



**UNSAM**

UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE  
SAN MARTÍN

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN**

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INGENIERÍA AMBIENTAL

**PROPUESTA PARA LOGRAR UN PROCESO SUCRO-  
ALCOHOLERO MÁS SUSTENTABLE**

Trabajo de Tesis para optar por el título de  
Magister en Gestión Ambiental

Director de Tesis: **ALBERTO S. CAPRA**

Autor: **RICARDO E. FOURCADE**

***Año – 2015 –***

## RESUMEN

La producción de azúcar en la provincia de Tucumán, Argentina, tiene alrededor de 3500 pequeños productores independientes que entregan su caña a 15 ingenios utilizando procedimientos de zafra que incluyen corte manual, quema de caña cortada, y a consecuencia la materia prima que recibe el ingenio es variable en calidad y composición química dificultando el procesado y aumentando la exigencia ambiental de la industria.

El presente trabajo de Tesis plantea desde una visión holística una posible mejora a la problemática que permitiría al ingenio disponer de materia prima de composición más uniforme y a la vez ajustar los procesos de manera de obtener un producto final del ciclo Azúcar-BioEtanol, llamado vinaza, que pueda utilizarse en todo tipo de sustratos para fertirriego, aumentando sobremanera la sustentabilidad de la actividad.

Se propone también una posible modificación al proceso de fermentación que permitiría aumentar el rendimiento de obtención de alcohol y reducción de carga orgánica de la vinaza.

Palabras clave: Caña de azúcar, Sustentabilidad Jugo, Clarificación, Vinaza, Fermentación, BioEtanol.

Antecedentes del autor:

**Ingeniero Industrial** recibido en la Universidad Nacional de Sur año 1969.

**Magister en Ingeniería de Procesos** en la Universidad de Carabobo, Venezuela, año 2004.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por haber estado presente en todo momento durante el desarrollo del trabajo, en mi vida y la de las personas que me han ayudado.

A la Universidad Nacional de San Martín, a su personal docente y administrativo que ha premiado el esfuerzo realizado con la más esmerada atención en todo momento.

Al Sr Profesor Dr. Hilario Wynarczyk por su constante asesoría y atención.

Al Lic. Alberto Santos Capra por su guía técnica y ayuda en la elaboración del trabajo.

Al Ingeniero Juan Carlos Mirande por su valiosa y desinteresada ayuda en la corrección e incorporación de conceptos técnicos.

A los Directivos y a mis compañeros de trabajo de la Dirección de Producción Limpia y Consumo Sustentable y demás colegas de las otras áreas de la ExSecretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación por su constante apoyo y colaboración.

Al Secretario de Ambiente y a los Directivos y Técnicos del Programa de Reconversión Industrial de la Secretaría de Medioambiente de Tucumán por su ayuda y colaboración.

A los Técnicos y Directivos de los Ingenios Azucareros por compartir sus conocimientos sin reparos.

A mi esposa Marta y a mis hijos Marcelo, María Natalia, Matías y María Noelia por su constante apoyo y aliento a seguir con el estudio.

A mis compañeros de la segunda comunidad de catecúmenos de Santa Amelia por sus oraciones.

Con la esperanza que el presente trabajo sea de utilidad y un pequeño paso hacia la sustentabilidad del procesado de la caña de azúcar agradezco a todos y elevando mis oraciones a Dios pido que los bendiga siempre y dondequiera que estén.

# ÍNDICE

GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	9
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>11</b>
SITUACIÓN PROBLEMÁTICA INICIAL .....	11
<i>Propósitos</i> .....	12
Marco teórico.....	14
<i>Metodología</i> .....	16
Materia prima .....	17
<b>CAPÍTULO 2: SITUACIÓN ACTUAL EN TUCUMÁN.....</b>	<b>21</b>
<i>Proceso de obtención de azúcar y etanol</i> .....	24
Clarificación: .....	25
PROCESOS DE OBTENCIÓN DE AZÚCAR Y ETANOL .....	26
Planteo del problema .....	27
<b>CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL TRABAJO.....</b>	<b>33</b>
Factores que afectan la composición química del jugo de caña .....	33
<i>Extracción</i> .....	34
Preparación de la caña para extracción de la savia (jugo) .....	34
<i>Clarificación</i> .....	36
Análisis del proceso de clarificación .....	36
Observaciones.....	37
Sedimentación: .....	38
Convección natural.....	39
Condiciones para que el proceso de separación sea eficiente.....	40
<i>Control del Proceso</i> .....	42
Opción: Segunda clarificación .....	43
A-Producción de caña .....	44
B-Extracción del jugo.....	44
Control del proceso de Clarificación .....	45
Etapa de CLARIFICACIÓN.....	48
<b>CAPÍTULO 4: COMPONENTES DEL TALLO DE CAÑA .....</b>	<b>52</b>
HACIA LA PRODUCCIÓN MÁS SUSTENTABLE .....	52
Pasos a implementar:.....	52
Factores dependientes del suelo y ubicación geográfica del cultivo .....	54
Factores dependientes de la organización del trabajo y de su ejecución:.....	55
<i>Diferencia entre cambios a implementar en sector agropecuario e industrial:</i> .....	55
<i>Sector Agrícola: Los cambios que dependen del accionar de las personas tienen respuesta recién después de un tiempo prolongado por ej.</i> .....	55
<i>Sector Industrial: Los cambios se definen en respuesta a necesidades.</i> .....	56
<i>Opción para mejora del proceso</i> .....	59
Alternativa de clarificación de jugo concentrado (mieles) .....	64
Reacciones que favorecen la clarificación.....	66
Reacciones que producen pérdidas de sacarosa .....	67
<i>Matriz de variación del jugo de caña</i> .....	69
CONCLUSIONES: .....	72
OTRAS OPCIONES.....	73
<b>CAPÍTULO 5: OTRAS OPCIONES PARA TRABAJAR .....</b>	<b>80</b>
PROPUESTA DE TRABAJO.....	80
<i>Esquema del circuito propuesto</i> .....	82
<i>Principales productos de la fermentación alcohólica</i> .....	84

<i>Propuesta para aumento del rendimiento de la fermentación</i> .....	86
ALTERNATIVAS PARA MEJORA DEL RENDIMIENTO DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN	
ALCOHÓLICA .....	88
Objetivo: .....	88
<i>Proceso de fermentación con vacío en el tanque</i> .....	89
Descripción del proceso .....	92
Fermentación extractiva .....	95
<i>Cultivo de microorganismos</i> .....	97
Crecimiento microbiano en medio líquido .....	97
PRODUCCIÓN DE BIOFERTILIZANTES .....	101
<i>Conclusiones del Capítulo</i> .....	102
<b>CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES FINALES</b> .....	<b>104</b>
<b>CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>108</b>
<b>ANEXO I: ETAPAS de EXTRACCIÓN y PREPARACIÓN DEL</b>	
<b>JUGO DE CAÑA</b> .....	<b>120</b>
<b>ANEXO II: COMPONENTES DEL TALLO DE CAÑA</b> .....	<b>129</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1: VISTA DE UN CAÑAVERAL INCENDIADO .....	13
Figura 2: VISTA DE LA CAÑA CORTADA A MANO, SIN HOJAS, LISTA PARA PROCESAR.....	20
Figura 3: CAÑA EN SURCOS PARA ZAFRA MECANIZADA.....	20
Figura 4: VISTA DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR EN RECONSTRUCCIÓN.....	23
Figura 5: MEZCLADOR CONTINUO <i>ON-LINE</i> .....	47
Figura 6: PRODUCTOS OBTENIDOS DEL ÁCIDO LEVULÍNICO.....	75
Figura 7: DESARROLLO DE POBLACIÓN DE UN CULTIVO.....	98

## ÍNDICE DE DIAGRAMAS

Diagrama 1: ESQUEMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE AZÚCAR Y ETANOL.....	26
Diagrama 2: ESQUEMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DEL JUGO DE CAÑA.....	34
Diagrama 3: EJEMPLO DE BALANCE DE MASA DEL PROCESO.....	76
Diagrama 4: PROCESO DE FERMENTACIÓN MODIFICADO.....	87
Diagrama 5: ESQUEMA DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN AL VACÍO.....	91
Diagrama 6: ESQUEMA DE FERMENTACIÓN EXTRACTIVA.....	95
Diagrama 7: FERMENTACIÓN EXTRACTIVA POR VACÍO.....	97

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Trabajos con Sacarato.....	65
Tabla N° 2: Comparación de métodos de clarificación .....	66
Tabla N° 3: Matriz de variación .....	71
Tabla N° 4: Compuestos que se pueden encontrar en líquidos alcohólicos obtenidos por fermentación.....	85

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

° BAUME	Escala de medición de densidad de líquidos
BAGACILLO	Parte fina de la fibra de la caña
BAGAZO	Fibra de caña, residual luego de extraída la savia
CACHAZA	Barro del sedimentador clarificador de jugo luego de filtrado
CAÑA SOCA	Caña que crece de la raíz luego del corte
CAÑEROS	Productores de caña en pequeña escala
Ce	Conductividad eléctrica
CIC	Capacidad de Intercambio Cationico
CJ	Jugo clarificado
COGOLLO	Despunte de la caña
COMPOST	Mezcla orgánica en proceso de formación de humus
DALA	<i>Delta-AminoLevulinic Acid</i>
DBO	Demanda Biológica de Oxígeno
DIFUSOR	Instalación para extracción de la savia de caña por difusión
DPA	<i>DiPhenolic Acid</i>
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DTML	Salto de temperatura medio logarítmico
EEAOC	Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres
ENRE	Ente Nacional de Energía Eléctrica
FINCA	Parcela de tierra para producción de caña
ICUMSA	<i>International Comission for Uniform Methods of Sugar Analysis</i>
INVERSIÓN	Desdoblamiento de la sacarosa en glucosa y fructosa
ISOHIETA ISOYETA	Línea de delimitación de zonas de igual precipitación pluvial
LA	Ácido Levulínico
MALOJA	Restos de hojas y despunte que quedan en el campo
MEM	Mercado Eléctrico Mayorista
MOL	Lechada de cal
MP	Materia Prima
MTHF	<i>MethylTetraHydroFuran</i>
N	Cantidad de individuos en la población de levaduras del mosto

ND	No Determinado
nF	Nano Filtración
OI	Osmosis Inversa
PID	Sistema de regulación proporcional, integral y derivado
PLC	Controlador lógico programable (siglas en inglés)
POL % CAÑA	Contenido de azúcares totales
Potencial Z	Potencial electrostático de partículas en líquidos
PTN	Presión y Temperatura Normales
PUCV	Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
R&D	Investigación y Desarrollo (siglas en inglés)
RAC	Residuo Agrícola de Cosecha
SACCH	Sacarato de calcio
SGA	Sistema de Gestión Ambiental
SGI	Sistema de Gestión Integral
SM	Materia Sólida
SS	Sólidos Sedimentables
TC	Toneladas de Caña molida
TRAPICHE	Conjunto de molinos tricilindricos para triturar la caña
TRH	Tiempo de Residencia Hidráulico
TRI	Tiempo de Retorno de Inversión
u	Coefficiente de crecimiento de la población (ec. de Monod)
UASB	<i>Upfolw Anaerobic Sludge Blanchet</i>
UF	Ultra Filtración
UNIDO	<i>United Nations Industrial Development Organization</i>
VINAZA	Mosto fermentado y calentado después de destilar alcohol
VOC	Compuestos orgánicos volátiles (Siglas en Inglés)

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

Tucumán concentra la mayor parte de la producción de azúcar del país contando con alrededor de 3500 pequeños productores independientes que entregan sus cosechas a 15 Ingenios que quedaron después de la crisis del año 1966 que terminó con la actividad de otros 11 ingenios que dejaron de trabajar por orden del gobierno de facto del Gral. Onganía a través de la Ley de Cierre de Ingenios, el ingenio Santa Ana que era el más grande fue demolido, otro presentó quiebra y 9 debieron cerrar sus puertas.

El análisis global del trabajo de un ingenio azucarero es aparentemente sencillo porque se trata de extraer el máximo de savia del tallo de la caña de azúcar que le proveen los productores y luego de purificarlo y concentrarlo, hacer que se cristalice y separar los cristales formados, que son el producto de interés buscado.

Visto así parece muy sencillo, pero se presenta la problemática que por falta de integración entre la producción de campo y la industria, el ingenio deba recibir la materia prima que le proveen y que aunque pequeñas, presenta variaciones en su composición química que dificultan el ajuste de los procesos con consecuencias finales de contaminación ambiental.

## Situación problemática inicial

La actividad de los cañeros independientes trae a consecuencia que el ingenio, que necesita de la caña, esté forzado a recibir todo lo que los productores llevan, salvo casos extremos de calidad inadecuada, acarreado los problemas propios de una materia prima cuya composición es variable.

Además, se suma la falta de control de un factor clave en el proceso, el tiempo que transcurre entre el corte de la caña y su inicio que al aumentar da lugar al comienzo de una degradación por acción de las bacterias *Leuconostoc Mesenteroides* que modifican a la sacarosa transformándola en otro compuesto, el *dextrano*, que desnaturaliza a aquella y aumenta la viscosidad del jugo (Cuervo Mulet 2010).

La presencia de dextrano en el jugo de caña hace que se dificulte el proceso por el arrastre que se produce con los vapores del último cuerpo del

concentrador aumentando la pérdida de productos azucarados y como consecuencia la contaminación del efluente por la incorporación del arrastre al agua del condensador.

## *Propósitos*

Considerándolo desde una perspectiva holística se propone la integración a un objetivo ambiental, la sustentabilidad, a todos los actores que participan en la formación de los productos finales, azúcar y BioEtanol (Aguilar 2007).

El trabajo planteado es arduo y difícil ya que significa ir contra las costumbres y tradiciones arraigadas en la gente que prepara la materia prima del ingenio, que son los llamados “cañeros”.

Demás está el predecir que la implementación de los cambios que se requieren para llegar a un sistema integrado sustentable es un camino largo y con muchos obstáculos que deberían ser superados, pero que en su mayoría son meros actos de propia voluntad de algunos actores que olvidan considerar al entorno como parte asociada e interviniente, ya sea directa o indirectamente en la relación que mantienen con la naturaleza, proveedora de los medios para que logre su subsistencia.

A continuación de muestra la imagen de un campo cañero quemándose y donde se observa que la magnitud de un incendio de un cultivo es imposible de detener hasta que todo el material que está al alcance de las llamas haya sido destruido.

La recomendación posible sería de dejar en ciertos espacios libres de cultivo, tal como se aplica en parcelas con siembra de granos, que susceptibles de incendios, evitan la propagación entre los lotes con zonas que actuando de calles para tránsito de maquinarias, reducen las posibilidades de propagación a otros campos.

Seguramente el perfeccionamiento y mejora de la producción agrícola necesaria por su importancia para que disminuya, ya sea directa o indirectamente la exigencia sobre el medio ambiente llevará años para lograr la optimización en todos los aspectos a corregir y optimizar, pero que es un compromiso de todos es innegable y que también la mejoría es a través del accionar conjunto de todos los participantes.



Cañaveral listo p/zafra, incendiado.

**Figura 1: VISTA DE UN CAÑAVERAL INCENDIADO**

Como se observa en la imagen, las hojas secas de la parte inferior de las plantas son las que aceleran la propagación de las llamas y producen una elevación de la temperatura del tallo que destruye la planta, acelerando la degradación del jugo obligando a procesarla en un lapso de tiempo corto para alcanzar a recuperar parte de la sacarosa contenida.

Incendios como el de la gráfica se deben erradicar, lográndolo en la medida que todos los involucrados sean partícipes y colaboren en el cuidado de los cultivos y formando a la vez conciencia en la población que el daño ambiental afecta a todos.

Imágenes como la presente y las actitudes que ocasionan estas contingencias valoran e impulsan esfuerzos para formar y capacitar a los actores que intervienen o podrían intervenir con un cierto grado de responsabilidad a fin de eliminar las motivaciones causantes e inculcar patrones de convivencia estables y proactivos.

Con la intención puesta en estos objetivos se presenta el trabajo y se estima como un pequeño aporte a una comunidad que, como tantas otras de nuestro país, requiere de metas claras y a largo plazo con fuentes de trabajos estables y miras hacia un futuro que asegure el bienestar de todos.

### **Marco teórico**

El trabajo llevado a cabo en las plantaciones de caña de azúcar es bueno pero al carecer de una coordinación entre el proveedor de la materia prima, el cañero, y la industria que la procesa, el ingenio, se producen alteraciones irreversibles que la degradan.

