brix Corregido	Pol corregido	Pureza del jugo	Jugo en la caña	Fibra en la caña	PCC

Figura 16. Comparativo precorte por quincena y finca

Encargado:		Fecha:		AAF - 16	
Número de zafra					
Finca	PCC Primera quincena de octubre	PCC Segunda quincena de octubre	PCC Primera quincena de noviembre	PCC Segunda quincena de noviembre	

Los gráficos que representan las condiciones de precorte para la caña de azúcar y las curvas de madurez de la misma se presentan para dos temporadas de zafra con base en los formatos anteriores

Figura 17. Modelo del precorte

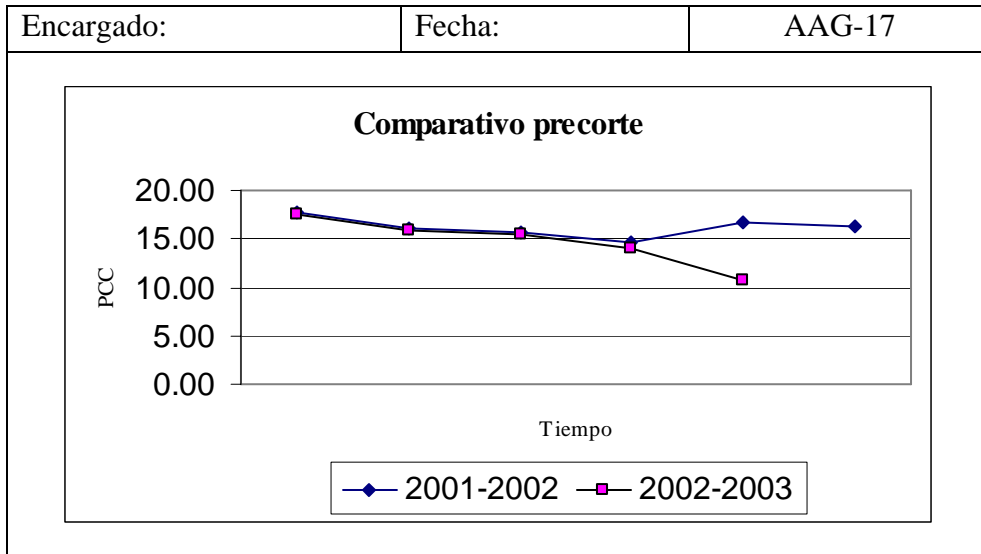
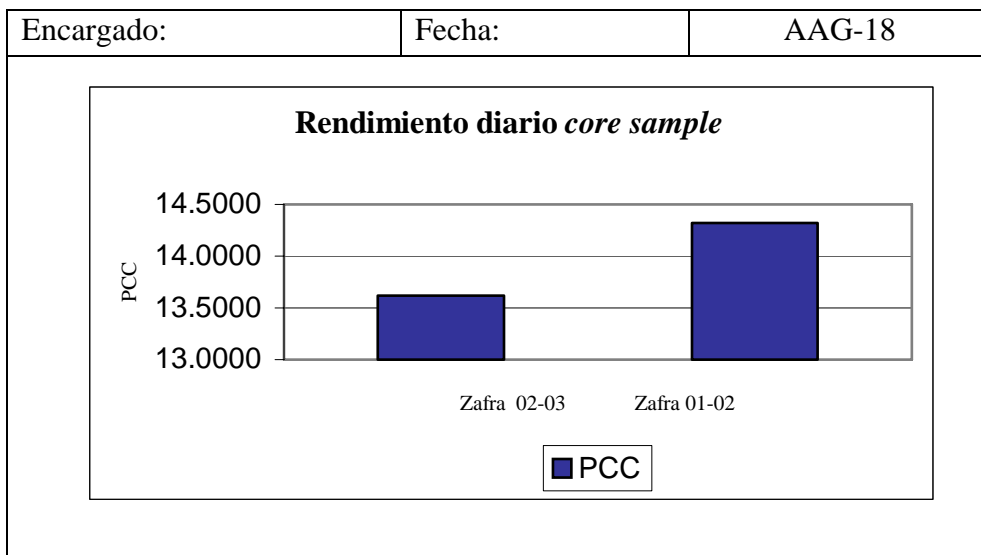


Figura 18. Modelo de la curva de madurez



El rendimiento teórico de la caña variará según la finca y el lote del cual provenga la misma, pues como se sabe existen diferentes variedades de caña de azúcar, las cuales se clasifican de manera general como de maduración temprana, intermedia o tardía y dependiendo del lugar de donde proceda la caña, así será la variedad de ésta.

Por lo cual, se hace necesaria la implementación de un sistema que permita recoger la información requerida acerca del lugar de donde proviene la caña (finca y lote), y que además muestre los valores obtenidos en la zafra anterior para poder comparar la calidad de la caña en la época actual.

Toda esta información será captada en un formato como el que sigue

Formato 19. Comparativo del rendimiento teórico de la caña recibida por zafra (lb. de azúcar/TC)

Encargado:			Fecha:	AIF-19
			Zafra 1	Zafra 2
Finca	Lote	Variedad	Rendimiento teórico	Rendimiento teórico

3.2 Principales parámetros del área industrial

El área industrial se refiere a todo el conjunto de actividades realizadas desde la recepción de la caña en el ingenio hasta la obtención del azúcar ya procesada.

Cuando la caña de azúcar llega del campo, ésta se lleva al laboratorio de caña, en donde se desfibra mediante una desfibradora a nivel de banco o a pequeña escala; esto con el fin de facilitar la extracción de jugo, posteriormente se pesa la muestra desfibrada para conocer el contenido de jugo y de fibra.

Luego el jugo se lleva al laboratorio químico en donde se determinan las características de calidad del mismo, el contenido de sacarosa, el contenido de fibra y el nivel de impurezas que posee.

Después de muestrear la caña, se lleva a las mesas de lavado en donde se le agrega agua para eliminar la tierra, hojas quemadas y basura que todavía pueda poseer la caña proveniente del campo.

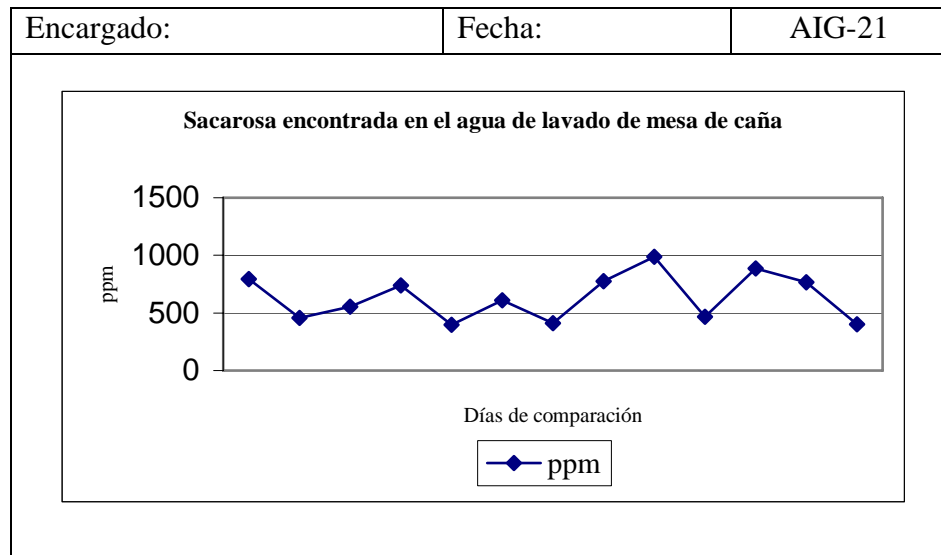
Es conveniente analizar el agua de lavado de la caña pues ésta puede arrastrar parte de la sacarosa que lleva la caña, para este fin se cuenta con el siguiente formato