Cabe aclarar que el que produce la materia prima para el ingenio azucarero es el productor del campo, pero como la composición de la savia de la caña depende de muchos factores, al carecer de coordinación entre actores, se provee al ingenio de una materia prima heterogénea que dificulta el trabajo y que aleja al conjunto del desarrollo sustentable (Simpson 1995).

El olvidar el entorno hace que se tomen decisiones que muchas veces llevan al que actúa a perder medios y oportunidades, sin que él siquiera lo considere o sepa las implicancias de su accionar y que alejan al conjunto integrado por productores e industrias de la sustentabilidad (Burk 2010).

Esto hace presente que es imprescindible llevar a la conciencia que el desarrollo de una comunidad donde todos dependen del entorno, por más que algunos piensen que por disponer de medios económicos suficientes no requieran de ellos, debe implementarse con acciones que aunque sean ejecutadas por un actor individual, eviten el modificar irreversiblemente el todo e incidan en forma negativa sobre la comunidad.

A veces se piensa que ello es una situación extrema y solo se produce en casos de contingencias que llevan al límite las capacidades de autogestión y autorregulación de la naturaleza en sí misma, pero no es tal como pareciera ya que por mayor que sea el poder económico de un actor, no puede interactuar solo sin la participación y colaboración de miembros de la comunidad, sobre todo en casos límites donde es difícilmente predecible el futuro inmediato.

Uno de los motivos de este trabajo es también el alertar sobre la actual situación que viven los pequeños productores cañeros de la provincia de Tucumán y que de continuar en la situación actualmente planteada, es alta la

probabilidad que pasen a una situación extrema de crisis y deban afrontar la decisión de buscar otras alternativas de mayor rentabilidad de producción o la de sucumbir ante la falta de recursos.

Ésta “*presión*” económica, que los llevaría a tener que desprenderse de sus campos para sobrevivir, y de acuerdo a cada situación particular, trabajar de empleados de los nuevos dueños del campo o emigrar hacia sitios donde puedan encontrar una fuente de trabajo que, según su capacidad y especialidad, puedan disponer de un ingreso que les permita vivir, o sobrevivir.

Además, sin darse cuenta o quizás sin importarle en absoluto, llevan al ingenio a una condición de trabajo, cual se resalta en este documento, que implica un nivel de exigencia al ambiente mayor que el alcanzable si se siguen pautas de trabajo ordenadas y programadas desde un centro único de coordinación, que debe estar en la planta procesadora que recibe la materia prima.

El productor debe comprender e internalizar en su mente y en su forma de trabajo que el desarrollo tecnológico le exige estar acorde con los requerimientos del mercado para poder comercializar su producción, materia prima para el ingenio, y cumplir los requerimientos que este le imponga.

Demás está mencionar ejemplos de toda índole donde queda demostrado que la “*calidad*” de la materia prima define muchas condiciones tanto de proceso como del producto final y sobre todo, del **desempeño ambiental**, y es así que cuando cada persona para su vida privada no duda en seleccionar lo mejor cuando se abastece de alimentos, debería extrapolar el criterio y a su vez ofrecer al mercado la mejor producción que el sustrato, las condiciones climáticas y demás circunstancias le permiten obtener.

Lo expresado no solo debe quedar en palabras o escritos, sino trasladarlo a las acciones necesarias y conjunto de cambios inherentes al comportamiento y desenvolvimiento del trabajo mancomunado entre productores e industria para alcanzar una sustentabilidad estable y sobre todo perdurable.

El problema se agrava por la magnitud de la materia prima que procesan diariamente los ingenios, que asumiendo rendimientos promedio del orden de 66 toneladas de caña por hectárea (EEAOC 2015) implican para un ingenio tamaño medio que procesa en orden de 10.000 toneladas por día, un ingreso de 12 a 15 transportes de caña (promedio 30 ton cada uno) por hora

las 24 horas que suman un total diario de 160 a 180 hectáreas de caña cortadas por día (6 a 8 ha. por hora en forma continua).

El cañero debe entender esta problemática y colaborar para que la caña llegue al ingenio en el menor tiempo posible y a la hora requerida (*just in time*).

Por el trabajo desempeñado en forma precaria y sin un enfoque holístico se presenta la tendencia, que detallada por Fogliata en su relevamiento muestra una disminución paulatina del rendimiento específico por hectárea plantada denotando la falta de sustentabilidad del conjunto de producción agrícola/industrial (Fogliata 2014).

Tal como se trata de demostrar en el presente trabajo, el desempeño ambiental se puede mejorar y lograr un nivel estable de existencia entre la producción primaria y su elaboración con el cambio de actitud de los actores y sobre todas las cosas, el llevar adelante un trabajo conjunto programado a más largo plazo que lo habitualmente acostumbrado por la mayoría de los productores (Cordovés Herrera 2007).

Con éste ánimo y la esperanza puesta en que se alcance un objetivo común compartido entre los actores, cada cual en su entorno, se desarrollan los temas con la mira puesta en que se logre la sustentabilidad necesaria para que la producción mantenga un desarrollo estable.

## ***Metodología***

Efectuar un relevamiento de la información disponible relacionada a las características de los cultivos de caña de azúcar que afectan el proceso de elaboración del azúcar y la dependencia de los mismos de factores que son controlables por la acción antrópica y los que dependen de la naturaleza y de las contingencias meteorológicas presentes en cada ciclo productivo anual.

Identificados cuales son los factores que condicionan e inciden en la composición y características del jugo de caña se efectúa el relevamiento de las acciones adoptadas en emprendimientos sitios en diversas zonas de cultivo localizadas en otras regiones geográficas y las posibles a aplicar en los emprendimientos agrícolas e industriales de la Provincia de Tucumán.

Para ello se inicia dicho relevamiento enfocando la búsqueda en relación a la caña como la materia prima que utiliza el Ingenio Azucarero y cuáles son los factores que la afectan en mayor magnitud.

En la Tesis se presenta la ventaja que sería posible obtener con un accionar mancomunado al incorporar al ciclo productivo la unidad agrícola y la dependencia que por tanto debería existir entre un centro de decisión, convenientemente ubicado y las parcelas productoras del entorno que, compromiso mediante, serían las proveedoras de la materia prima.

Es importante destacar que la principal y mayor ventaja que sería posible alcanzar es la de un ciclo de elaboración con desempeño ambiental menos exigente y con mayor acercamiento a la sustentabilidad para la producción agrícola.

Dicha mejora del desempeño ambiental se traduce en un mayor control de las pérdidas de productos azucarados y un trabajo cuyo control es posible llevar con programas elaborados y con la aplicación de tecnologías nuevas.

En el **CAPÍTULO 5** se propone una modificación que con un adecuado desarrollo experimental se podría aplicar al proceso de fermentación continua a fin de obtener un efluente de destilación posible de utilizar como sub-producto apto para aplicar como fertirriego en cualquier tipo de suelo.

Con estas medidas aplicadas al conjunto productivo integrado por el agro y la industria se presume, luego de los ajustes propios de la implementación de los cambios necesarios, que en conjunto la industria Sucro-Alcoholera y las parcelas de cultivo se acercarían a la sustentabilidad del ciclo.

Para ello se inicia el relevamiento evaluando la materia prima de la industria de obtención del azúcar.

### **Materia prima**

La materia prima que utiliza la producción de azúcar está en el tallo de la planta de Caña de Azúcar, una gramínea denominada *Saccharum Officinarum* cuyo desarrollo en los climas adecuados, tiene un alto rendimiento en toneladas por hectárea.

Ésta gramínea se desarrolla en forma muy rápida creciendo desde la raíz formando uno ó varios tallos gruesos con hojas adosadas, que eliminadas

del tallo y junto con la punta de éste forman el Residuo Agrícola de Cosecha (RAC) con potencial energético similar al del Bagazo.

Para su desarrollo la caña requiere de suficiente aporte de agua, en la mayoría de los casos, aportado por lluvias, con isoyetas mínimas entre 900 y 1000 mm por año con una distribución mensual adecuada estimado una relación promedio de alrededor de 1 m<sup>3</sup> de agua o más por cada Kg. de azúcar obtenido.

En botánica, el tallo es el eje de la parte aérea de las cormofitas y es el órgano que sostiene a las hojas, flores y frutos. Sus funciones principales son las de sostén y de transporte de fotosintatos (carbohidratos y otros compuestos que se producen durante la fotosíntesis) entre las raíces y las hojas. Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Tallo>.

En realidad la materia prima es la savia que contiene esta planta, la caña de azúcar, y que se encuentra en el interior en estado natural en el tallo, que en adelante se denominará “jugo de caña” o simplemente “jugo” y que para explicitar se puede decir que se encuentra en su “envase de origen”.

Para su extracción se corta la caña y a partir de ése momento se inicia la degradación paulatina de la sacarosa que es el compuesto mayoritario del jugo y es el producto de más valor reconocido que se transforma en el objeto buscado.

Al inicio del corte la degradación es lenta pero va incrementándose paulatinamente a medida que transcurre el tiempo, y a su vez al estar expuesta la parte interior de la caña al ambiente en la sección del corte, se contamina con bacterias y hongos que degradan a la sacarosa transformándola en otros compuestos de características parecidas, pero sin valor comercial directo llamados dextrano, manitol y otros. (Eggleston *et al*, 2005).

Como sucede en química orgánica, hay variantes de un mismo compuesto llamados isómeros, y también hay muchas cepas de bacterias y hongos que con mínimas diferencias atacan al jugo de caña degradando el producto de valor, la sacarosa.

Con esta aclaración se muestra que el jugo de caña, la materia prima, presenta variaciones en su composición, que sumado a las macro variaciones que se originan por las diferencias entre los suelos en que crece la planta, la lluvia, el tratamiento de fertilización, fumigación y otros factores que inciden producen un jugo difícil de purificar (Eggleston *et al*, 2002); (Id. 2005).

Estas variaciones producen una materia prima con el compuesto importante que es la sacarosa, que se requiere separar, pero acompañado de muchos otros que pueden tanto ayudar en el proceso como también frenar y dificultar al mismo, degradar a la sacarosa, modificar el enlace de sus moléculas básicas, etc.

El presente trabajo muestra una recopilación de los procesos y evalúa cuál de ellos sería, *prima facie*, el o los más convenientes a aplicar por los Ingenios en la Provincia de Tucumán a fin de lograr, como objetivo final de la producción de azúcar seguida de alcohol y los subproductos, una cachaza que ya se utiliza como mejorador de la tierra y una vinaza que sea fácilmente utilizable para fertirriego en cualquier tipo de suelo, además de otros subproductos posibles de obtener.

Evaluated desde otra perspectiva, durante el crecimiento la planta de caña de azúcar extrae del suelo los elementos químicos que necesita para su desarrollo, y que se requiere retornar (devolver) al suelo para llegar a la sustentabilidad del proceso productivo.

Conviene aclarar que la sacarosa, disacárido, está compuesta únicamente por átomos de Carbono, Hidrógeno y Oxígeno (carbohidrato). Los minerales y demás elementos que la planta requirió para su desarrollo se pueden retornar al suelo sin generar inconvenientes en el producto final, o mejor dicho, se debería lograr su reincorporación al sustrato a fin de mantener su productividad en un nivel adecuado (Fogliata 2014).

El proceso de obtención del azúcar se basa en la propiedad de la sacarosa de formar cristales cuando se aumenta la concentración del jugo y se siembran pequeñas partículas de cristales de sacarosa finamente molidos que funcionan como “núcleos de cristalización”.

En grandes pasos el proceso se resume en la extracción del jugo, su purificación (clarificación), concentración, cristalización, centrifugado para separar los cristales del líquido residual llamado miel, secado y envasado.

La Tesis plantea la opción de un enfoque global del proceso considerando también a la planta de caña de azúcar como parte del mismo y las diferentes opciones que podrían aplicarse a la operación unitaria más importante de la industrialización, la **clarificación del jugo** (Borges *et al*, 2012), como se detallará más adelante.

La planta, gramínea perenne, según el clima y sustrato de la Provincia de Tucumán ha mostrado que a los 5 años es conveniente renovar para mantener el rendimiento por hectárea, que en promedio oscila alrededor de 66 t/Ha (EEAOC, 2014).

La caña es la materia prima que se dispone para la producción de azúcar, sacarosa, apta para el clima y la tierra de Tucumán y que además presenta un gran potencial para ser una plataforma de obtención de productos químicos, en este caso productos Bio-químicos por su origen, que pueden reemplazar a muchos productos obtenidos de la petroquímica como se explicará más adelante.

En la **Figura 2** se muestra un lote de caña cortada a mano lista para entrar al proceso.



**Figura 2: VISTA DE LA CAÑA CORTADA A MANO, SIN HOJAS, LISTA PARA PROCESAR**



**Figura 3: CAÑA EN SURCOS PARA ZAFRA MECANIZADA**

## CAPÍTULO 2

# SITUACIÓN ACTUAL EN TUCUMÁN

En la introducción se evalúa la situación desde el punto de vista global y desde este capítulo se comienza el análisis detallado de las consecuencias del accionar sin coordinación.

Hasta hace unos años la mayoría de los trabajos tendían a la obtención del máximo Pol% de azúcar (POL=SACAROSA~AZÚCAR) de la caña, con elaboración de sofisticados procesos que focalizan como principal producto el azúcar, valorizando solamente a la melaza y al bagazo.

Desde hace algún tiempo se ha comenzado a considerar también como sub-producto a la cachaza, el barro de los sedimentadores, porque se le utiliza para mejorador del suelo incorporándolo cuando se roturan los lotes para la rotación del cultivo o replantado de caña.

También se ha comenzado a incluir en la cadena de valor a la ceniza, porque mezclada con la cachaza y humectada con vinaza es la materia prima adecuada para la producción de fertilizantes orgánicos, agregando a la mezcla citada bagacillo en algunas experiencias con resultados satisfactorios.

El proceso empleado para la obtención de este tipo de fertilizantes, orgánicos, es el de formación de compost.

A la vinaza se le ha dado valor al utilizarla diluida con agua para riego de parcelas de producción de caña, denominado este riego como “fertirriego”, ya que incorpora al suelo la mayoría de los nutrientes que la planta extrajo para su desarrollo que pasaron al jugo y quedaron luego como “no azúcares” en la melaza, que cuando se fermenta para la obtención del etanol, pasan a esta (a la vinaza) (Morandini *et al*, 2009).

Actualmente la vinaza pura, es un fertilizante poco apropiado para suelos medianamente productivos por la elevada concentración de sales que contiene.

El alto contenido de sales condiciona su empleo en dosis elevadas en solamente algunos suelos pobres, donde se puede aplicar utilizando sistema de riego por surco. Los suelos productivos admiten dosis bajas que encarecen

su utilización por el transporte y la necesidad de una distribución homogénea, empleando preferentemente riego por aspersión o riego por surco mezclando 1 parte de vinaza con 10 a 20 partes de agua.

La limitación mayor es que la gran mayoría de las parcelas productoras de caña carecen de riego recibiendo el aporte de humedad solo por lluvia.

Si se logran eliminar los principales compuestos “no azúcares” del jugo de caña al inicio del proceso se obtendrían una serie de beneficios, que se detallan:

-Disminuiría el ensuciamiento de las superficies de transferencia de energía con un ahorro en pérdidas de producto por cada interrupción para limpieza y reduciendo también el efluente con alta carga que produce el lavado de los equipos (Dymond 1950; Mathew 1995; Yu 2003).

-Se podría aplicar el fertirriego con vinaza en cualquier tipo de suelo incluyendo suelos en producción con caña soca.

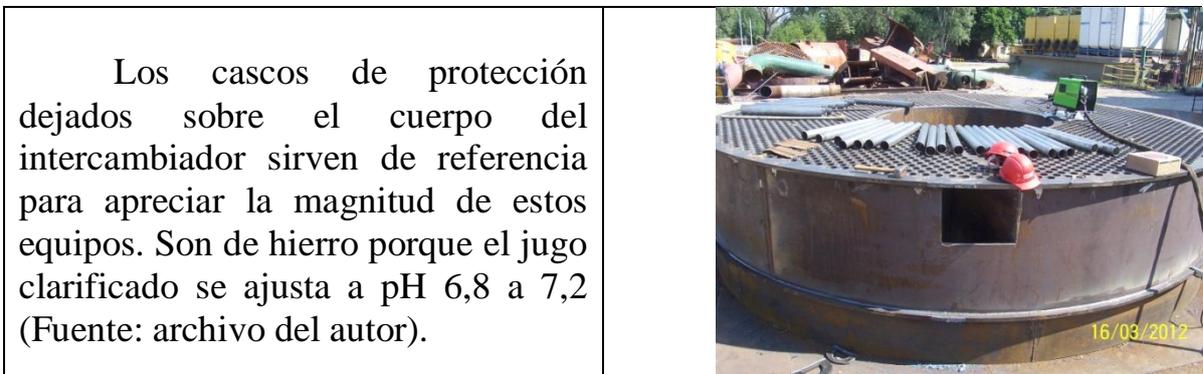
Para disminuir la degradación de la sacarosa del jugo clarificado por la inversión de ésta, que aumenta a mayor temperatura del jugo, se busca acelerar el proceso de clarificación, y en muchos casos se descuida por ello la calidad del jugo clarificado, quedando retenidas impurezas en cantidades superiores a las deseadas y generalmente sustancias que aumentan el color, haciendo necesaria la refinación del azúcar (Tomie Kunitake 2012).

Utilizando la melaza para obtención de etanol, la inversión de la sacarosa debería presentar una cierta ventaja o, por lo menos, evitar de considerarla una pérdida por el hecho que la sacarosa como tal debe ser desdoblada para inicio de la fermentación en fructosa y glucosa por acción de la enzima invertasa (Kumar *et al*, 2010).

Resumiendo, se puede concluir que desde todo punto de vista es conveniente exponer el menor tiempo posible la materia prima, caña cosechada, a la degradación que producen las bacterias *Leuconostoc Mesenteroides* formando dextrano (Rodríguez Giménez 2005), por la dificultad que agregan para el tratamiento del jugo, sobre todo la concentración por el aumento de viscosidad que produce.

La importancia que adquiere un jugo con menor contenido de impurezas y no-azúcares se comprende por lo siguiente:

El sistema de concentración que se utiliza es el de trabajar con un evaporador tipo casco y tubo, vertical de un paso, que tiene varios cientos o miles de tubos instalados circulando el jugo por el interior de los mismos. Son tubos de diámetro grande y cortos comparando con las dimensiones que tienen los tubos de un concentrador tipo *Falling Film* (Enzinas 2007).



**Figura 4: VISTA DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR EN RECONSTRUCCIÓN.**

Si bien los tubos, al estar verticalmente instalados, aceleran la circulación del líquido interior al producirse las burbujas de vapor, que por diferencia de densidad se separan y suben a la superficie libre, el coeficiente global de intercambio de energía por unidad de superficie es relativamente bajo. Para este tipo de intercambiadores el coeficiente pelicular es menor que en los equipos casco y tubo horizontales o de película descendente *Falling Film*.

Un problema que se presenta durante la producción, por el empleo del jugo de caña con tantos compuestos no azúcares, es que se aumenta el ensuciamiento y también la frecuencia del lavado y limpieza, acción de alto requerimiento de mano de obra directa, elementos de limpieza y produce efluentes con alta carga orgánica y con alto contenido de productos de limpieza, aunque la tendencia es al reemplazo de la adición de químicos por el lavado con agua a alta presión.

A este problema se debe agregar el costo del reproceso del azúcar, (azúcar refinado), que los ingenios en general subvaloran ya que el combustible es casi gratuito, bagazo, porque se carece de un mercado que lo demande en cantidades significativas para otras aplicaciones.

Al mismo tiempo los productores de caña, “cañeros” subvaloran el RAC cuyo potencial energético es similar al del bagazo, con la diferencia que

requiere de su recolección y transporte desde el sitio de su producción, parcela productora de caña, hasta el sitio de su posible utilización (León *et al.*, 2013).

Además, por las partes que lo componen, hojas secas, hojas verdes y cogollo (que es el despunte de caña), debe dejarse secar y triturar previo su almacenaje, tema que será desarrollado más adelante.

## ***Proceso de obtención de azúcar y etanol***

El proceso de obtención del azúcar se inicia en el campo (finca), con un adecuado tratamiento de preparación del suelo, variedad acorde al clima, momento de la plantación y las demás tareas necesarias para el óptimo desarrollo del cultivo.

En el esquema de bloques presentado en **Diagrama 1** se indican las principales operaciones, detallando las etapas del proceso.

Cabe aclarar que cada operación unitaria en sí se puede representar en un diagrama de procesos, que se omiten en el presente trabajo porque el objetivo del mismo es lograr un proceso sucro-alcoholero más sustentable derivado del proceso de clarificación, que es el más importante y complejo de todos los procesos de la obtención de azúcar.

La operación unitaria de clarificación del jugo de caña involucra en sí la reacción entre el floculante agregado, lechada de cal o solución de sacarato de calcio, con los ácidos orgánicos y el anhídrido sulfuroso que contiene el jugo porque fue agregado primero, la floculación y la separación por acción de las fuerzas de la gravedad, sedimentación, que son tres operaciones a llevar a cabo confinadas en un mismo reactor con condiciones específicas a cumplimentar y en “proceso continuo” (Cardona Montoya 2009).

La operación unitaria de clarificación se inicia con la sulfitación, que es el agregado de SO<sub>2</sub> que reacciona químicamente con algunos componentes, baja el pH e inhibe algunos coloides que oscurecerían al jugo (Saska 2009).

Luego la Cal (Ca(OH)<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O) reacciona también y forma el barro que se separa por sedimentación (Thai *et al.* 2012; Thai 2013; Zossi *et al.* 2012).

Si se adiciona floculante, éste filtra al líquido durante su descenso en el tanque y arrastra a impurezas y coloides presentes con potencial Z de signo contrario que son atraídos por la carga electrostática del floc formado.

### **Clarificación:**

La operación unitaria de clarificación está compuesta por los siguientes procesos.

- Reacciones químicas.
- Aglomeración de partículas por fuerzas electrostáticas (floculación).
- Separación del jugo por sedimentación.

Los parámetros condicionantes para el proceso son:

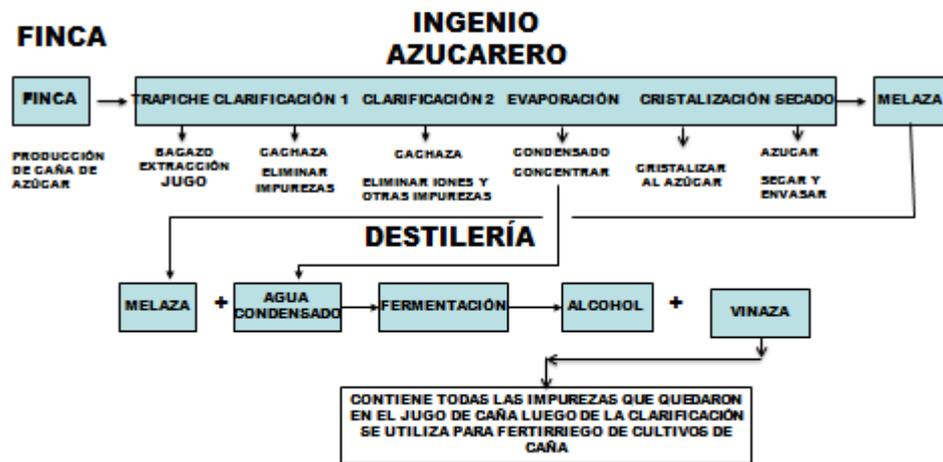
- Tiempo máximo de residencia del jugo de 1 hora (óptimo).
- Temperatura constante.
- Flujo constante.
- pH constante.
- Dosificación de cal o sacarato con control automático en función del pH.
- Reactor aislado térmicamente del medio con un coeficiente de intercambio de calor (energía) reducido que evite producir corrientes convectivas por enfriamiento del líquido a tratar.
- Reactor a presión constante, mayor que la presión de vapor del agua a la temperatura de trabajo, de manera de evitar la evaporación superficial.
- Control de descarga del líquido clarificado con mantenimiento de la presión de trabajo del reactor sedimentador.
- Control de descarga del barro sedimentado a fin de mantener estables las condiciones de trabajo del reactor sedimentador.

Las referencias del proceso de clarificación son Araujo *et al*, 2007; Borges *et al*, 2012; Doherty *et al*, 1999; Doherty *et al*, 2005; Doherty *et al*, 2009; Eggleston *et al*, 2002; Simpson 1995; Steindl *et al*, 2005; Steindl 2010; Walthew *et al*, 2002.

A continuación se presenta el esquema de bloques donde se indican las principales operaciones unitarias del proceso.

## PROCESOS DE OBTENCIÓN DE AZÚCAR Y ETANOL

Diagrama 1: ESQUEMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE AZÚCAR Y ETANOL



-Al incorporar al barro sedimentado más elementos químicos, nutrientes para las plantas de caña, se obtiene la mejora y secándolo se podría distribuir como fertilizante en los campos que carecen de riego y su aporte sería gradual evitando pérdidas por lavado (lixiviado) por las lluvias.

-Con el jugo clarificado (libre de impurezas) los equipos de transferencia de energía trabajarían más eficientemente (Doherty *et al*, 2003).

-La producción de alcohol con la melaza residual y/o con jugo directamente se vería facilitada al reducir la interferencia que producen algunos iones como el Ca y otros compuestos como el SO<sub>2</sub> y muy probablemente aumentaría el rendimiento de la fermentación.

-A su vez, la producción de alcohol generaría un efluente (vinaza) con menor nivel de carga orgánica y otros compuestos químicos, más fácilmente disponible ya sea en riego o para otros usos.

Si se suma el aprovechamiento del RAC (León *et al*, 2013) como combustible para los generadores de vapor, se puede programar la co-

generación de energía con un régimen de funcionamiento continuo durante todo el año, obteniendo con ello la posibilidad de negociar una tarifa mejor (LCMR: *Low Cost Must Run*, calificación del ENRE-MEM que le permite asignar carga continua).

Si se plantea el uso de la celulosa del bagazo como materia prima para obtención de derivados químicos, su utilización sería más amplia, quedando la celulosa como sub-producto con valor residual importante (Aguilar *et al*, 2010; Burk 2010; Filho 2011; Larrahondo 2012).

### **Planteo del problema**

El planteo presentado requiere considerar al ingenio como una fábrica con un proceso industrial al que se deberían instalar controles automáticos para todos los parámetros, control de todos los procesos y los elementos de seguridad para garantizar la operatividad, evitar la mayor parte de las pérdidas de productos azucarados y la acción adecuada frente a las contingencias.

Para lograr un proceso de clarificación eficiente es necesario además de una materia prima de composición constante el poder mantener condiciones de régimen estacionario en el clarificador, que únicamente se podrían alcanzar con sistemas de control del tipo predictivo o adaptativo.

Avanzando en la aplicación de procedimientos nuevos para realizar las operaciones unitarias de cada una de las etapas, se presentan opciones a considerar, como las que se enuncian a continuación.

Para la separación de los iones del jugo de caña durante la clarificación, emplear auxiliares como las zeolitas, con alta capacidad de intercambio catiónico, que capturan a los principales iones separándolos del jugo residual e incorporándolos a la cachaza, con la consecuente ventaja en el uso de ésta como fertilizante.

Para concentrar el jugo de caña, la eliminación de parte del agua contenida se podría llevar a cabo por medios físicos como la separación por membranas semipermeables (pre-concentración).

Además, para co-generar energía en forma eficiente y con un rendimiento alto durante todo el año, se requiere de la instalación de turbinas a vapor con condensación a baja presión con extracción intermedia y calderas con generación de vapor a la mayor presión posible compatible con el

combustible utilizado y con los demás usos en la industria para un régimen de trabajo constante.

Para poder condensar el vapor de escape de las turbinas a baja presión, a valores menores que presión y temperatura normales se requiere a su vez de la instalación de torres de enfriamiento con la capacidad suficiente para trabajar en la época de más alta temperatura ambiental y también disponer del agua tratada necesaria para compensar la evaporación que se produce.

Al efectuar un planteo integral de operación de un ingenio azucarero como una industria automatizada y con proceso continuo, el alcance de las medidas que se deben implementar amplían su campo de aplicación llevando a considerar a los productores de la caña como unidades operativas funcionales que, para asegurar la operación del conjunto, deben integrarse en un sistema de producción-elaboración de la caña.

Bajo el enfoque industrial, ya no es posible considerar en forma aislada a las unidades productoras de caña; éstas se deben incorporar a un sistema integral que se dirige en forma conjunta y coordinada de forma de mantener y asegurar la operatividad en régimen de todo el conjunto.

Es muy importante adoptar una política integral de trabajo que implica que la cosecha y entrega de caña se debe organizar y programar desde el ingenio, de forma que cada productor debe cumplir el programa de trabajo asignado, ya sea llevado a cabo por él o por el ingenio si el productor carece de la capacidad de gestión y/o de los medios necesarios para ello.

Los objetivos a satisfacer con un sistema organizado de la manera planteada, para cumplir con la secuencia de cosecha que establece el personal técnico del ingenio son los siguientes:

- Mantener un flujo de caña constante en tipo y cantidad al sistema de alimentación del ingenio.

- Reducir al mínimo el tiempo de retención de la caña cortada sobre el transporte, sobre todo durante las horas de mayor temperatura ambiente.

- Reducir al mínimo las variaciones que se originan por los diferentes sustratos de los cuales proviene la caña, por las distintas variedades, diferentes grados de madurez, y también uso de diversos productos químicos como fertilizantes, auxiliares de maduración, etc.

- Reducir las variaciones de composición química del jugo para lograr un proceso de clarificación ajustado y optimizado que elimine la mayor cantidad de impurezas, no azúcares, del jugo y con ello una melaza y luego de la fermentación y destilación de ésta, una vinaza con menor DQO y DBO y contenido de sales, haciéndola más apta al fertirriego.

El productor de caña debe integrarse al sistema productivo, ya que el cuidado de la producción se inicia mucho tiempo antes del corte y procesado de la caña y, para el productor (cañero), termina recién cuando la caña ingresa al proceso de extracción del jugo. Lo mismo, expresado en términos más sencillos, quiere decir que el productor debería asumir la responsabilidad de garantizar al ingenio que su caña llega en tiempo y forma al momento que se necesita esa carga para mantener constante el régimen de alimentación al sistema (*just in time*).

El productor debe, de acuerdo con el ingenio, buscar la variedad que más se adapta al tipo de suelo y zona climática en la que se encuentra, tomando en consideración en que isohieta (isoyeta) se ubica y temperaturas mínimas se pueden alcanzar en su unidad productiva, fertilización necesaria, fumigación y riegos en caso de disponer facilidad para ello, tipo de cosecha posible y demás variables a considerar para el caso particular.

Para el productor es importante tomar en consideración el microclima de su predio, fechas de posibles heladas, a fin de seleccionar la variedad y fecha de plantación con el objeto de poder anticipar la zafra a la época fría manteniendo un rendimiento acorde a la calidad y capacidad de soporte del suelo.

Dicha selección se debería llevar a cabo en conjunto con los demás productores de la zona dirigida desde el ingenio, que en última instancia es el que recibe la caña cortada y debe asumir las consecuencias de la desorganización cuando se juntan muchos productores que han cosechado su producción al mismo tiempo como resultado o en previsión de una posible contingencia climática pronosticada.

Para cumplir con este objetivo se debe necesariamente incorporar al cañero al sistema integrado con la dirección centralizada desde el ingenio, que dependerá de un centro de decisión basado en los programas de trabajo y de producción a cumplir.

Los productores de caña (los cañeros) deberían incorporar a su forma de trabajo las nuevas tecnologías que permiten el aprovechamiento completo de la caña y el máximo desarrollo del potencial energético de ésta.

Otro objetivo a sumar es el de implementar todos los medios posibles al alcance de los productores y del ingenio como organización administradora para maximizar la calidad de la caña, que es la materia prima del ingenio, limitando los medios de cosecha a la cosecha mecanizada.

Debería quedar totalmente aclarado que es imprescindible eliminar la cosecha manual, la quema y toda otra práctica que degrada y causa detrimento de calidad de la caña que llega al ingenio y que además produce la pérdida del RAC, siendo aplicables únicamente en terrenos que por desniveles y pendientes queda impedita la cosecha mecanizada.

Para maximizar el aprovechamiento de la caña como ente potencialmente apto para fuente de biomasa, se requiere que el RAC sea valorizado como fuente de energía y/o materia prima para obtención de productos químicos derivados de la celulosa, o alternativamente, como combustible, fuente renovable de bioenergía.

De acuerdo al sistema de cosecha mecanizada que se utiliza en Tucumán, la posibilidad de minimizar los costos de recolección y transporte del RAC sería la de acompañar a la cosechadora con dos unidades de carga, recibiendo por una parte a la caña cortada y a la par otro transporte que reciba el RAC que tiene menor peso que la propia caña, pero que es voluminoso y liviano, sobre todo las hojas secas de la parte inferior de la caña.