Formato 20. Sacarosa encontrada en el agua de lavado de mesa de caña

Encargado:	Fecha:	AIF-20
	Zafra 1	Zafra
	Ppm	ppm

Dicho formato va acompañado de su respectiva gráfica, que representa la cantidad de azúcar en ppm que es arrastrada por el agua de lavado de las mesas de caña

Figura21. Sacarosa encontrada en el agua de lavado de mesa de caña



Luego de que la caña es preparada por las picadoras llega al tandem de molinos en donde se le extrae el jugo. Para mejorar la extracción de todo el jugo de la caña, generalmente a la torta de bagazo se le rocía agua al salir de cada unidad de molienda; esta agua que se rocía puede ser pobre en azúcar. Este proceso ayuda a la extracción del azúcar por lixiviación, y es llamado imbibición. Los datos obtenidos mediante la molienda se tabulan por cada día de zafra como se muestra

Figura 22. Datos de la molienda

Encargado:					Fecha:			AIF-22	
Día de zafra	Toneladas de caña molidas	Extracción diluida	Brix del jugo primario	Portentaje de bagazo en la caña	Portentaje de pol en el bagazo	Portentaje de pol en la cachaza	Porcentaje de imbibición en la caña	Brix <i>core sample</i>	PCC <i>core sample</i>
X									
X									
X									

Después de tabular los datos obtenidos en la molienda, se procede a graficar los principales parámetros, haciendo como siempre un análisis comparativo de distintas temporadas de zafra; de la siguiente manera

Figura 23. Modelo de la extracción diluida y porcentaje de imbibición aplicado en los molinos

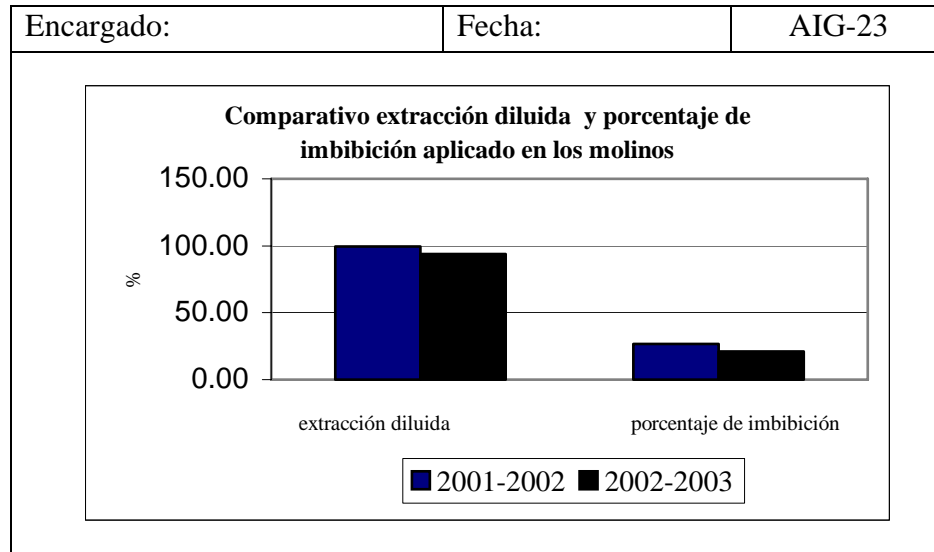
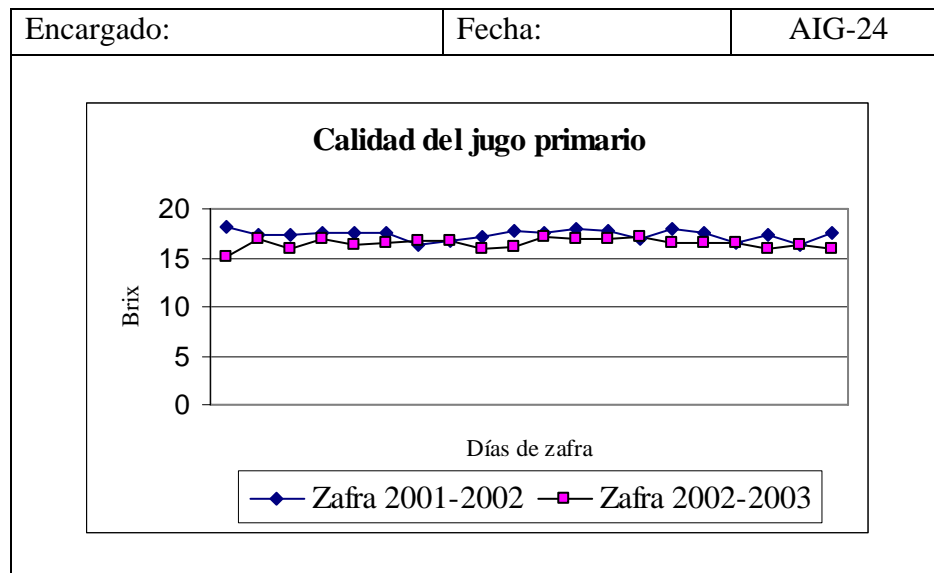
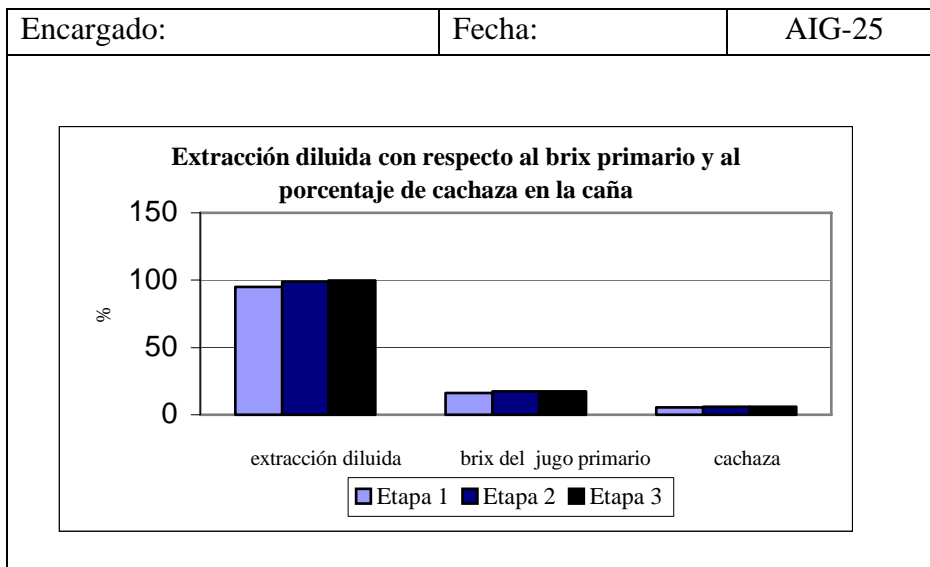


Figura 24. Modelo de la calidad del jugo primario



Los distintos parámetros obtenidos del proceso de la molienda se pueden graficar también de acuerdo a las características analizadas en tres diferentes etapas del proceso como se muestra a continuación

Figura 25. Modelo de la extracción diluida con respecto al brix primario y al porcentaje de cachaza en la caña



Otro factor que hay que tomar en cuenta para la obtención de datos que puedan ser utilizados como referencia al evaluar el proceso de extracción del jugo es la caída de brix del jugo *core sample* al jugo primario.

Como se mencionó con anterioridad, los grados brix son una medida de los sólidos solubles en el jugo y son un parámetro de suma importancia durante todo el proceso azucarero, ya que son los que contabilizan la cantidad de sacarosa.