Seguramente se deberán efectuar ajustes y hasta quizás adicionar algún accesorio a las cosechadoras para poder cumplir adecuadamente con éste propósito.

Está también la opción de la recolección del RAC con enfardadoras, con la ventaja que se puede dejar en el suelo hasta que se seque lo suficiente como para evitar su fermentación y se simplifica el almacenaje y manejo del stock (Casen 2011).

La otra problemática es la del almacenaje in situ en el ingenio, que deberá disponer de espacio suficiente y adecuado para almacenar el RAC colectado, elevado para prevención de inundación y cubierto con film impermeable que evite se humedezca por las lluvias.

Los ingenios deberán evaluar cuál de los dos, si el bagazo o el RAC tiene mayor capacidad calorífica, y mejor capacidad de almacenaje sin tratamiento previo, por ejemplo el secado, triturado, etc.

Seguramente se requerirán varias temporadas de pruebas y ajustes hasta encontrar el *modus operandi* óptimo que al menor costo permita el máximo beneficio para ambos, el ingenio y el productor de caña, a su vez asegurando el mayor cuidado del medioambiente.

Desde el punto de vista de la generación de energía eléctrica es conveniente para el ingenio poder mantener la co-generación durante todo el año, sobre todo durante los meses de verano que es cuando mayor demanda energética se produce.

Entonces el enfoque general desarrolla el trabajo donde se analiza la posibilidad de mejorar el jugo de caña luego de su extracción, con un proceso de clarificación lo más completo posible de manera de obtener un jugo con la menor cantidad de impurezas (no-azúcares), y que permita producir azúcar blanco directo, con la menor cantidad de melaza y luego de la fermentación y destilación del alcohol, quede una vinaza apta para fertirrigación en cualquier tipo de suelo.

Cuando se produce alcohol con melaza con pocas impurezas, no azúcares, una posible opción que permite reducir la vinaza por unidad de alcohol producido, es la de reciclar ésta utilizándola para diluir parte de la melaza de manera que la relación volumen de vinaza por volumen de alcohol producido se reduzca sensiblemente.

Con el objeto de mostrar todo el potencial que tiene la caña como plataforma bioquímica que permitiría reemplazar al hidrocarburo para la obtención de numerosos productos químicos desde una fuente renovable y en muchos casos, con producción de biodegradables se presentan al final del Capítulo 4 los resúmenes donde se detalla la producción de bio-productos elaborados en base a la celulosa proveniente del bagazo (Burk 2010; Larrahondo 2012) y también de la sacarosa.

En Tucumán hay en funcionamiento a nivel experimental instalaciones para producción de fertilizante orgánico empleando metodología de formación de compost, donde la humedad requerida la aportan únicamente con vinaza, variando las proporciones relativas de los otros componentes. Se expondrán detalles del tema en el **Capítulo 5**.

Además de todas las posibilidades que tiene la celulosa, componente mayoritario del bagazo, se busca también la utilización de la vinaza, que arrastra todas las impurezas que quedaron en el jugo de la caña luego de la clarificación.

## CAPÍTULO 3

# DESARROLLO DEL TRABAJO

✓ **¿Qué es la Caña de Azúcar?**: Es una gramínea perenne que se desarrolla preferentemente en climas cálidos y húmedos, cuya savia tiene un alto contenido de sacarosa, tal como se detalló en la Introducción.

Como todo producto de origen natural tiene dependencia de muchos factores, variando su composición y los productos químicos que contiene, dependiendo de las siguientes causas.

### **Factores que afectan la composición química del jugo de caña**

Los principales factores que afectan la composición química y “calidad” de la materia prima y a consecuencia al jugo son:

**Variedad de la caña.**

**Grado de madurez al momento de la zafra.**

**Edad del cultivo.**

**Tipo de suelo.**

**Isohieta (isoyeta).**

**Condiciones meteorológicas del ciclo de crecimiento:** (del ciclo productivo y los eventos climáticos de ciclos anteriores que también afectan la producción, como p. ej. heladas tardías, stress hídrico, etc.).

**Productos químicos agregados (fertilizantes, maduradores, etc.).**

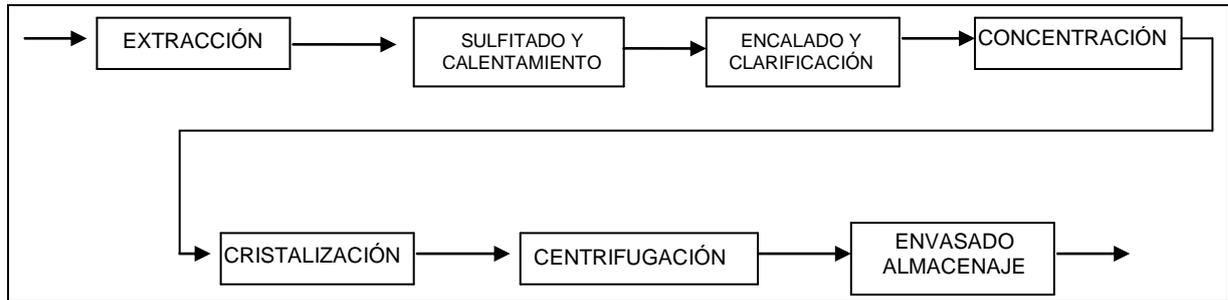
**Método de zafra (corte y carga al transporte).**

**Condiciones meteorológicas inmediatamente anteriores, o durante la cosecha.**

**Calidad de cosecha.**

**Tiempo entre corte e ingreso al proceso (trapiche ó difusor).**

**Diagrama 2: ESQUEMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE  
OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DEL JUGO DE CAÑA**



Del análisis global del proceso esquematizado arriba se separan las diferentes Operaciones Unitarias que lo conforman y se detallan a continuación las operaciones básicas que componen cada etapa.

## *Extracción*

### **Preparación de la caña para extracción de la savia (jugo)**

Es un proceso físico de cortado, triturado y prensado para la extracción de la savia, y en la última etapa se agrega un lavado en contra corriente de la fibra residual, bagazo, que queda como un sub-producto importante.

La operación fundamental de esta etapa del proceso es el prensado que por la fuerza mecánica aplicada a través del molino utilizado deja a la fibra residual con una humedad reducida al 50/52 %.

El bagazo se utiliza casi en su totalidad como combustible para la generación de vapor, quemado en calderas bagaceras.

En algunos ingenios se separa la médula y la fibra se utiliza en la fabricación de papel, agregando al bagazo a quemar parte del fino separado, que por el estado de disgregación en que se encuentra, debe ser manipulado con atención especial.

El líquido proveniente de la extracción, llamado en adelante “jugo de caña” o simplemente “jugo” se encuentra contaminado con las bacterias, hongos y levaduras propias del ambiente, que lo degradan rápidamente, **siendo el siguiente proceso el de sulfitado.**

En el **ANEXO I** se detallan las etapas previa introducción donde se explicita el efecto causado por la contaminación con Dextrano.

### ***Sulfitado***

**El sulfitado** destruye las bacterias y los hongos y también acidifica al jugo bajando el pH hasta valores que pueden oscilar entre 3,5 y 4 (Zossi *et al*, 2012).

### ***Calentamiento y encalado***

El aumento de la temperatura es fundamental para el siguiente proceso que es el de **Clarificación** (Saska *et al*. 2009).

Se aumenta la temperatura y se neutraliza la acidez llevando el pH a valores entre 6,8 y 7,2, que según el criterio aplicado, se puede hacer de una vez, o de dos o más etapas (Doherty *et al*, 1999; Id 2002).

Uno de los objetivos de la neutralización de la acidez, como se verá más adelante, es el de frenar el proceso de inversión de la sacarosa, cuyo mínimo se encuentra en los valores de acidez citados en el párrafo precedente, para la temperatura de trabajo que esta pocos grados debajo de la de ebullición a presión atmosférica a la que se encuentran las instalaciones (Eggleston *et al*, 2002).

En el conjunto de operaciones unitarias que componen cada proceso de las etapas que conforman toda la producción del azúcar, el proceso de clarificación se torna fundamental porque en adelante las siguientes etapas dependen en gran medida de la calidad del jugo que se obtiene por la clarificación (Borges *et al*, 2012).

Como “Calidad” del jugo se expresa el contenido de impurezas y no azúcares y cuanto “mejor” es la “calidad” es porque tiene menor cantidad de impurezas y por ende el proceso se torna más eficiente.

# *Clarificación*

## **Análisis del proceso de clarificación**

Para la clarificación del jugo de caña recién extraído se pasa, irremediablemente por una etapa de sulfitación, que es cuasi obligatoria por las condiciones de alta contaminación que se producen principalmente durante el transporte de la caña cosechada y luego cuando ingresa al sistema de extracción, mesa alimentadora, trapiches y sistemas de bandejas y tanques colectores del jugo extraído, bombes y demás accesorios para el transporte del jugo crudo.

Superada la instancia de adición del  $\text{SO}_2$  el jugo pasa al calentamiento, etapa que debe ser llevada a cabo en un tiempo muy corto a fin de evitar la inversión de la sacarosa, que aumenta a valores de pH bajos (mayor acidez) con aumento de la temperatura. Con pH alrededor del valor 7 (neutro) la velocidad de inversión disminuye considerablemente para las altas temperaturas de trabajo que se requieren al inicio del proceso de concentración del jugo (Borges *et al*, 2012).

El jugo calentado pasa al encalado, que consiste en la adición de lechada de cal o de sacarato de calcio con el objeto de aumentar el pH hasta valores que oscilan entre 6,8 y 7,2.

Del tanque de encalado pasa a la adición de floculante que acelera la separación de los sólidos sedimentables, pasando al decantador donde se produce la separación por sedimentación (Simpson 1996; Egglestone *et al*, 2002; Doherty *et al*, 2002; Cardona 2009; Egglestone *et al*, 2009).

Hay instalaciones donde se prepara la lechada de cal con jugo clarificado que forma el Sacarato de Calcio, que se adiciona al jugo con las siguientes ventajas.

- Evita la dilución del jugo que se produce al agregar agua con la lechada de cal.
- Una vez preparada la mezcla de cal con jugo se mantiene a una concentración estable más fácilmente.
- Con el sacarato se puede dosificar mejor el agregado de lechada.

El orden y la secuencia de las operaciones pueden cambiar de acuerdo al criterio que establece cada ingenio para llevar adelante el proceso de clarificación del jugo de caña.

Del clarificador salen dos corrientes, el jugo crudo limpio por una parte y el lodo sedimentado que arrastra los productos separados (los SS) por otra parte.

El jugo limpio pasa al concentrador donde se inicia el proceso de concentración, eliminar el agua que contiene, de manera que se reduce la inversión y la posible degradación por fermentación.

### **Observaciones**

En muchas instalaciones observadas en los ingenios se nota que han descuidado la aislación térmica del decantador trayendo como consecuencia que el funcionamiento del mismo se vea perjudicado por las corrientes convectivas originadas por los gradientes de temperatura, que producen circulación del jugo en sentido vertical ascendente/descendente oponiéndose a la sedimentación que es la separación de los elementos más pesados del jugo que se desplazan también en sentido vertical pero solo descendente.

Para que la sedimentación se desarrolle con eficiencia, la masa líquida en la que se produce debe moverse con flujo laminar en sentido horizontal, ya que cualquier otro sentido del movimiento y/o turbulencia en la masa líquida provocaría interferencia en la sedimentación y, cuando los movimientos son turbulentos provoca la destrucción del floc formado.

Las fuerzas que actúan en la sedimentación son producto de la diferencia de densidad entre el líquido en que se encuentran suspendidas las partículas y éstas, aumentando cuanto más se compacta el material a sedimentar, siempre a temperatura constante.

Si variamos la temperatura del líquido se producen interferencias en la separación de las partículas por las siguientes razones:

- Se producen corrientes de convección que interferirían la sedimentación, removiendo toda la masa líquida, porque la parte más fría tendería a descender y la parte del líquido a más temperatura tiende a ascender.

- La mayor densidad del floculo formado es la causa del descenso y separación del mismo. Si se disminuye la temperatura del líquido se reduce la diferencia de densidades entre la partícula a sedimentar y el líquido que la rodea, retrasando el proceso que puede llegar hasta su detención.

Entre ambos procesos, sedimentación de las partículas presentes en un líquido, y convección natural, hay una diferencia que se explicita cuando se compara la respuesta de cada uno frente a los fenómenos que se pueden producir.

### **Sedimentación:**

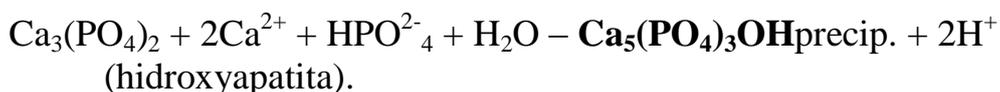
**Fuerzas de sedimentación:** originadas por la diferencia de densidad entre líquido y partículas.

**Velocidad de sedimentación:** Las fuerzas gobernantes están dadas por la viscosidad del líquido, que varía en función inversa a la temperatura a la que se encuentra.

Para la clarificación del jugo una reacción que se produce es entre el CaO hidratado y el fosfato ( $P_2O_5$ ) presente formando Fosfato de Calcio cuya solubilidad en medio acuoso es baja y precipita.

Las reacciones de precipitación forman al inicio fosfato mono y di cálcico:  $(Ca(H_2PO_4)_2)$  y  $(CaHPO_4)$ .

Los compuestos que se forman, si bien son insolubles, son algo inestables pudiendo producir cierta reversibilidad en las reacciones, que en caso de generarse, llevaría a la formación de otros compuestos más estables, siendo las principales reacciones que se producen durante el agregado de lechada de cal al jugo a clarificar a saber (Marín 2012).



## **Convección natural**

*Fuerzas de convección natural:* Se originan por la diferencia de densidad entre las partes de líquido que se encuentran a diferentes temperaturas.

*Velocidad de la convección natural:* Aumenta con la diferencia de temperaturas en relación directa, llegando a su máximo en el punto de ebullición en el cual las burbujas del vapor que se forman aceleran el ascenso del líquido.

Se observa que la convección cuyo origen está en la diferencia de temperatura entre diferentes zonas del fluido aumenta en función de la inestabilidad que produce una zona con diferencias de energía respecto de otra zona del mismo fluido.

Al aumentar la temperatura del jugo su densidad baja y si todo el volumen de líquido se encuentra exactamente a la misma temperatura se puede suponer que la sedimentación se ve favorecida por la menor densidad del jugo en esas condiciones de alta temperatura.

El aumento de temperatura del jugo produce un aumento del volumen por unidad de peso, disminución de la densidad, haciendo que el jugo caliente sea más liviano que el jugo más frío, generando una fuerza ascensional que lo eleva, ubicando las capas de mayor temperatura en la superficie del tanque sedimentador.

Cuando el jugo en el sedimentador se enfría aumenta su densidad y por ende disminuye la diferencia entre la mayor densidad del floculo y el líquido en el cual se encuentra (diferencia muy pequeña), haciendo que se retrase la sedimentación y se dificulte la clarificación reduciendo su eficiencia.

Cuando el jugo caliente de la superficie, si la misma se encuentra a PTN y como la presión parcial del vapor es mayor que la que corresponde al equilibrio a la presión atmosférica, se produce evaporación del líquido con el consiguiente consumo de energía y descenso de la temperatura de la capa superficial de jugo, que al enfriarse vuelve a descender para mantener el equilibrio del líquido.

Este descenso de la capa superficial, como se produce en toda la superficie y sobre todo en la periferia, por el descenso de temperatura por las pérdidas de calor por la pared del tanque, produce una agitación que interfiere

con la sedimentación, que para producirse requiere del descenso paulatino de toda la masa de floc producidos.

El efecto descrito, originado por la evaporación superficial que se produce por efecto propio de la alta temperatura a que se encuentra el jugo y por la carencia de una aislación externa adecuada para la diferencia de temperaturas de que se trata, hace que la separación de los sólidos se interfiera reduciendo notablemente la eficiencia del proceso.

En un sedimentador de flujo radial, en estado estacionario, la zona de ingreso del fluido con los floc formados es el centro y al ir disminuyendo la velocidad del flujo a medida que el fluido se desplaza hacia la periferia se estabiliza produciendo el descenso de los floc, de manera tal que al llegar un volumen unitario de fluido a la descarga periférica el floc alcanzó a quedar depositado en el lecho incorporándose a la masa de lodo asentado.

Si por aislación deficiente o por efecto de evaporación superficial se producen corrientes convectivas, estas se oponen al asentamiento de las partículas formadas aumentando el tiempo de residencia necesario y en casos extremos destruyendo el floc formado por efecto de las corrientes cruzadas en la masa del fluido.

### **Condiciones para que el proceso de separación sea eficiente**

Para que el proceso de sedimentación ocurra en condiciones normales con el jugo a la alta temperatura a que se encuentra, se deben tener las siguientes condiciones:

Tanque de sedimentación totalmente aislado térmicamente con un coeficiente total superficial tal que la pérdida de energía no produzca interferencias al proceso de sedimentación.

Tanque de sedimentación cerrado presurizado a presión de trabajo mayor que la presión atmosférica del sitio, más la presión parcial del vapor de manera que impida la evaporación del jugo a la temperatura a que se encuentra.

Calibrar las descargas de jugo claro y de barros para mantener la contrapresión a que trabaja el tanque, que se pueden regular con densímetros continuos instalados sobre las líneas de descarga de líquido y de lodos.

Para que un tanque sedimentador pueda funcionar en las condiciones descritas, se deben adicionar dispositivos que generen la contrapresión adecuada en las descargas de jugo clarificado y de lodo para que el proceso se desarrolle eficientemente.

Encontrar la solución adecuada para llevar adelante una instalación que cumpla con las especificaciones es un desafío a la ingeniería de procesos.

Aquí es donde se presenta un problema que complica la regulación del funcionamiento y que requiere de la automatización y de un diseño especialmente elaborado para mantener a ambos flujos, tanto el de lodo como el de jugo claro.

El lodo puede variar su consistencia, su cantidad y también su peso específico requiriendo de un sistema que mantenga la contrapresión equilibrada de ambas corrientes que descargan del sedimentador, a fin de poder regular el flujo. Este sistema debe poder auto regularse manteniendo el nivel de jugo claro y de los sedimentos depositados en el fondo.

Un sistema sencillo básico podría estar compuesto por tubos paralelos de descarga de ambos, jugo clarificado y lodos, instalando un sistema compensador que actúe reduciendo paulatinamente el flujo de jugo claro si se reduce el flujo de lodos, dentro de ciertos límites y con descargas de sobre-nivel de seguridad y con sistema de aspiración de lodos si la tubería se obstruyese.

También se podría incorporar al sistema de control un equipo capaz de medir la densidad del flujo de sedimentos (lodo) reduciendo el caudal de descarga en función inversa con ésta, la densidad.

Como en todos los equipos industriales, el diseño y la construcción se deben de llevar adelante bajo la estricta condición de poder efectuar el mantenimiento y limpieza necesarios fácilmente y de dejar los elementos suficientes para el ajuste y control operativo, que son puntos de toma de muestra, conexiones para indicadores, visores y sensores suficientes para instrumentar el control operacional.

Otra forma de resolver el problema que presenta la sedimentación a alta temperatura en un tanque abierto que trabaja a PTN, es la de instalar todo el sedimentador y los bombeos de jugo y lodos en un recinto cerrado presurizado a un valor tal que evite la evaporación del jugo caliente, y con ello asegure una separación de partículas en condiciones óptimas.

Una vez obtenido el jugo clarificado es conveniente un filtrado con el menor tamaño de malla posible que asegure la homogeneidad del mismo, a través de un equipo automático, auto limpiante apto para productos alimenticios.

En relación al producto fabricado, azúcar, todos los equipos deberían tener diseños del tipo sanitario apto para uso alimenticio, asegurando de esa manera dos condiciones fundamentales de trabajo:

- Que se puede desmontar fácil y rápidamente en cada paro para limpieza.

- Que el nivel de contaminación con bacterias, levaduras, etc. sea mínimo, con un diseño similar a los equipos que procesan alimentos llamado diseño sanitario.

Retomando el proceso de producción, en éste punto se debería instalar un tanque pulmón que permita disponer del tiempo suficiente para efectuar los controles de rutina del jugo a clarificar y poder efectuar ajustes y correcciones para optimizar el proceso de clarificación de manera de evitar que se produzca una tendencia que desvía del objetivo al proceso, que sería un tanque ecualizador, previo a la entrada al clarificador.

## ***Control del Proceso***

El concepto a aplicar debe considerar la necesidad de mantener el control de la producción en forma continua y disponer del tiempo necesario, que lo determina el volumen del tanque pulmón y el régimen de flujo al que se está trabajando, para efectuar los ajustes del proceso por cambios en la composición.

Los cambios en la composición del jugo son una constante por el origen de la materia prima, salvo que la misma provenga de un mismo productor y sean de lotes semejantes, donde se reducen las variaciones de composición.

Para lograr que el proceso llegue a la máxima eficiencia, se requiere de un sistema de control “on-line” que reduzca al mínimo estas variaciones de la composición del jugo a clarificar por las siguientes razones:

✓ Permite establecer el periodo entre paradas de limpieza de equipos y alarga los ciclos de trabajo, evitando o reduciendo al mínimo el trabajo con baja eficiencia de transferencia de energía.

✓ Control del ensuciamiento tanto del lado de evaporación como del lado de la condensación de los vapores en el segundo cuerpo (calentamiento con el vapor del primer cuerpo, que llaman vapor vegetal).

✓ Control de la calidad de la producción a través del control del color (Índice ICUMSA).

✓ Control de la composición química de la vinaza, haciéndola más *amigable* con el ambiente.

Para poder controlar el ensuciamiento del lado del vapor del segundo cuerpo se deben eliminar durante el proceso de clarificación los VOC, ceras y demás productos que podrían ser arrastrados por el vapor del primer cuerpo y depositados en la superficie de condensación de los caños del segundo cuerpo.

Una clarificación eficiente que tenga la opción de eliminar todas esas impurezas requiere de monitoreo y ajustes continuos tanto en la dosificación de lechada de cal (o de sacarato), de los floculantes agregados y de la temperatura, que se debe mantener constante, etc.

Se considera conveniente detener el proceso de molienda por lo menos una vez por día, para limpieza y desinfección de los equipos de extracción de jugo, de tratamiento y preparación del jugo.

### **Opción: Segunda clarificación**

Dada la gran variación que se produce en la composición química del jugo a lo largo de la zafra, producto de la diversificación de la composición del jugo de la caña, se recomienda una segunda etapa de clarificación que permita un ajuste fino del tratamiento del jugo ya clarificado en una primera etapa, en otras palabras, un refinado del jugo crudo.

Se entiende que de esta manera se pueden sumar al proceso de clarificación la acción de elementos de alta capacidad CIC que muy probablemente se saturarían si se utilizan en la primera etapa de una vez mezclados con la lechada de cal y/o el floculante.

A continuación se pasa a desarrollar el proceso que idealmente sería el que podría lograr la mejor composición del jugo clarificado y las ventajas que implicaría.

### **A-Producción de caña**

Organizar la cosecha para.

- ✓ Mantener la misma variedad, grado de madurez de la caña y edad del cultivo.
- ✓ Que provenga de suelos de composición similar con las menores variaciones de tipo.
- ✓ Que el/los productores estén utilizando los mismos compuestos químicos tanto para fertilización, aceleradores de maduración, fumigación, etc., con el objeto de reducir a un mínimo las variaciones de composición del jugo crudo.
- ✓ Mantener el mismo sistema de cosecha para todos los lotes.
- ✓ Organizar la entrega de manera que el tiempo de estadía en el transporte sea mínimo.
- ✓ Disponer un plan de mantenimiento de los equipos de trabajo de campo, asegurando la prestación sin interrupciones fuera de programa.

### **B-Extracción del jugo**

En el ingenio.

- ✓ Incluir como parte de la programación el paro para limpieza diaria de los equipos de extracción del jugo de caña.
- ✓ Adaptar las instalaciones de recepción y alimentación de caña para efectuar lavado y desinfección periódicos.
- ✓ Adaptar a los molinos para limpiezas periódicas y desinfección total de las instalaciones.

✓ Como adicional, se debería adaptar la instalación de alimentación de bagazo a la/las caldera(s) para una automatización total.

✓ El primer punto mencionado de “Mantener la misma variedad y grado de madurez de la caña” se refiere a la necesidad de trabajar con lotes semejantes que tengan la menor variación entre los elementos que lo componen y de esa manera obtener un jugo donde la composición sea lo más constante posible.

✓ Evitando las mezclas de variedades o de caña de distintas parcelas se reducen los cambios en la composición del jugo y para la clarificación se asume que se puede mantener constante en el tiempo la dosificación.

✓ Si se producen cambios en la composición y se quiere mantener la eficiencia de la clarificación, se requieren ajustes en los productos agregados, que seguramente producen cambios en la temperatura de mezcla, y en menor grado en las características físicas del jugo, que aunque mínimas, bajarían el rendimiento de la sedimentación.

✓ El control de la temperatura es importante en el proceso de clarificación, porque si ocurren cambios de temperatura en el flujo del jugo que ingresa al sedimentador, se generan movimientos internos de las zonas del jugo a diferentes temperaturas que interfieren la separación de partículas y sedimentación de los floculos.

### **Control del proceso de Clarificación**

Es una operación unitaria de lo más compleja ya que se adicionan productos debiendo implementarse el control de la cantidad adicionada en función de los valores que tiene el jugo y que pueden ir cambiando lenta o bruscamente, condicionados por la caña ingresada al trapiche, porque el primer producto agregado ( $\text{SO}_2$ ) reacciona con varios de los compuestos contenidos en el jugo y esas reacciones forman nuevos productos que a su vez reaccionan con la lechada de cal o el sacarato de calcio que se adiciona después y que forma nuevos compuestos y modifica el pH.

Los parámetros más fácilmente medibles en forma continua y que se adaptan para llevar el control on-line de la adición de productos son el caudal, pH, temperatura, densidad y turbidez del jugo.

- El caudal, color o turbidez, temperatura y pH deberían ser utilizados para el control de la adición del SO<sub>2</sub>, de la lechada de Ca(OH)<sub>2</sub> (ó sacarato) y del floculante en caso de utilizar.
- El control de la temperatura es muy importante para minimizar y mantener bajo control las pérdidas de sacarosa por inversión.
- Es importante también para mantener la temperatura constante para, de esa forma, mantener las condiciones óptimas para la sedimentación.
- En un solo proceso combinado se adicionan dos o más productos más energía, se producen reacciones químicas que forman nuevos productos y se separan los compuestos sedimentables, es necesario controlar siguiendo pautas establecidas que solamente se obtienen con ensayos.

Como tanto la adición del SO<sub>2</sub> en forma de gas, como la solución acuosa de Ca(OH)<sub>2</sub> o de sacarato producen reacciones químicas que modifican la composición del jugo, requieren de un cierto tiempo de reacción, función de las concentraciones, temperatura y demás condiciones del sistema considerado.

Todo este proceso debería poder ser llevado a un régimen estacionario, con las mínimas variaciones admisibles propias del sistema de control a instalar, que puede ser un PID, Predictivo o preferiblemente Adaptativo, etc.

El proceso se podría controlar a través del monitoreo del jugo de entrada evaluando algunos de los parámetros representativos medibles en forma continua como son la Temperatura, pH, Densidad, ° Brix, color, turbidez, etc. que permita a través de un programa de computación predecir la adición necesaria de SO<sub>2</sub> y de lechada de cal (o sacarato), del floculante, reduciendo de esa manera las variaciones.

Las reacciones que se producen requieren de un mezclado homogéneo y del tiempo necesario para que la reacción llegue a completarse y se formen los productos que precipitan, que se formen los floculos en toda la masa del tanque, con un gradiente tal que hacia la periferia, que es la zona donde se produce la descarga del jugo clarificado, ya no tenga presencia de productos sedimentables y se descargue lo más limpio y claro posible.

Para lograr una clarificación eficiente es conveniente que la adición de productos sea controlada y la mezcla se lleve a cabo en un sistema mezclador on-line que mejora la homogeneidad evitando diferencias de concentración

que generarían variaciones en el fluido y que podrían llegar a producir interferencias en la sedimentación cuando el jugo ingresa al tanque sedimentador.



**Figura 5: MEZCLADOR  
CONTINUO *ON-LINE***

Para la adición del  $\text{SO}_2$  es difícil modificar el sistema empleado actualmente por la practicidad del mismo y porque la distribución del sulfito en el jugo es muy homogénea, debiendo asegurar la regulación del régimen del quemador en función del caudal de jugo que ingresa.

Como la adición de lechada de cal es algo más complejo porque la misma puede variar en concentración, el ingenio debería implementar un sistema que asegure que la concentración sea la predeterminada para uso, medida generalmente en  $^\circ$  Baumé (densidad), que es un parámetro medible on-line, con alguna complicación, pero es evaluable y se puede ingresar al sistema de control de adición (PLC o computadora) con objeto de ajuste del caudal y mantener siempre la cantidad necesaria de cal, que es el compuesto que reacciona. Adicionarlo de forma automática controlada ayuda a mantener constante la temperatura del líquido en el sedimentador.

Se debe tener especial cuidado con el agua que se utiliza para formar la lechada de cal, que debe ser limpia y exenta de impurezas y la instalación de preparación debe disponer de un filtro ya que es común que la cal contenga arena. Para mantener el sistema de alimentación de cal en funcionamiento continuo es recomendable disponer de una instalación de preparación de la lechada donde se ajusta la concentración según los valores estipulados y un tanque de pulmón donde es enviada la lechada preparada, con un sistema de agitación que mantenga homogénea la solución a ser mezclada con el jugo.

En este tanque pulmón se deben mantener constante la concentración y la temperatura.

### **Etapa de CLARIFICACIÓN**

Este proceso se desarrolla en un tanque especialmente diseñado llamado sedimentador que permite la separación de los sólidos del líquido, que queda clarificado.

El proceso de clarificación requiere que se disponga del tiempo de retención hidráulico mayor que el mínimo necesario para la formación del floculo y que este se desplace hasta el fondo del sedimentador y forme parte del barro a descargar. Durante el recorrido el floculo “filtra” al líquido del tanque y retiene las partículas coloidales que se “adhieren” por diferencias de potencial (potencial Z de cada partícula).

Además el sedimentador, debe cumplir las condiciones descritas previamente para cumplir lo más eficientemente posible con el proceso de separación de los SS.

El balance de masa es una forma indirecta de medir la eficiencia de cada una de las etapas del proceso, muy precisa en la medida que las mediciones de los flujos se realicen en forma adecuada.

Para disponer de la información sin retardos, es necesario que los registros de datos se ingresen a un programa que elabore las mediciones y las transforme en valores aplicables al cálculo.

Como el balance de masa es el resultado de la comparación de los datos medidos entre el ingreso y la salida de producto en cada etapa u operación unitaria analizada, se debe tomar la precaución de validar los datos estableciendo condiciones de lectura para régimen estacionario que desestimen los valores cuando el régimen de trabajo presenta variaciones importantes (oscilaciones), por ej. cuando está en etapa de arranque.

Se recomienda ello porque existe un retardo entre la medición de los valores de entrada y los de salida del sistema evaluado (según la operación unitaria considerada) y ello puede producir errores en la apreciación. Este tiempo debe ser tenido en cuenta para efectuar los ajustes necesarios entre valores medidos de entrada y salida.

Aquí podemos aplicar dos criterios de trabajo:

a) Balance global de entradas y salidas, tomando la sumatoria de todo lo ingresado y de todo lo salido del sistema, que informa con mucha precisión sobre las pérdidas que pudieran tener los diferentes equipos que componen la etapa. La información estará disponible por etapa evaluada. Para aplicar esta forma de evaluación se deben establecer periodos muy precisos de medición, continuos y secuenciales, estableciendo pautas concretas de acción y también tener en cuenta el volumen del producto en proceso en la etapa.

b) Balance global del flujo de entrada y salida, evaluando la etapa como si fuera una “caja negra” de la que solamente tenemos la información global, con la limitación que no muestra las pérdidas de arranque, puesta en marcha y cuando hay variaciones en el régimen.

Este sistema es útil cuando el régimen de trabajo entra en estado estacionario, proveyendo una respuesta inmediata y relativamente precisa del funcionamiento de todos los equipos de la etapa, pero se pierde precisión cuando hay variaciones bruscas complicando la determinación de las pérdidas ocasionadas por rebases, lavado de equipos, etc.

Tal como se plantea en el **Diagrama 3** del **Anexo I**, es difícil obtener físicamente un equipo que posibilite ambos procesos a la vez, porque para la separación por flotación es necesario introducir una corriente de jugo que arrastra aire incorporado por efecto de una presurización, liberándolo en el fondo del recipiente y dejando que las burbujas, que son micro-burbujas, durante el ascenso entren en contacto con las partículas de impurezas y restos de floc formados y los arrastren a la superficie incluyéndolos a la espuma, que se elimina por un raspador de la superficie.