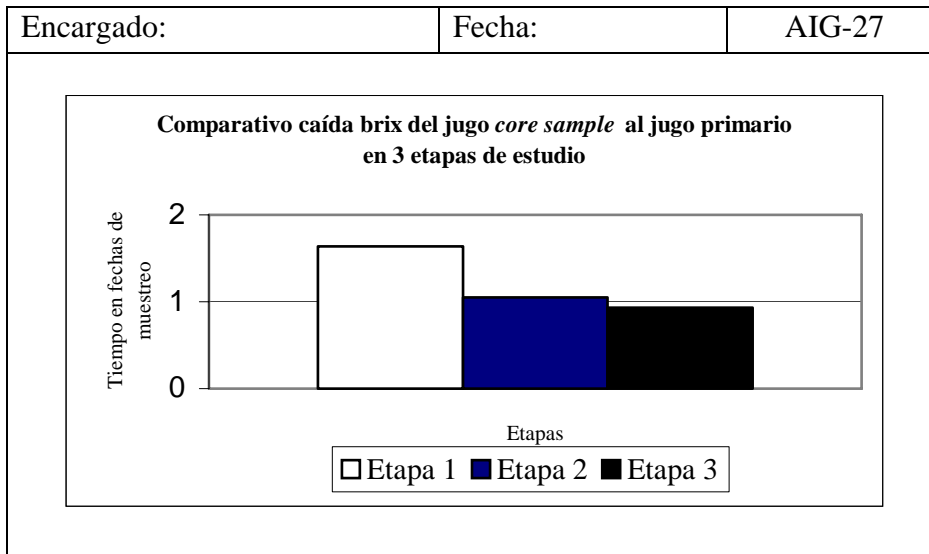
Se debe pues crear un modelo de captura de datos que indique la cantidad de grados brix presentes tanto en el jugo *core sample* como en el jugo primario y comparar dichos valores con los obtenidos en temporadas pasadas, de la siguiente manera:

Figura 26. Evaluación de la caída de brix del jugo *core sample* al jugo primario

Encargado:		Fecha:		AIF-26
Zafra 1		Zafra 2		
Brix	Brix	Brix	Brix	
<i>core sample</i>	jugo primario	<i>core sample</i>	jugo primario	

El formato presentado arriba debe ir acompañado con su respectivo gráfico que indique la variación de la caída de brix en las diferentes etapas de estudio, como se indica a continuación

Figura 27. Modelo de la caída de brix del jugo *core sample* al jugo primario



Es también importante determinar la cantidad de brix, pol y pureza en los jugos primario, diluido y clarificado; luego de determinar dichas cantidades, éstas deben ser tabuladas y comparadas con las obtenidas durante la zafra anterior a fin de detectar posibles puntos críticos y de mejora. La tabulación de datos se realiza por medio de la siguiente figura

Figura 28. Calidad de los jugos primario, diluido y clarificado

Encargado:		Fecha:		AIF-28
Jugo primario				
Tiempo	Brix	Pol	Pureza	
Quincena 1				
Quincena 2				
X				
Jugo diluido				
Quincena 1				
Quincena 2				
X				
Jugo clarificado				
Quincena 1				
Quincena 2				
X				

Para los cálculos y mediciones en el área industrial se define el pol como la cantidad de azúcar contabilizada contenida en el jugo mezclado y en el bagazo, después del tandem de molinos. Generalmente la cantidad de jugo es pesado y la cantidad de bagazo es calculado a través del agua de imbibición y el jugo.

Así, se contabilizan las toneladas de pol tanto en caña como en bagazo de la siguiente forma, mediante la captura de datos en las figuras 29, 30 y 31

Figura 29. Pol en caña

Encargado:		Fecha:		AIF-29
	Zafra 1	Zafra 2		
Toneladas de pol en el jugo				
Toneladas de pol en el bagazo				
Toneladas de pol total				
pol en la caña				
Rendimiento potencial				

Figura 30. Pol en la caña calculado en la fábrica

Encargado:		Fecha:	AIF-30
Zafra	Quincena 1	Quincena 2	X

Figura 31. Pol en el bagazo

Encargado:			Fecha:	AIF-31
Zafra	Toneladas de Jugo	Toneladas de agua	Toneladas de bagazo	Porcentaje de bagazo en la caña

Los datos obtenidos mediante la tabulación en los formatos anteriores servirán para graficar cada parámetro de la siguiente forma

Figura 32. Modelo de la calidad del jugo mezclado

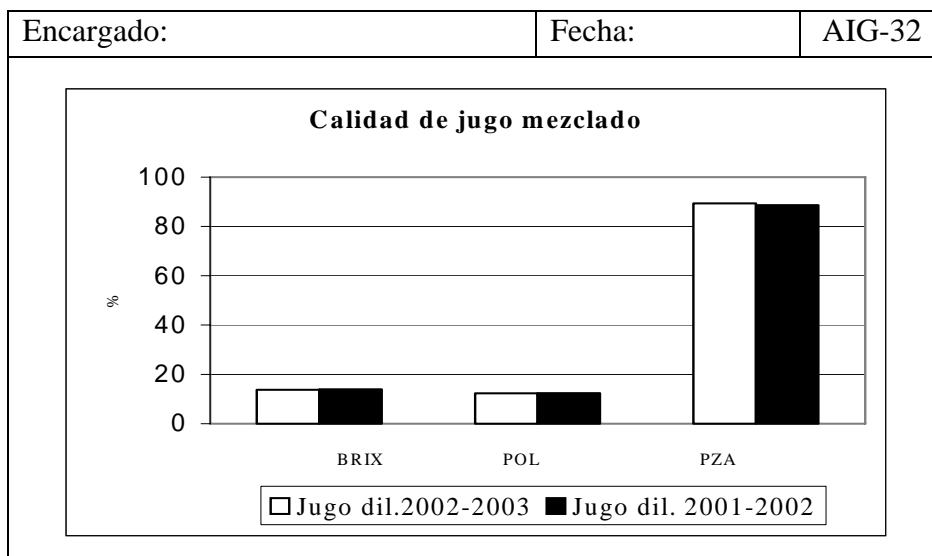
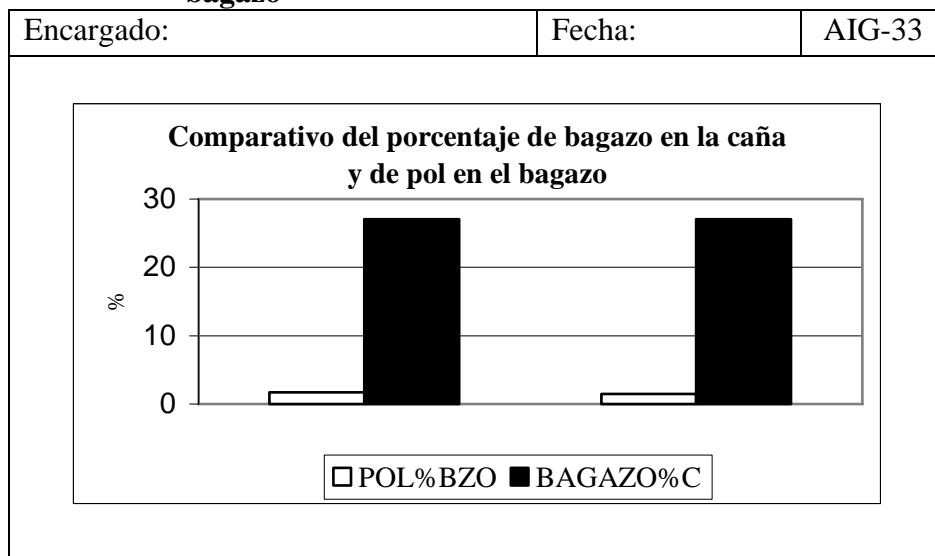