En cambio una sedimentación es posible únicamente con un líquido en estado de reposo donde puedan actuar las fuerzas de gravedad haciendo descender los floc formados y que en su recorrido filtran al jugo y arrastran la mayor parte de las partículas y coloides que se adhieren por atracción electrostática por efecto de la carga eléctrica que tiene (potencial z).

En la práctica agregar una etapa de sedimentación con separación de espuma requiere de equipos especiales y trabajar también en condiciones muy controladas tanto de evaluación del producto a tratar, jugo de caña de la primer clarificación, como en los aditivos que se deben adicionar, dosificados en función del producto.

Lo que se requiere es la determinación de las variables posibles de medir, que sean las condicionantes de la floculación y separación de sedimentos y de la espuma del jugo en la segunda clarificación.

Como el jugo de caña es un producto con grandes variaciones, la eficiencia de esta segunda separación de compuestos, solubles en su mayoría, depende de la homogeneidad del producto a tratar y de las concentraciones y cantidades de aditivos a incorporar y esto es función de la posibilidad de detectar cambios por medición de parámetros representativos que sean medibles.

Para lograr la máxima eficiencia en la separación de no-azúcares, es necesario ir controlando la composición del jugo y corrigiendo la adición de aditivos y floculantes a medida que se detectan variaciones.

Considerando este punto con la importancia que tiene para logro de un jugo limpio que deje poco ensuciamiento a su paso por los tachos y concentradores se debe elaborar un plan de monitoreo del jugo recién extraído a fin de la detección temprana de las diferencias originadas por la materia prima heterogénea.

El agregar una segunda clarificación implica que el primer sedimentador debe descargar el líquido a un tanque ecualizador donde se atenúan las variaciones de la composición química que pudieran haber permanecido a través de los sistemas previos, o que se hubieran generado por alteraciones durante alguno de los procesos, con la limitación que el tiempo debe ser el menor posible, para evitar la degradación de la sacarosa, ya sea por inversión y/u otros procesos.

Sobre el tanque ecualizador se deben tomar las mediciones y análisis necesarios para el control de la segunda clarificación.

El sedimento formado durante la decantación pasa a filtrado donde se lava el azúcar residual que ha quedado retenido en la humedad que arrastra, con una corriente de agua limpia, generalmente condensado de vapor vegetal.

El agua de lavado de ambos filtros se retorna a inicio del proceso, o sea al tanque de sulfitado, a fin de evitar arrastre de bacterias que pudieran estar en la malla del filtro, en las tuberías, bombas y elementos del circuito.

Este procedimiento de trabajo debería estar acompañado de un instructivo escrito que, como ayuda de memoria, genera la mayor

probabilidad que las acciones se lleven a cabo de la misma manera, independizando en cierto grado la realización del trabajo del conocimiento previo de los operarios.

Este criterio de trabajo toma especial importancia en las tareas que guardan relación directa con el desempeño ambiental del proceso y reducen la posibilidad de que se produzcan contingencias ambientales.

## CAPÍTULO 4

# COMPONENTES DEL TALLO DE CAÑA

En el **Anexo II** se presentan en detalle los principales componentes de la fibra y del jugo de caña.

## Hacia la producción más sustentable

### Pasos a implementar

Las condiciones para ello son las siguientes:

- **Integración en una unidad productiva a las fincas cañeras y al ingenio que utiliza la caña como materia prima.**

La integración expresada en el párrafo precedente implica que la implementación de la planificación y programación del trabajo a llevar a cabo en ambos establecimientos, tanto el agrícola como el industrial, se realice desde una oficina que centraliza la coordinación y ejecución de las tareas que sean necesarias para el desarrollo de las actividades de producción en ambos.

Ésta coordinación es indispensable para la optimización de ambos procesos por la interrelación y dependencia del proceso industrial de la calidad y composición química de la materia prima.

Bajo otro aspecto, se puede considerar a la producción agrícola como equivalente a una producción industrial, con otro esquema de trabajo y con un sistema de elaboración diferente. Es una producción donde cada elemento componente de la planta es una fábrica en sí mismo y que utiliza un proceso que en condiciones normales está gobernado por las leyes de la naturaleza, que son marcadas por las condiciones meteorológicas a que está expuesta la unidad que produce.

En una fábrica se dispone de la materia prima y se controla el proceso pero en las plantas se pueden controlar solo algunos de los factores que inciden, la fertilización, la aplicación de pesticidas, y en casos con mayor tecnología, el riego, que es la provisión de un elemento vital para el desarrollo del crecimiento en condiciones óptimas.

Otro de los factores vitales y que es difícilmente controlable es la temperatura del medio ambiente, que tiene efectos muy negativos en el

desarrollo de la planta sobre todo cuando la temperatura mínima es menor que cierto límite durante periodos prolongados de varias horas (heladas).

Es por ello que se sugiere y recomienda la integración de ambos procesos, uno naturalmente desarrollado a una velocidad muy baja y que lleva meses para lograr un desarrollo importante y el otro, que requiere máxima velocidad para finalizar los procesos por la degradación que se origina al tener cambios en las condiciones del entorno del producto de interés.

Por ello se enfatizan los factores que inciden sobre el producto de interés y consecuentemente dificultan la elaboración de la materia prima.

Los factores que deben ser controlados que ya fueron enunciados se detallan a continuación en orden por la importancia de su incidencia tanto en el trabajo que se lleva a cabo durante el proceso de elaboración como en los rendimientos de producto final a obtener.

Lo que se busca con el planteo siguiente es algo que se puede esbozar intuitivamente como de máxima importancia por el hecho que cualquier proceso que elabora materia prima necesita que ésta sea lo más homogénea posible y de la mejor calidad y rendimiento disponible.

Del mismo modo que un proceso industrial, la planta de caña va a tener un desarrollo homogéneo si el flujo de “materias primas” necesarias para su crecimiento es medianamente constante a lo largo del tiempo que dura el ciclo y se mantiene la cantidad de nutrientes y agua necesarias.

De la misma manera que el productor cañero sabe que si las lluvias no llegan a tiempo el crecimiento se retrasa y el rendimiento de su producción disminuye notablemente, y si la plantación carece del fertilizante necesario sucede lo mismo, o que si le mezcla diferentes abonos los rendimientos varían, debería intuir que si su producción no llega a tiempo al proceso del ingenio o si llega con grandes variaciones, el rendimiento de éste, el proceso de elaboración disminuye por las dificultades con que se encuentra.

Las dificultades mencionadas en el párrafo precedente consisten en que si la materia prima es variable tanto en su rendimiento como en su composición, es imposible ajustar los parámetros de trabajo de la elaboración y la dosificación de productos a agregar en cada etapa.

Aumenta aún más las pérdidas de rendimientos del proceso industrial el hecho que las industrias elaboradoras de azúcar en Tucumán carecen de

instalaciones con control automatizado para todos los procesos unitarios que se llevan a cabo hasta la obtención del producto final.

Además, algunos de los elementos contenidos en el jugo de caña que condicionan la elaboración, como es el dextrano, son de difícil detección para un sistema de control automatizado que debería poder ajustarse en función del contenido de dicho compuesto en el jugo.

Al responsable del proceso en el ingenio le queda como solución el ajustar los parámetros de trabajo asumiendo que la composición del jugo de caña, su materia prima, se encuentra en las peores condiciones que generan mayor dificultad y asegurarse de esta manera que, aunque desperdicie algunos insumos, contamine en exceso al jugo con agregado de productos para tratamiento, etc. etc. el proceso de elaboración siempre y en todas las condiciones de trabajo permitirá obtener un producto final medianamente aceptable.

Las dificultades que se generan por ésta forma de trabajo se enunciarán más adelante.

Los principales factores que inciden en la calidad y la composición química de la materia prima son los que se enuncian a continuación:

### **Factores dependientes del suelo y ubicación geográfica del cultivo**

Algunos de estos factores pueden modificarse pero requiere mucho tiempo y son acciones cuya respuesta es lenta y con costos elevados, citando por ejemplo si es requerido el cambio de variedad que se necesita replantar. A los efectos del trabajo se consideran invariables.

- ✓ Variedad de la caña.
- ✓ Tipo de suelo.
- ✓ Grado de madurez.
- ✓ Edad de la plantación.
- ✓ Condiciones meteorológicas del ciclo de crecimiento (temporada interzafra), tomando interés si el cultivo ha estado sometido a estrés hídrico (temporadas con faltantes de aporte de agua) o heladas intensas

y de duración prolongada (temporada de zafra) que pueden afectar el crecimiento de la caña soca para el año siguiente.

- ✓ Fertilización aplicada y demás productos químicos utilizados.

### **Factores dependientes de la organización del trabajo y de su ejecución:**

- ✓ Sitios donde se cosecha (programa de cosecha).
- ✓ Tipo de cosecha (corte de la caña, manual o mecanizada).
- ✓ Calidad de cosecha.
- ✓ Condiciones meteorológicas inmediatamente anteriores, o durante la cosecha.
- ✓ Tiempo entre corte de la caña e inicio del proceso de extracción (entrada al trapiche).
- ✓ Riego de la plantación, si existe facilidad para ello.

Una vez elaborado una planificación acorde con los objetivos propuestos y una programación detallada de su ejecución, se pueden establecer pautas en el proceso productivo que permitan llevar adelante un forma de trabajo que provea el mayor beneficio a ambos, el área agrícola y el área industrial.

Las principales diferencias entre ambas áreas, que aunque conocidas conviene resaltar, son las siguientes.

### ***Diferencia entre cambios a implementar en sector agropecuario e industrial:***

**Sector Agrícola:** Los cambios que dependen del accionar de las personas tienen respuesta recién después de un tiempo prolongado por ej.

**Para que la fertilización sea efectiva se debe comenzar durante el inicio del crecimiento.**

La respuesta a los cambios es lenta y en algunos casos recién se comienzan a notar los efectos de un ciclo a otro. Además, los factores de mayor importancia que definen la calidad de la producción quedan fuera de control de las personas (*stress* hídrico, bajas temperaturas, etc.), salvo casos muy particulares.

***Sector Industrial:*** Los cambios se definen en respuesta a necesidades.

Se requiere una total adaptación por parte del ingenio a las condiciones de la MP buscando optimizar la relación de los elementos bajo control entre sí de manera de evitar pérdidas provocadas por un manejo deficiente en la provisión y/o por falta de adaptación del proceso.

Los elementos bajo control entre sí a que se refiere el párrafo anterior son, por ejemplo, la cantidad de SO<sub>2</sub> agregada al jugo y la dosificación de lechada de cal o sacarato, que deben estar controladas por un sistema automático de dosificación para mantener constantes las condiciones, según el programa de trabajo establecido para la composición química de la MP en proceso.

La adaptación del proceso a la MP implica que los ajustes de dosificación del SO<sub>2</sub>, adición de lechada de cal o sacarato y floculantes, si se incorpora su utilización, deben realizarse en función de la composición de ésta y para ello se necesitan evaluar *on line* los parámetros fundamentales representativos del jugo (Doherty *et al.* 2003; Ranucci 2012).

El monitoreo del jugo es un proceso difícil por el ensuciamiento que produce en los sensores, dificultando con ello las variaciones de dosificación, que se ven entorpecidas por carencia de posibilidad de medición precisa de ciertos parámetros, por ej. pH, densidad, Ce, requiriendo sensores autolimpiantes y mantenimientos frecuentes.

Como la MP es la “variable” que el ingenio debe aceptar en las condiciones en que la recibe, para poder mantener medianamente estable el proceso de producción, el ingenio debe establecer una dosificación promedio que se adapte y mantenga un rendimiento medianamente aceptable en el proceso (Saska *et al.* 2009).

La única manera que el área industrial puede acceder al manejo de la calidad de la MP y reducir las variaciones es por medio de una programación del trabajo que tome en cuenta todas las condiciones de los diferentes lotes y defina una secuencia de zafra que minimice las pérdidas y logre la mayor eficiencia posible buscando el equilibrio entre la Sacarosa obtenida, el rendimiento de la producción de alcohol y el nivel de concentración de los elementos residuales presentes en la vinaza, dependiente de los compuestos no eliminados en el proceso de clarificación.

Además, si el ingenio valoriza la cachaza aplicada en forma directa o si la utiliza para producción de fertilizante orgánico aplicando el proceso de compostaje incorporando también las cenizas, se deben tener en cuenta todos los gastos asociados para la evaluación de su utilización, que *aumenta* la sustentabilidad del conjunto.

**Resumen:** Los factores a tomar en consideración para la propuesta de un posible plan de trabajo del ingenio son:

- ✓ Estimación de la producción de caña de cada lote y/o área de condiciones semejantes (mismo tipo de suelo, variedad, edad de la caña, etc.).
- ✓ Determinación del proceso de clarificación a aplicar, para cada tipo de MP recepcionada.
- ✓ Predicción del rendimiento programado de obtención de sacarosa (blanco directo y crudo) para las condiciones de zafra de la caña.
- ✓ Programación de la relación melaza-jugo mixto (jugo clarificado + agua de imbibición) para obtención de alcohol, que define la cantidad de vinaza por litro de alcohol y su composición.
- ✓ Predicción del rendimiento de obtención de alcohol.
- ✓ Predicción de la posible composición química de la vinaza.
- ✓ Determinación del destino de la vinaza en función de su caudal y composición estimada (fertirriego, compostaje, etc.).

Además de los factores citados, en la elaboración del programa de cosecha se deberían de tener en cuenta las contingencias meteorológicas, los incendios de cañaverales y factores sociales como ser los paros o huelgas, etc.

Con el programa elaborado dar inicio a la actividad industrial con un cronograma que debería ser ejecutado en forma precisa y metódica evitando todo tipo de contingencias y cambios imprevistos. Este escenario describe una situación ideal cuya implementación es difícil de llevar a cabo, aunque en algunos ingenios se elabora un orden tentativo de cosecha cada 45 días.

El programa proveería una directiva que permite reducir las variaciones en la MP que ingresa y optimizar el tiempo entre el corte e ingreso al proceso.

También se debería asegurar la continuidad del flujo de MP que ingresa al ingenio, por la importancia que tiene la reducción de variaciones tanto de caña que entra al trapiche como el jugo que ingresa al proceso de clarificación.

Se debería tener especialmente en cuenta el detener el proceso cada período determinado para limpieza de los equipos, desde la mesa alimentadora, conductor, trapiches (molinos) y los elementos por los que circula el jugo crudo, tanque colector de jugo exprimido, bombeo de jugo hasta el ingreso al sulfitado, cañerías, bombas y todo elemento que esté o pueda estar en contacto con el jugo mixto.

Las demás etapas del proceso requieren limpieza periódica pero con periodos de trabajo que pueden ser más extensos y varían según la instalación en función del diseño de los circuitos de tratamiento del jugo y de los elementos y equipos componentes (Yu 2003).

Haciendo la simulación de lograr una eliminación de los no azúcares responsables del ensuciamiento de los equipos de concentración del jugo de caña, la obtención de la sacarosa cristalizada se modificaría sustancialmente, simplificando el proceso.

Para la eliminación química de las incrustaciones es importante identificar su composición. Además de algunos orgánicos los compuestos principales encontrados han sido Oxalato de Calcio, Fosfato de Calcio, Carbonato de Calcio, Sulfato de Calcio, Sulfito de Calcio y Silicatos (Grossmann 1970).

Con una clarificación que elimine la mayor parte de los compuestos que oscurecen al jugo se puede obtener un azúcar “de primera” apto para utilizar en productos con requerimientos estrictos de blancura sin necesidad de refinación, como son las bebidas azucaradas sin alcohol, que en los ingenios llaman “blanco directo”.

En primer lugar la obtención del azúcar blanco directo que no requiere la refinación produce ahorros importantes en energía y aunque ésta sea una variable no valorizada en los ingenios, se suman también los demás gastos de mano de obra, insumos y por sobre todo se reducen los impactos al ambiente.

Además se tendría una significativa reducción en mano de obra de limpieza y mantenimiento de equipos (Walthew *et al.* 1995). También se podrían suprimir el uso del pre-evaporador cuyo empleo elimina los vapores orgánicos y restos de ceras que arrastra el vapor del primer cuerpo y ensucia el lado de vapor del segundo cuerpo si se ingresa directamente el jugo a un evaporador multi-efecto.

El lado de vapor de un intercambiador del tipo de los usados, los multi efecto, es de muy difícil limpieza, por estar programado para limpieza del interior de los tubos, quedando el lado del vapor cerrado accediéndose únicamente por las conexiones de la tubería de vapor y la descarga del condensado.

Para limpiarlo, en el caso de ensuciamiento de los tubos del lado exterior, la única posibilidad es utilizando sustancias químicas que solubilicen los productos adheridos e inundando y dejando actuar los productos, que durante el tiempo de limpieza sacan de servicio al equipo.

### ***Opción para mejora del proceso***

Para reducir el contenido residual de no-azúcares en el jugo a procesar, se puede implementar una segunda clarificación donde se adicionan al jugo productos con muy alta CIC con el objeto de la eliminación de las sales solubles, iones, que de no ser eliminados seguirían en el jugo durante todo el proceso, quedando incorporados a la melaza.

Como consecuencia de una doble clarificación y a contrapartida se aumentaría el volumen de sedimentos a filtrar y con ello el volumen de cachaza que incrementa la necesidad y los costos del transporte de la misma a los campos de disposición.

Por otra parte se aumentan los nutrientes contenidos en ésta, la cachaza, incrementando el valor para la fertilización de los cultivos donde se aplica.

Como contrapartida se disminuirían los tiempos de limpieza y la frecuencia bajando los costos en relación directa con ello.

## **Sugerencias de trabajo:**

- a-** Integración de las actividades de campo e industria.
- b-** Clarificación con sacarato de calcio.

Con objeto de aclarar la orientación que se sugiere para obtener la clarificación lo más eficiente posible, se analiza lo publicado en el siguiente trabajo:

“*Sugarcane Factory Performance of Cold, Intermediate, and Hot Lime Clarification Processes*” (Eggleston *et al.* 2002), que resume los trabajos de relevamiento efectuados durante las zafas 1999 y 2000 en tres Ingenios del Estado de *Louisiana*, Estados Unidos.

La molienda fue de 521 *short ton/h*, que según la conversión equivale a 472,6 TC/h, produciendo 1900 Gal/min de jugo equivalente a 7326,9 litros/min.

Equivalencia: 1 *short ton* = 0.90718474 *metric ton* (Fuente: Wikipedia).

Describe los tres procesos, Clarificación con agregado de lechada de cal en frío, a temperatura intermedia y en caliente.

Del análisis de las tablas de resultados obtenidos se deduce claramente que el encalado en caliente es la mejor opción para disminución del color, sin aumento de las pérdidas por inversión.

En año 2012, con un intervalo de 10 años, el mismo autor publica un trabajo relacionado con la mejora que se obtiene cuando en lugar de agregar lechada de cal se controla la acidez con agregado de sacarato de calcio.

El proceso que desarrolla es el de formar el sacarato mezclando jugo clarificado con la adición de la misma cantidad de cal que para formar la lechada que se utiliza para la neutralización, quedando esta solución de sacarato calibrada en una densidad de 15 ° *Baumè*.

La lechada de cal formada con la misma cantidad de cal, con agua forma una solución de 12 ° *Baumè*, y el aumento de la densidad es por el aporte de la sacarosa del jugo.

Para el caso de sulfitado y encalado del jugo, ambos en caliente, se sugiere que el proceso se desarrolle de manera de encaminar, previo al sulfitado, un calentamiento flash con equipos cuya limpieza sea rápida y sencilla, como ser los intercambiadores de calor a placas.

De esta manera se dispondría de un jugo mixto, que para reducir el ensuciamiento y mantener la eficiencia del intercambio energético, se debería filtrar en filtros auto-limpiantes con el tamaño de malla lo más pequeño compatible con el ciclo de limpieza, caudal y las características del jugo mixto.

Se debe tomar en consideración que la capacidad promedio de un ingenio ronda las 10.000 TC/día, que producen alrededor de 8.000 TJC/día equivalente a 350 ton/ hora (para el cálculo se estiman 23 horas al día considerando una hora para limpieza de equipos).

El caudal es importante requiriendo varios intercambiadores a fin de que los mismos tengan dimensiones y tamaños que permitan su manipulación para limpieza rápida y eficaz.

Una posibilidad sería la de instalar 4 intercambiadores de 120 ton/hora donde 3 estarían en funcionamiento permanente y uno en período de limpieza.

Cálculo de la energía necesaria para el calentamiento del jugo:

$M_j$  = Caudal en Kg/hr, que se toma de 350.000 Kg/hr.

$T_i$  = temperatura ingreso en °C tomado de 28 °C.

$T_f$  = temperatura salida en °C tomado de 110 °C.

$C_p$  = Calor específico del jugo en Cal/kg°C aproximado al del agua 1Cal/Kg °C.

$Q$  = Calorías necesarias en Cal/hr.

$$Q = (M_j \times C_p \times (T_f - T_i)) \quad \text{Ecuación 1}$$

$$Q = (M_j \times C_p \times (T_f - T_i)) = 350.000 \times 1 \times (110 - 28) = 28.700.000 \text{ Cal/hora}$$

Si se calcula para 120 ton/hora, la cantidad de energía a intercambiar es de 9.566.000 Cal/hora, se toma 9.600.000

Cantidad de vapor:  $9.600.000 / 600 \text{ cal/kg} = 16.000 \text{ Kg/hora}$ .

$$\text{Superficie aprox.: } S = 9.600.000 / (3500 \times 93,7) = 29,3 \text{ m}^2 \quad \text{Ecuación 2}$$

Se puede aproximar a  $S= 30 \text{ m}^2$

Los valores tomados para el cálculo son aproximados tanto en la ecuación 1 como para la ecuación 2 donde se estimó el coeficiente de intercambio en  $3500 \text{ Cal/h.}^\circ\text{C.m}^2$  y el DTML en  $93,7 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Esta superficie de intercambio es un valor aceptable para un intercambiador de calor, que puede estar compuesto por 50 placas de  $0,6 \text{ m}^2$  cada una, tamaño fácilmente manipulable para servicio de limpieza.

El punto crítico de un intercambiador de calor de este tipo son las juntas, que deben ser del material adecuado para el esfuerzo al que se encuentran sometidas, y el diseño que debe permitir una limpieza mecánica-química rápida y eficiente.

Los cálculos son aproximados, como para dar una idea de posibilidad y del tamaño del equipo.

Para que un intercambiador de placas pueda brindar esa capacidad debe trabajar con un salto medio logarítmico de temperatura alto lo que implica sea alimentado con vapor vivo.

El jugo caliente a esta temperatura, algo superior a la de evaporación a presión atmosférica, entra en el horno de sulfitado produciendo un flash que por un lado genera algo de vapor que se libera, pero por otro lado produce la dispersión del jugo que ayuda a la absorción del sulfito. El vapor liberado junto con el exceso de  $\text{SO}_2$  que no fue absorbido por el jugo debería ser abatido en una torre de absorción con agua y enviado a neutralización de acidez.

En condiciones de trabajo como las descritas se está en situación cercana al límite de la eficiencia de un equipo, por los esfuerzos físicos, por las diferencias de presión y las tensiones internas del metal de las placas, por las diferencias de temperatura a que se encontraría sometido, que con los sistemas de control y automatización de procesos disponibles actualmente, se reducen en gran parte al evitar choque térmico y golpes de ariete por presencia de condensados en la línea de vapor, aperturas rápidas de válvulas, etc. todo parámetros controlables.

Al efectuar el calentamiento en esas condiciones el equipo queda como “equipo de sacrificio” por el ensuciamiento al que se va a encontrar sometido, pero debemos tener en consideración que seguramente es más económico y

fácil de limpiar que un equipo del tipo casco y tubo del diseño clásico o del tipo de los tachos o evaporadores.

Trabajando de esa forma se eliminarían los VOC, ceras y la mayoría de los compuestos volátiles que se evaporan en el pre-evaporador, necesario para evitar el ensuciamiento del lado de vapor de 2do cuerpo en un tándem de evaporadores de un multi-efecto cuando en el primer cuerpo se ingresa el jugo recién clarificado.

En un esquema de trabajo como el descrito se debería agregar una descarga de incondensables a la torre de sulfitado, pero manteniendo la contrapresión necesaria para evitar un exceso de evaporación que reduciría la temperatura del jugo mixto en el proceso de sulfitado.

Se plantea la necesidad de efectuar ensayos con el objeto de encontrar cual es la temperatura, y por consecuencia la contrapresión óptima que permita eliminar la mayor cantidad de no-azúcares del jugo, y sobre todo los VOC y los demás compuestos que producen el ensuciamiento de las superficies de intercambio de energía.

Con seguridad que a lo largo de la zafra se deberá ir modificando las condiciones de trabajo, temperatura y presión, por la necesidad de ajuste de los parámetros en función de los cambios de composición del jugo.

Se debe tener en cuenta también que la composición del jugo es variable por las razones ya expuestas y por ello es necesario efectuar análisis lo más completos posibles de los compuestos no-azúcares que contiene el jugo y en la medida que se pueda detectar la concentración de los mismos, y su presencia en el jugo en forma rápida y eficiente, se podrán ajustar las variables del proceso.

En función de las variables citadas, se podrá elaborar un plan de trabajo que tenga la suficiente flexibilidad como para permitir los ajustes necesarios que aseguren un jugo libre, o con la menor cantidad posible de compuestos que producen el ensuciamiento de los intercambiadores de calor.

A la descarga de la torre de sulfitado se recomienda enviar el jugo a un tanque de homogeneización, previo agregado de la solución de sacarato de calcio o de lechada de cal, según sea el proceso implementado en el ingenio.

De acuerdo a las publicaciones de Eggleston el proceso de neutralización de la acidez con agregado de sacarato de calcio es más eficiente que el uso de la lechada de cal, por las múltiples ventajas que se detallan.

Para el dimensionado del tanque de homogeneización se recomienda que con el caudal promedio permita un tiempo de residencia suficiente para atenuar las variaciones de composición y en función de los parámetros evaluables con sensores de medición directa, Temp., pH, Conductividad, etc. ingresados al programa de control, dosificar el agregado de la solución de floculante y aditivos para la clarificación, que se recomienda obtener en las condiciones descriptas previamente.

El agregado de las soluciones se puede realizar en un tramo de tubería que hace de mezclador, de manera tal que ingresa al tanque sedimentador ya mezclado y con una composición medianamente homogénea.

El agregado on-line de productos en la forma descripta reduce el tiempo necesario para la homogeneización de la mezcla facilitando la reacción del producto agregado con los compuestos a flocular.

Frente a variaciones bruscas de composición del jugo, por ingreso de caña procedente de distintos lotes, el tanque equalizador atenúa las mismas eliminando los valores muy altos o muy bajos de algunos de los parámetros (picos de valores). Esta atenuación es importante porque evita la oscilación del sistema de control automático de dosificación de productos, obteniendo el agregado de la cantidad justa necesaria para obtener la mejor clarificación posible, o sea la eliminación de la mayor cantidad de no azúcares.

### **Alternativa de clarificación de jugo concentrado (mieles)**

Con el objeto de lograr la mayor eliminación de compuestos no deseados, se puede agregar una etapa de floculación y separación por flotación en el *syrup*. Para ello lo usual es dosificar ácido fosfórico y agregar algún floculante apto para los productos residuales a eliminar.

En esta etapa la separación se produce por flotación con micro-burbujeo de aire a presión incorporado a una parte del jugo que se ingresa en el fondo del tanque de separación.

Según el trabajo *“Improved Control of Sucrose Losses and Clarified Juice Turbidity with Lime Saccharate in Hot Lime Clarification of Sugarcane*

*Juice and other comparisons with Milk of Lime*” (Eggleston et al 2012) se mejora la clarificación del jugo reduciendo los no azúcares con el agregado de Saccharato de Calcio en lugar de la lechada de cal comúnmente utilizada.

En la Tabla 2 se comparan los comentarios de los trabajos publicados sobre estudios realizados en diversos ingenios, según el siguiente listado de autores:

**Tabla 1: TRABAJOS CON SACARATO**

Autor/es	Identificación	Parámetro
Nº		
Noorth Coomers et all (1981)	<i>South African Factory</i>	1
Scott (1988)	No identifica	2
Sahadeo <i>et all</i> (2002)	<i>South African Lab.</i>	3
Doherty <i>et all</i> (2002)	No indica	4
Kong Win Chang & Lauh Ah Wing (2006)	<i>Mauritius</i>	5
Abreviaturas:		
ND:	<i>Not determined</i>	
CJ:	<i>Clarified Juice</i>	
MOL:	<i>Milk of Lime</i>	
SACCH:	<i>Saccharate</i>	

Según el trabajo desarrollado como Tesis bajo el título “*Studies on the Clarification of Juice from Whole Sugar Cane Corp*” de Octubre 2013, la eficiencia y performance de la clarificación es dependiente de la interacción de las partículas. Las propiedades de la superficie de las partículas coloidales se caracterizan típicamente por medio de la medición del potencial Z por micro electroforesis por *láser Doppler*.

Según lo ya mencionado, la clarificación es el proceso más complejo del tratamiento del jugo de caña.

Las principales reacciones y transformaciones que ocurren durante el tiempo de tratamiento de la clarificación, cuyo inicio es el sulfatado y el fin es la descarga del CJ del sedimentador, son.

**Tabla 2: COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE CLARIFICACIÓN**

Parametro	1	2	3	4	5
Turbidez del CJ	Mucho más baja	Mucho más baja	Mucho más baja	Regularmente Mucho más baja	Mucho más baja
Color del CJ	Ligeramente menor con SACCH	Similar	Similar	ND	Mejora del color
Volumen barros (cachaza)	6,5 % Mayor volume con SACCH	Mucho mayor con SACCH en 100 % más	16 % mayor con SACCH	10 % mayor con SACCH	ND
Cenizas CJ	Similar	ND	Igual	Similar	
Control pH	pH similar. Mejor control con SACCH	ND	Similar	ND	Mejora con SACCH
Otros	La Solución de SACCH es más fácil de manipular que la solución de MOL	SACCH es mejor que MOL cuando es baja la calidad de la caña	SACCH produce mejor contenido de fosfato y calcio	Asentamiento de flocs levemente más lento con SACCH. No hay diferencias significativas en contenido de sílica soluble y polisacáridos	El manipuleo de MOL en bombas y tuberías es más dificultoso que SACCH y requiere mayor limpieza

### Reacciones que favorecen la clarificación

- Reacción del  $\text{SO}_2$  con los compuestos orgánicos coloides, formando compuestos cuya solubilidad en el medio es baja y precipitan o con potencial Z suficiente para adherirse al floc formado.

- Formación de floculo de fosfato de calcio.
- Coagulación de albúmina y proteínas por efecto del aumento de la temperatura.

### Reacciones que producen pérdidas de sacarosa

- Inversión de Sacarosa a Glucosa y Fructosa por efecto del aumento de la temperatura y reducción del pH y la presencia de enzimas como la invertasa.
- Presencia de Dextrano en el jugo, por el aumento de viscosidad que dificulta la cristalización de la sacarosa. (Ver **Anexo I; Figura 1: CRISTALES DE SACAROSA Y DEXTRANO; ANEXO II, Figura 6: MOLÉCULAS DE DEXTRANO y Tabla 5: ISÓMEROS DE DEXTRANO**)

Según el trabajo publicado por Borges *et al* (2012) es importante tener en cuenta el rango de valores de Honig-Bogstra, que define la clarificación del jugo.

Índice Honig-Bogstra	Calidad del jugo	Sólidos retenidos
< 0,15	Pobre	>800 mg/l
0,15 – 0,25	Jugo turbio	>500 mg/l
>0,25	Buena calidad	--

De hecho que el cociente entre la concentración de fosfato y la suma de las concentraciones de ácido silícico, óxido de hierro y óxido de aluminio conforman el Índice de Honig-Bogstra. Es una forma de predecir el comportamiento de un jugo en clarificación.

El cálculo del índice de Bogstra es el cociente:  $P_2O_5 / (SiO_2 + FeO_3 + Al_2O_3)$  medido tomando las densidades másicas.

Debería ser mayor a 0,25 dependiendo del ácido aconítico y otros elementos presentes en el jugo.

En la clarificación del jugo de caña el contenido de  $P_2O_5$  libre es importante, facilitando la formación de floculo cuando se agrega la lechada de cal, o mejor aun cuando se adiciona cal como sacarato de calcio.

Cuando se clarifica de esta manera aumenta la cantidad de sedimento, barro, que precipita y facilita la producción de azúcar “blanco directo”.

Lo que se propone para el barro de la segunda clarificación es el secado del mismo, formando escamas o mejor tipo pellets o como aperdigonado para su utilización como fertilizante.

La ventaja que se obtendría con el secado del barro es que se puede almacenar y que también se puede utilizar para incorporación de fertilizantes a la caña en crecimiento, logrando una distribución del fertilizante más homogénea en el tiempo reduciendo con ello las pérdidas por lavado del suelo, lixiviado, por efecto de las lluvias.