Figura 33. Modelo del porcentaje de bagazo en la caña y de pol en el bagazo



Las pérdidas en el bagazo se definen como las pérdidas de sacarosa existentes aún en el bagazo al momento de ser desechado, y se tabulan de la siguiente forma, teniendo siempre presente su respectiva comparación con las de la zafra anterior:

Figura 34. Pérdidas en el bagazo

Encargado:		Fecha:	AIF-34
Zafra	Quincena 1	Quincena 2	X

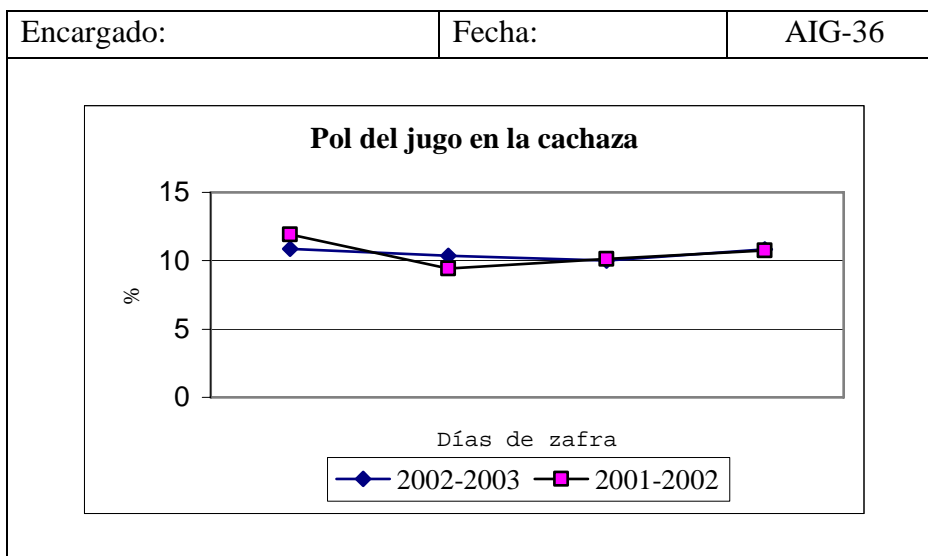
El balance del porcentaje de pol en la caña se refiere a la cantidad de sacarosa total existente en la caña y a las pérdidas de la sacarosa que ocurren durante todo el proceso azucarero, estos valores se tabulan de acuerdo a los días de zafra correspondientes

Figura 35. Balance del porcentaje de pol en la caña

Encargado:				Fecha:			AIF-35	
Día de zafra	Pérdida de miel	Pérdida de cachaza	Pérdidas indeterminadas	Pérdida de bagazo	Pérdidas totales	Recobrado	Total caña	Recuperación normal
X								

En la siguiente figura se muestra el comportamiento del pol del jugo en la cachaza en dos temporadas de zafra

Figura 36. Modelo del pol del jugo en la cachaza



Diariamente se debe de realizar un muestreo del peso del jugo, los grados brix, la cantidad de sacarosa presente en el jugo, como de su pureza y PCC para así poder detectar fluctuaciones muy notorias en cada parámetro, las cuales se puedan corregir a tiempo. Este muestreo se realiza en el figura 37, el cual a la vez compara dichos datos con los de la zafra anterior

Figura 37. Rendimiento diario de la caña

Encargado:			Fecha:		AIF-37
Zafra	Peso del Jugo	Brix	Sacarosa	Pureza	PCC

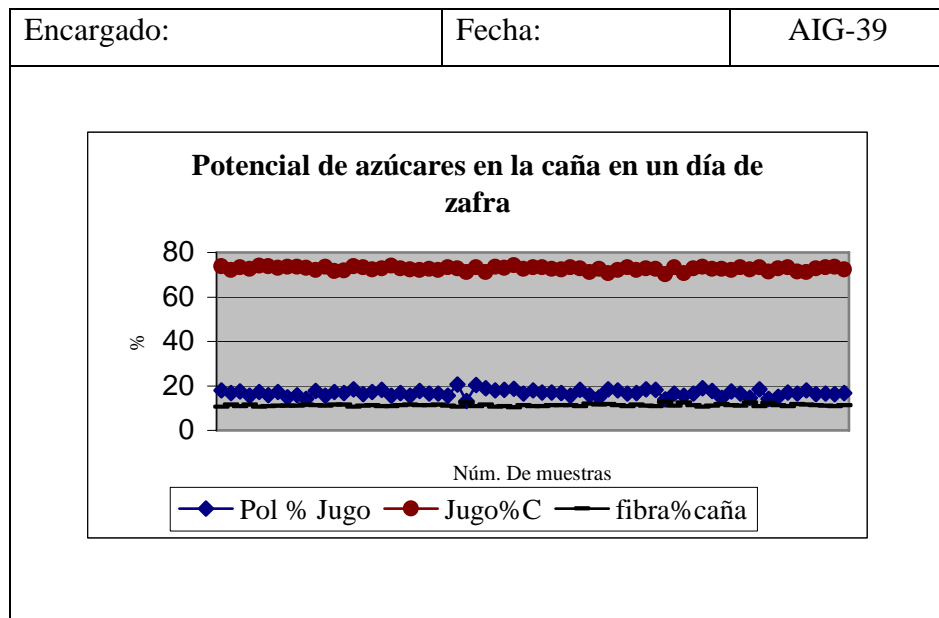
Para contabilizar el potencial real de azúcar en la caña diariamente se desarrolla la siguiente figura, el cual contiene toda la información necesaria para dicho objetivo y muestra las variaciones existentes en cada parámetro según transcurre el tiempo de zafra

Figura 38. Potencial real de azúcar en la caña

Encargado:				Fecha:				AIF-38	
Núm..	Porcentaje de pol en el jugo	Brix del jugo	Lectura de pol del jugo	Pureza del jugo	Porcentaje De jugo en la caña	Porcentaje de pol en el jugo de la caña	Porcentaje de bagazo en la caña	Porcentaje de fibra en la caña	Porcentaje de bagazo en la caña
X									

Los datos presentados anteriormente servirán para graficar el potencial de azúcar en un día de zafra y mostrar de manera ilustrativa las variaciones que se presentan

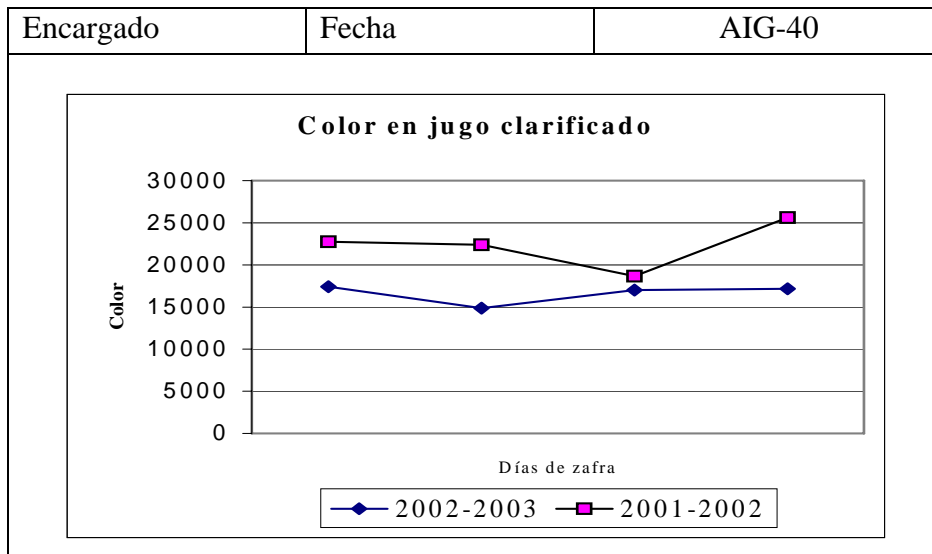
Figura 39. Principales parámetros que determinan el potencial de azúcar en la caña en un día de zafra



Después de la extracción del jugo de la caña, sigue el proceso de la clarificación del jugo, el cual se da por sedimentación y se logra a través de la adición de floculantes aniónicos. De esta manera, los sólidos no azúcares se precipitan en forma de lodo llamado cachaza y el jugo claro queda en la parte superior del tanque.

Mediante una gráfica se puede observar el color del jugo clarificado crudo según los días de zafra transcurridos y comparándolo con valores de la zafra anterior, el color del jugo clarificado se determina mediante espectrofotometría, utilizando el método ICUMSA 4

Figura 40. Modelo del color del jugo clarificado crudo



Los reductores primarios no son más que sólidos solubles en el jugo, los cuales se pueden medir; es importante determinar la cantidad de reductores primarios tanto en el jugo primario como en el jugo diluido, ya que éstos dan un estimado del porcentaje de los sólidos totales que están disueltos en el jugo.

Para dicho propósito es necesario graficar el porcentaje de reductores en el jugo y compararlos con datos obtenidos con anterioridad. Para representar lo antes expuesto se presentan las figuras 41 y 42

Figura 41. Modelo del porcentaje de reductores primarios

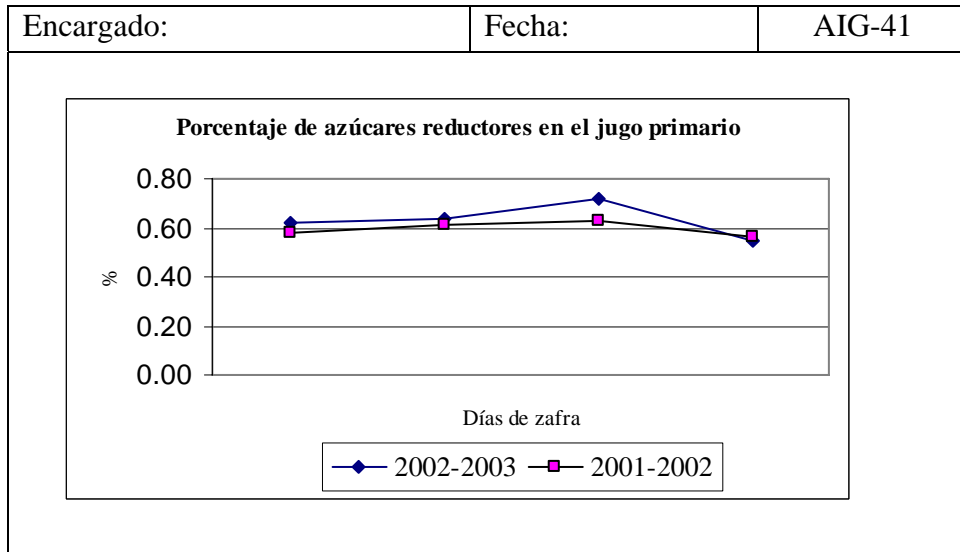
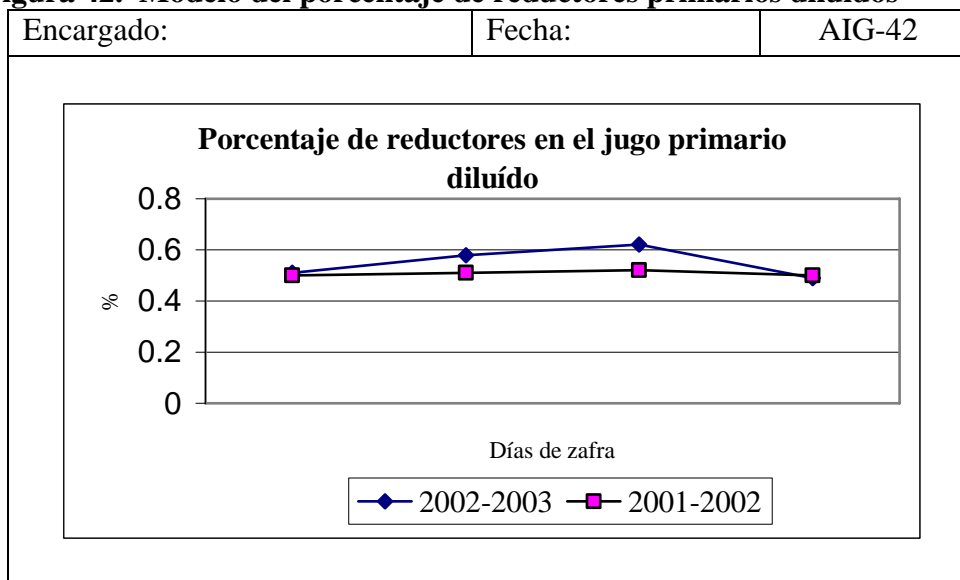


Figura 42. Modelo del porcentaje de reductores primarios diluidos

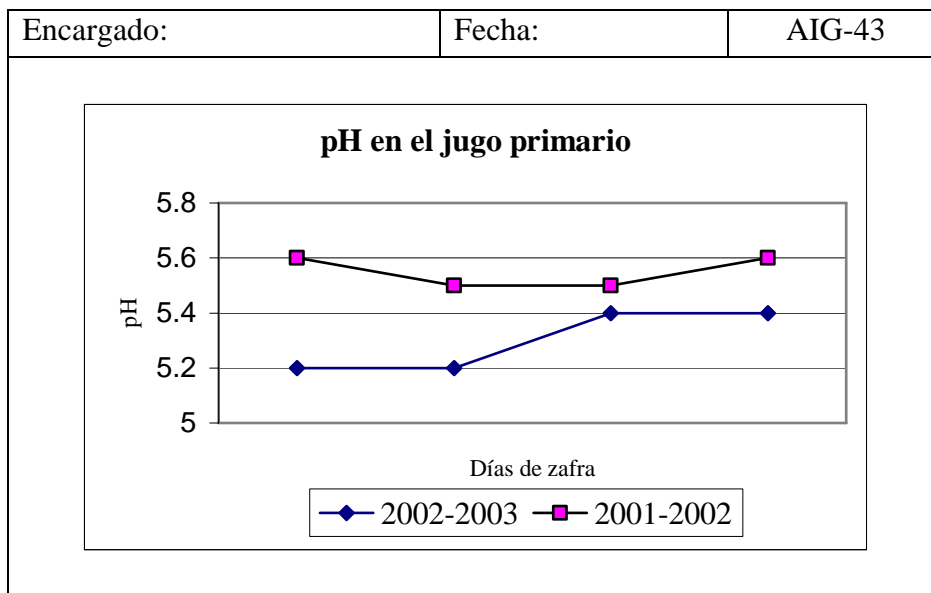


El grado de acidez del jugo o pH es otro factor que se debe de tomar en cuenta durante todo el proceso.

El valor del pH va variando durante todo el proceso, desde que el jugo es extraído de los molidos, en donde presenta una ligera acidez, luego en la alcalinización se logra estabilizar el pH hasta un valor cercano a 7, el cual se debe tratar de mantener.

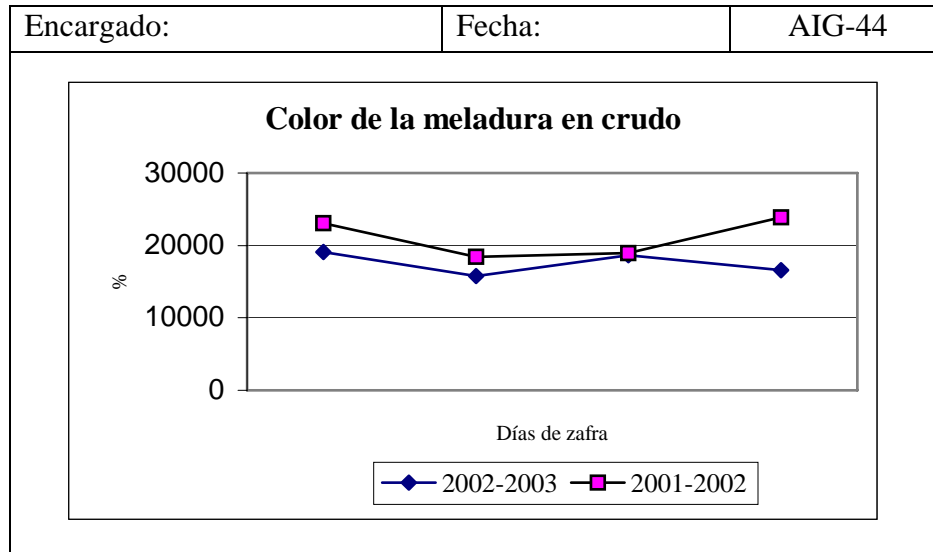
A continuación se presenta la figura 43, la cual muestra las variaciones del pH durante los primeros días de zafra y además muestra una comparación de este valor en dos temporadas de zafra distintas

Figura 43. Modelo del pH en el jugo primario



Uno de los parámetros del proceso de evaporación que se debe tomar en cuenta durante el proceso azucarero es el color de la meladura en crudo, el cual se muestra en la siguiente figura; dicho color se contabiliza de igual manera que el método utilizado para el color del jugo clarificado crudo, y se obtiene mediante la adición de un floculante que se utiliza para que precipiten los sólidos insolubles todavía contenidos en la meladura.

Figura 44. Modelo del color de la meladura en crudo



Tanto los sólidos sedimentables en el jugo primario como en el jugo diluido, así como también el porcentaje de ceniza contenido en el jugo son factores que se deben controlar debido a que contribuyen con las pérdidas de sacarosa.

Normalmente se contabilizan estos sólidos como un porcentaje y se representan mediante un comparativo de dos zafras distintas para evaluar la cantidad de éstos presentes en cada una. Las figuras 45, 46 y 47 muestran la representación gráfica para dicho propósito.

Figura 45. Modelo de los sólidos sedimentables en el jugo primario

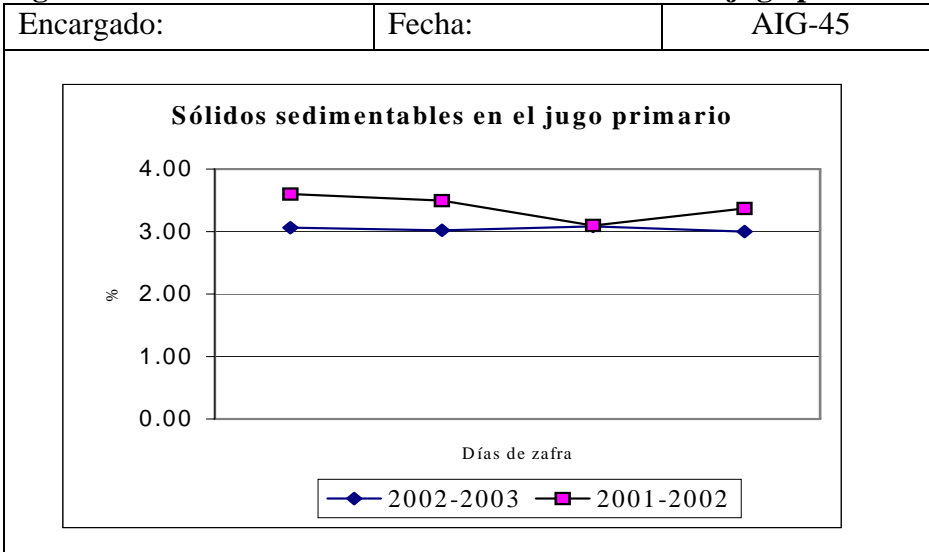


Figura 46. Modelo de los sólidos sedimentables en porcentaje de volumen en el jugo mezclado

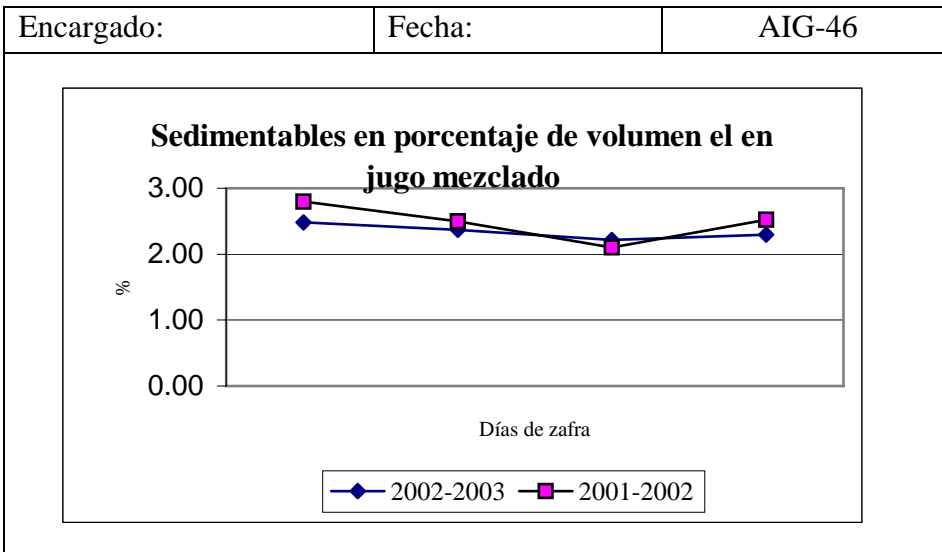
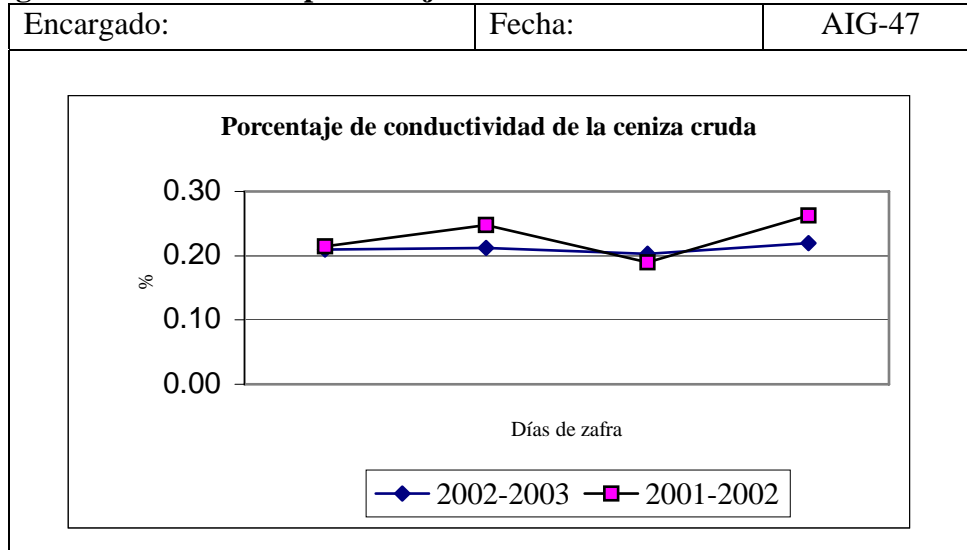


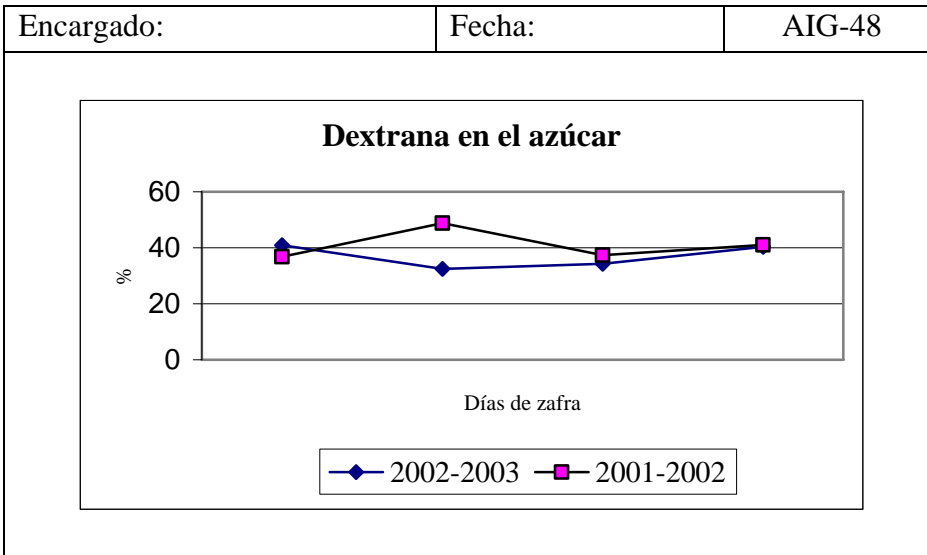
Figura 47. Modelo del porcentaje de conductividad de la ceniza cruda



La cantidad de dextrana es uno de los parámetros que se deben de controlar durante la operación de centrifugación, debido a que ésta produce alta viscosidad, la cual interfiere en la purga de las centrífugas y además también interfiere en la formación de los cristales de azúcar.

La figura 48 muestra el porcentaje de dextrana obtenido en dos diferentes zafras:

Figura 48. Modelo de la dextrana en el azúcar

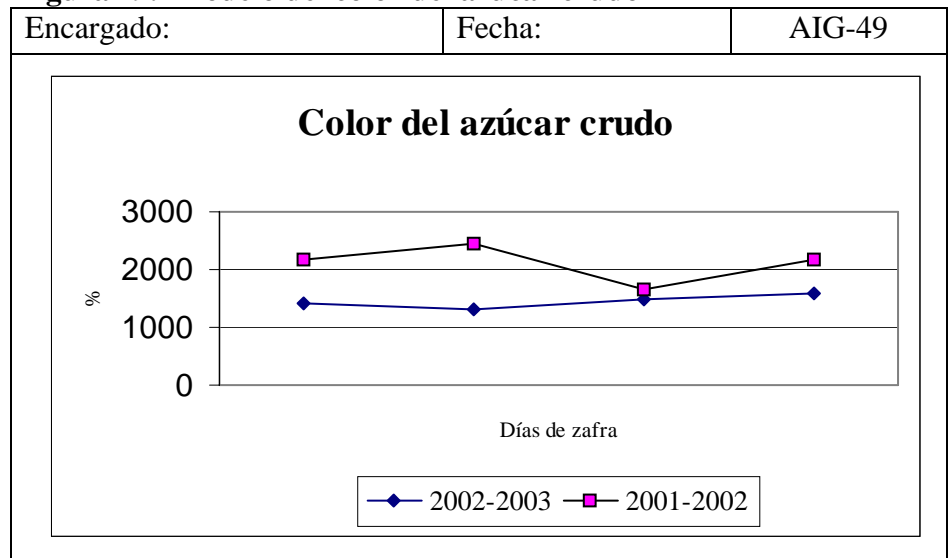


Una de las operaciones finales del proceso azucarero es el secado y enfriamiento, dentro de los parámetros a determinar en dicha operación se encuentra el color del azúcar, el cual se determina también por medio del método ICUMSA 4.

El azúcar crudo presenta un color característico, el cual es producido por una película de miel madre que cubre a los cristales. Para aclarar el color de los cristales de azúcar se requiere del proceso de clarificación descrito anteriormente.

La figura 49 muestra un comparativo entre distintas zafras del color del azúcar crudo.

Figura 49. Modelo del color del azúcar crudo



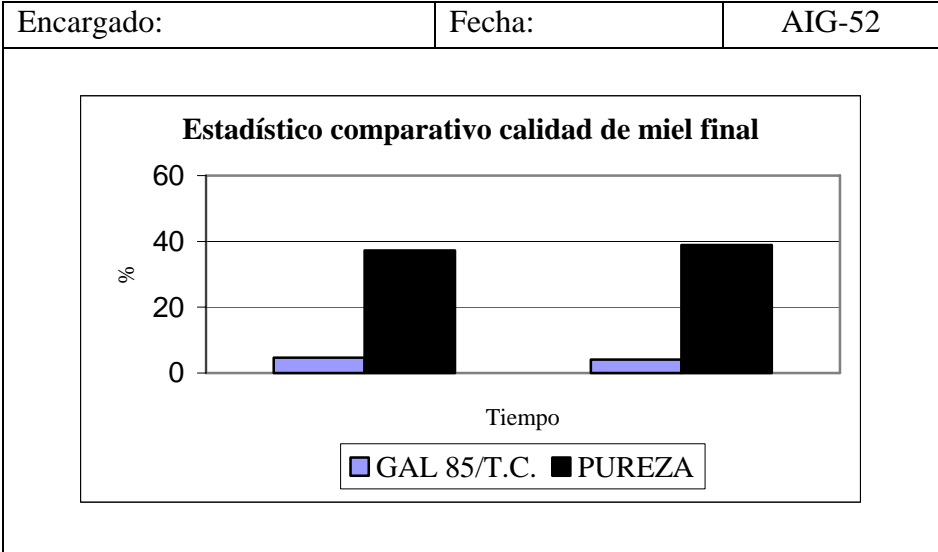
Para evaluar la productividad del proceso azucarero, es necesario determinar el rendimiento industrial, el cual se puede resumir como lo muestra la siguiente figura

Figura 50. Rendimiento industrial

Encargado:	Fecha:	AIF - 50
	Zafra 1	Zafra 2
	Quincena 1 Quincena 2 Promedio	Quincena 1 Quincena 2 Promedio
Rendimiento teórico		
Rendimiento base 96		
Caña molida		
Extracción diluida		
Toneladas de jugo diluido		
Extracción de sacarosa		
Porcentaje de imbibición de la caña		
Toneladas de agua		

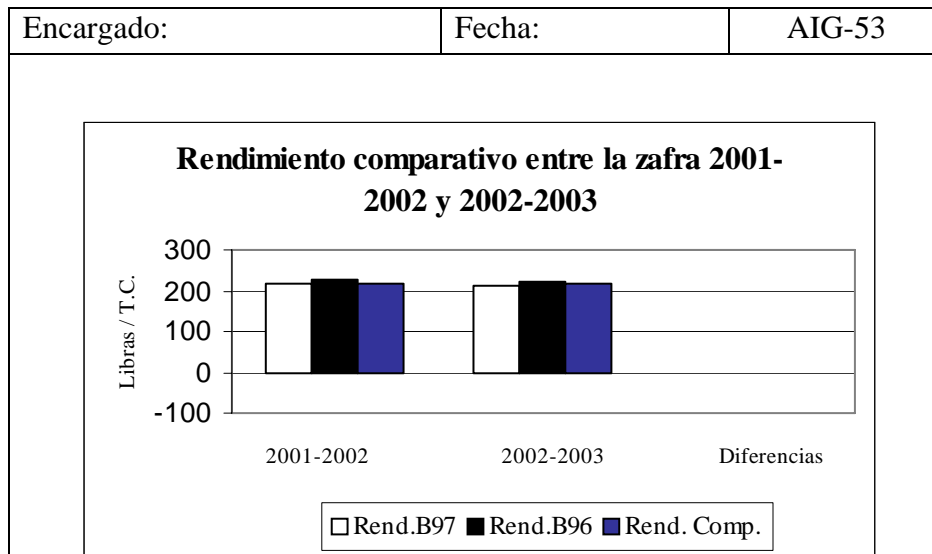
De acuerdo al formato anterior, se puede hacer un gráfico comparativo que muestre la calidad de la miel final de acuerdo a los galones 85/T.C. obtenidos en relación a la pureza de la misma, así como se muestra en la siguiente figura

Figura 52. Modelo de la calidad de la miel final



La figura 53 muestra la comparación de los rendimientos obtenidos durante las zafas 2001-2002 y 2002-2003, así como también de la diferencia existente entre el rendimiento de las dos temporadas de zafra.

Figura 53. Modelo de los rendimientos comparativos entre la zafra 2001-2002 y 2002-2003



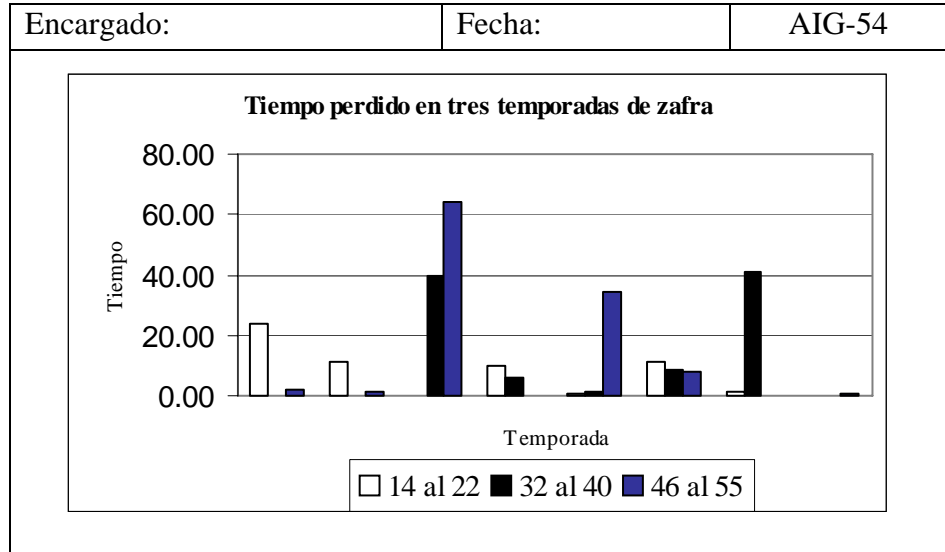
La figura 51 muestra además datos acerca del tiempo perdido durante la zafra, cabe resaltar que esta medición de los tiempos perdidos es de suma importancia ya que influye directamente en el incremento del tiempo de molienda, lo que ocasiona que se alargue la zafra, teniendo esto como consecuencia inmediata una elevación en el costo de operación.

Además de incrementar el costo de operación, el tiempo perdido descontrola el programa de corte de caña, lo que ocasiona desfases en la calidad de la caña que ingresa.

Otra consecuencia del tiempo perdido es la posible descomposición de los productos durante el proceso, lo que ocasiona pérdidas de sacarosa indeterminadas o en mieles, además de elevar aún más los costos de operación.

La última figura muestra un comparativo entre los tiempos perdidos en tres temporadas de zafra.

Figura 54. Modelo del tiempo perdido en tres temporadas de zafra



CONCLUSIONES

1. Se logró establecer un modelo de diagnóstico en el cual se evalúa la productividad de un proceso agroindustrial azucarero, desde el momento en que es sembrada la caña de azúcar hasta que se obtiene el producto final.
2. El modelo de diagnóstico se realizó tomando como base los modelos ya establecidos de las buenas prácticas de manufactura y las buenas prácticas agrícolas, estableciendo para éste un cuestionario de evaluación, mediante el cual se monitorea el proceso azucarero.
3. El modelo de diagnóstico permite establecer los parámetros óptimos de operación del proceso agroindustrial azucarero para encontrar los posibles puntos críticos y de mejora del proceso, haciéndolo más eficiente.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar el modelo de diagnóstico para evaluar la productividad de un proceso agroindustrial azucarero.
2. Localizar los posibles puntos críticos y de mejora durante la operación de zafra utilizando para ello el modelo de diagnóstico.
3. Realizar comparaciones de productividad entre zafras mediante los formatos de recolección de datos presentados por el modelo de diagnóstico.
4. Generar gráficos que muestren el comportamiento de los principales parámetros que influyen dentro del proceso según lo muestra el modelo de diagnóstico.
5. Evaluar los principales parámetros que afectan el proceso agroindustrial azucarero por medio de la información proporcionada por el modelo de diagnóstico.

BIBLIOGRAFÍA

1. Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar. CENGICAÑA. **Memoria. Presentación de resultados de investigación zafra 2000 – 2001.** Guatemala, 2000. 52 pp.
2. Chen, James. **Manual del azúcar de caña para fabricantes de azúcar.** 1ª ed. México: Editorial Limusa, 2000. 1179 pp.
3. Compañía Azucarera Salvadoreña, S.A. de C.V. **Caña de azúcar. Manual de variedades.** El Salvador, 2001. 45 pp.
4. Compañía Azucarera Salvadoreña, S.A. de C.V. **Programación de cosecha y manejo de quemas en caña de azúcar.** El Salvador, 2001. 36 pp.
5. Compañía Azucarera Salvadoreña, S.A. de C.V. **Sistemas de siembra paqueteada, siembra semimecanizada en CASSA de C.V., resiembras, fertilización a la siembra.** El Salvador, 2001. 46 pp.
6. Fajardo, Jaime Walter. Evaluación del efecto causado por la quema de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L) a horas del día diferentes en tres épocas de zafra. Tesis Ing. Agr. Guatemala, universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, 1996. 130 pp .
7. Hudson, J.P. **Control del medio ambiente de la planta.** Ediciones Omega, S.A. España, 1967. 1230 pp.

8. Klusmann, Jaime. Normas básicas para el control químico de fabricación de azúcar de caña. Tesis Ing. Qco. Guatemala, universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1980. 116 pp.
9. Penagos, Sergio. Aseguramiento de la calidad en la caña de azúcar. Tesis Ing. Qco. Guatemala, universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1999. 125 pp.
10. Pérez, Manuel y Lawrence Pratt. **Industria azucarera en Guatemala : análisis de sostenibilidad.** Julio, 1997. 62 pp.
11. Porta A., Antonio. **Fabricación de azúcar.** Salvat Editores, S.A. 1ª ed. España, 1955. 1080 pp.
12. Velásquez García, Víctor. Estudio sinóptico del comportamiento del viento para la costa sur de Guatemala durante el período de zafra de la zona cañera. Tesis Ing. Agr. Guatemala, universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, 1998. 136 pp.