Como las lluvias solamente son predecibles con un lapso de tiempo relativamente corto, pero se puede prever una tendencia para el ciclo de crecimiento de la caña, el secar el barro cargado de nutrientes para las planta representa una ventaja importante, dificultando solamente su almacenaje que se debería poder efectuar a granel en sitios protegidos de la intemperie.

Porcentaje de cachaza, referido a TC/día

Normal:	hasta 4%
Con tratamiento de clarificación para blanco directo:	hasta 7 %

El barro de filtros, llamado cachaza, tiene una humedad entre 70 y 80 % (*Press cake ó filter cake*) que estimando un contenido promedio de sólidos del 25 % genera un peso total máximo de producto seco de:

$$10.000 \text{ TC/día} \times 0,07 \times 0,25 = 175 \text{ T/día de cachaza seca}$$

Que durante una zafra completa de 150 días producirían un total de 26250 toneladas de producto a almacenar.

A fin de reducir la cantidad, que por el volumen representa un problema para su almacenaje, se propone el secado del sedimento de la segunda sedimentación, que contendría igual o más nutrientes que los de la primera sedimentación, y con ello se reduce la cantidad a menos de la mitad, ya que esta (la sedimentación posterior a la usual) representaría solamente alrededor de un 3 % de la TC/día.

La cantidad final a almacenar estaría en orden de 11.000 toneladas de producto a almacenar.

Se debe tomar en consideración que durante la zafra también se efectúan aplicaciones a los terrenos de caña ya cosechados, con lo que se disminuye el

volumen total a almacenar, que se podría estimar en 10.000 toneladas máximo que representaría un volumen de 7.000 a 8.000 m<sup>3</sup>, o sea un tinglado de 1200 m<sup>2</sup> (20 x 60 metros) con una altura a base de cabreadas de 7,5 metros.

Estos datos se agregan a fin de ilustrar que es posible llevar a cabo el trabajo y para que se pueda realizar una estimación prima facie de los montos de inversión y el pre-cálculo del Tiempo de Retorno de Inversión (TRI).

Un costo que se reduce y que debemos considerar es el de tratamiento de la vinaza, ya que por tener un menor grado de contaminación se estima como posible su empleo en el riego de todo tipo de campos cultivados, porque genera una carga orgánica menor.

Su cuantificación se debe realizar a medida que avanza la zafra, registrando los análisis promedio que se relevan porque es previsible que se presenten variaciones importantes en su composición y en el contenido de los nutrientes.

Y el uso de ésta cachaza seca se debe evaluar en función de las variables que afectan la composición del jugo de caña, que varían a su vez a lo largo de la zafra.

Para comprender el complejo esquema de variación de la composición del jugo de caña se propone la elaboración de una matriz de variación que contemple todos los factores posibles a considerar.

### ***Matriz de variación del jugo de caña***

A continuación se presentan los parámetros que producen las variaciones en la composición del jugo de caña.

Parámetros invariables: Parámetros que se mantienen (o deberían mantenerse) constantes para cada lote a cosechar.

1. Variedad de la caña.
2. Edad de la plantación.
3. **Condiciones meteorológicas del ciclo de crecimiento:** (del ciclo productivo y los eventos climáticos de ciclos anteriores que también afectan la producción, como p. ej. heladas tardías, stress hídrico, etc.).

Parámetros variables: Parámetros sobre los que se pueden producir los cambios en la composición del jugo (modificaciones).

4. Grado de madurez de la caña al momento del corte.
5. Sitio de cosecha (composición del suelo).
6. Agregados químicos a las plantas (fertilizantes, maduradores y pesticidas).
7. Tiempo entre el corte de la caña e inicio del proceso.

Para la construcción de la matriz colocamos en el eje de abscisas las variables 1, 2, y 3 seguidas, que son variables que dependen de factores externos, fuera de control del hombre y luego 4, 5, 6 y 7 porque estas últimas pueden ser controladas a fin de reducir su incidencia a un mínimo.

En el eje de ordenadas colocamos la base de tiempo desde el inicio hasta el fin de la zafra.

Para que la información colectada sea de utilidad, se deben consignar en cada cuadro valores representativos de los parámetros fundamentales del jugo de caña, expresados en valores promedio, si es posible, ponderados.

Una vez obtenido los valores promedio de las variaciones, se traza la curva de variación de los parámetros que permitirán prever los cambios y ajustes necesarios para mantener la eficiencia en la clarificación del jugo.

Los valores, expresados siempre en las mismas unidades, que se propone utilizar para cuantificar las variaciones son:

- ✓ **Contenido total de agua en la caña.**
- ✓ **Sólidos solubles.**
- ✓ **Fibra seca.**
- ✓ **Contenido de Sacarosa del jugo.**
- ✓ **Acidez del jugo al momento de la extracción.**
- ✓ **Agua de imbibición necesaria.**
- ✓ **Contenido sacarosa residual en bagazo.**
- ✓ **Contenido de dextrano.**



Se recomienda completar una matriz de variación para una zafra por cada variedad de caña plantada, una matriz también por cada año de edad de la plantación, y una matriz por cada tipo de suelo.

La “evolución de las variables agrometeorológicas del ciclo productivo y los eventos meteorológicos de ciclos anteriores que afectan o pueden afectar a la producción” varía por año y no se prevén- variaciones significativas para la zona de influencia de un ingenio, por el hecho que la incidencia del flete es alta. Este supuesto se fundamenta en el hecho que las variaciones significativas de factores agrometeorológicos presentes a lo largo del ciclo de desarrollo de las plantaciones se producen cuando hay zonas donde la naturaleza geográfica difiere y origina las mismas.

En la provincia del Tucumán y principalmente en la zona de pedemonte provienen de origen aluvial, y la zona del llano tiene origen eólico, aumentando la isohieta a medida que los campos se encuentran cercanos a las serranías, siendo los cambios graduales.

Tal lo mencionado precedentemente la incidencia del costo del transporte es elevada y por ello se elimina la posibilidad de procesamiento de materia prima (caña) proveniente de sitios muy distantes (y de condiciones significativamente diferentes).

Por lo expresado se trata de obtener la materia prima, la caña, en lotes ubicados lo más cerca posible del ingenio.

Además, la cercanía del sitio de cosecha al ingenio representa una ventaja importante desde el punto de vista del control del tiempo entre el corte y el inicio del proceso que, se recomienda, sea lo menor posible.

## **Conclusiones:**

1. La “Organización” del trabajo es una clave que representa muchas ventajas desde varios aspectos tan fundamentales como es el cuidado del ambiente y a su vez permite el control de la calidad de la producción, el de reducción de costos y el de la eficiencia del trabajo.

2. Permite una programación del trabajo en el ingenio, necesaria para mantener el control ambiental, la productividad y los rendimientos.

3. Si bien los tiempos de respuesta son totalmente diferentes para la producción primaria, se debería incorporar esta producción como parte del

proceso industrial que se “dirige” desde el Ingenio, de manera tal de asegurar la calidad y flujo homogéneos de la materia prima.

4. La implementación de un SGI que a su vez tenga una parte como un SGA, es una etapa fundamental en el aumento de la eficiencia de los procesos productivos.

5. Se propone integrar a la producción primaria al SGI, de manera tal que el control sea llevado con todos los registros que aseguren el cumplimiento en tiempo y forma de las acciones relacionadas al cultivo optimizado.

6. Con una fertilización ya sea con fertilizantes orgánicos o con cachaza deshidratada se reduciría significativamente la contaminación ambiental que produce toda explotación agrícola por el lixiviado de los fertilizantes en su forma acostumbrada de aplicación, por ejemplo utilización de urea para aporte de nitrógeno.

7. Con la incorporación de las parcelas productoras de caña a un sistema de trabajo controlado y dirigido con aplicación de las técnicas de organización y eficientización de los procesos industriales se lograría una mejora en el ingreso de recursos tanto para el productor primario como para la industria.

## Otras opciones

La industrialización de la materia prima que provee el procesamiento de la caña de azúcar es posible ampliando el potencial de los productos a obtener, que reemplazan a productos obtenidos de fuentes no renovables de materia prima fósil (petróleo).

El listado de los productos posibles a obtener son.

Productos que se pueden obtener de celulosa de caña (Mones 2001).

-Papel.

-*Levoglucosan, levulonic acid y 3,4-dihydroxybutiric acid* con el proceso CF desarrollado en *National Renewable Eenergy Laboratory*.

-*Levulinic acid, o 4-oxopentanoic acid* por hidrólisis de celulosa.

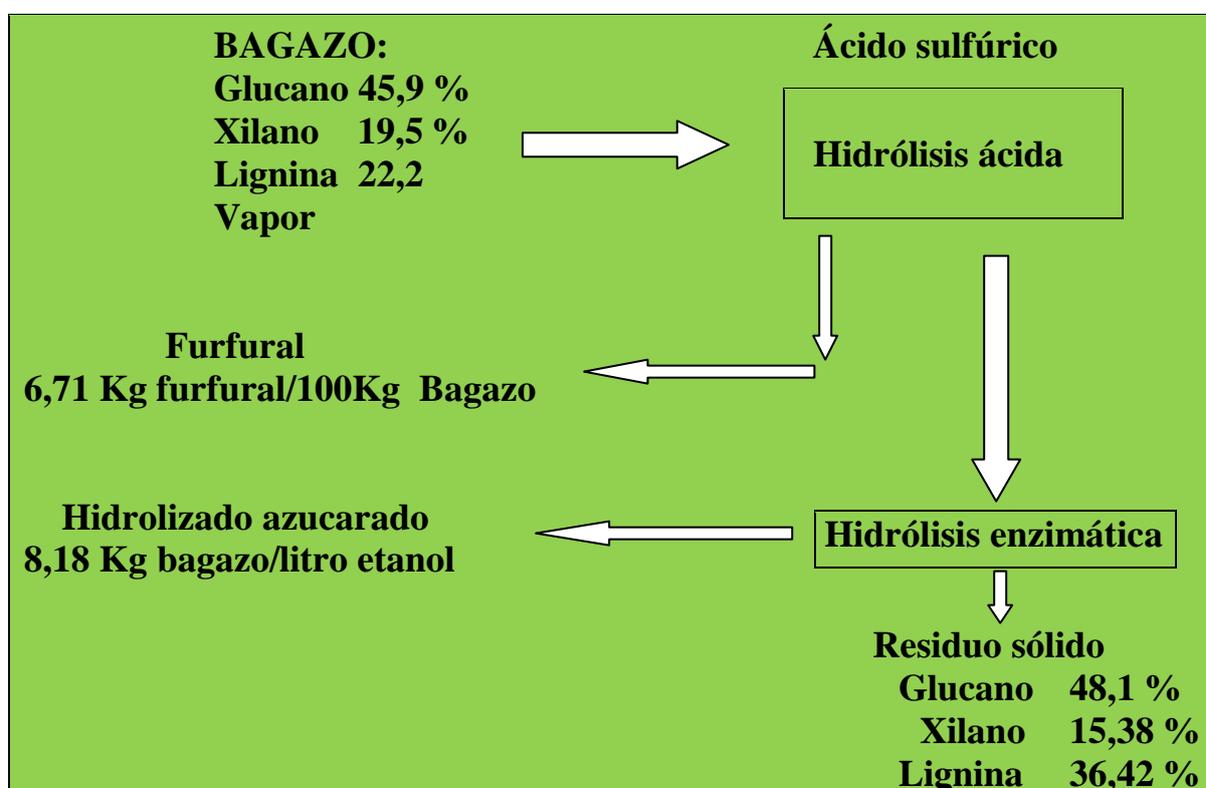
Posibles productos a obtener, en estudio.

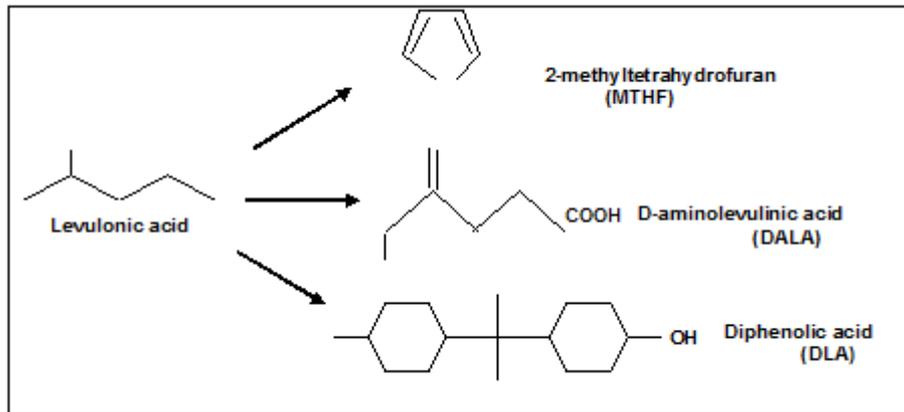
- Methyltetrahydrofuran (MTHF).
- Delta-aminolevulinic acid (DALA).
- Diphenolic acid (DPA).

Otro producto a obtener es el ácido levulinico ó 4-oxopentanic acid (LA), un compuesto con cinco carbonos (C<sub>5</sub>) que se obtiene por la hidrólisis ácida catalizada de la celulosa.

Con un proceso industrializado que asegure un precio competitivo del LA, éste se puede utilizar como plataforma química para la obtención de otros productos cuya demanda es importante.

#### PRODUCTOS A OBTENER DEL BAGAZO



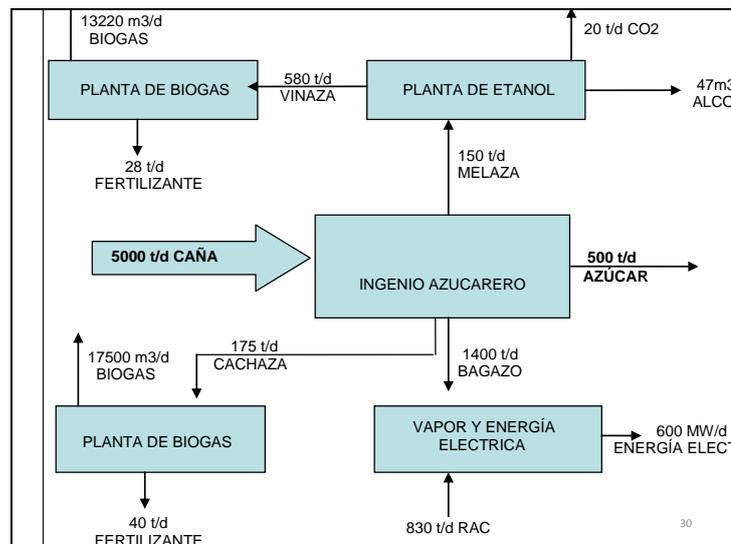


**Figura 6: PRODUCTOS OBTENIDOS DEL ÁCIDO LEVULÍNICO**

En el esquema siguiente se indican la capacidad de producción de azúcar y coproductos que se pueden obtener de la caña de azúcar.

Según la publicación de UNIDO, “*Industrial Biotechnology and Biomass Utilization*” en *Coproducts from the Sugarcane Agroindustry* son 89 los productos que se pueden obtener para alimento de humanos y animales, Biocombustibles, producción industrial y agrícola, por medio de procesos físicos, químicos y/o biológicos.

**Diagrama 3: EJEMPLO DE BALANCE DE MASA DEL PROCESO**



En el **Diagrama 3** se presenta el balance de producción del proceso completo con elaboración de azúcar, etanol, producción de energía eléctrica, bio-gas y fertilizante orgánico.

En Argentina, más precisamente en la provincia de Tucumán, que es la provincia con mayor producción azucarera del país, la cachaza se emplea como mejorador de suelos y se aplica principalmente en los lotes donde se renueva la caña.

Hay un solo ingenio azucarero que tiene una planta para producción de Biogas a partir de la vinaza con un reactor tipo UASB, construido bajo la dirección técnica y con proyecto de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso – Chile, con capacidad de tratamiento de alrededor del 10 % de la producción diaria de vinaza.

Otro subproducto es el CO<sub>2</sub> que se genera durante la fermentación de la melaza cuando se produce alcohol, que en el país se vende en la totalidad de las destilerías.

Productos que se pueden obtener del procesado de la Cachaza.

- Biogas
- Mejorador de suelos
- Compost (biofertilizantes)
- Ceras
- Resinas
- Fitoesteroles

En resumen, la diversidad de productos que se pueden obtener de la caña como materia prima es grande y sobre todo que al ser la sacarosa un sustrato natural la convierte en producto interesante para desarrollo de nuevas tecnologías químicas y microbiológicas (Aguilar 2010).

Como la reactividad es mayor en los carbonos primarios, la presencia de estos grupos hace posible la síntesis de numerosos derivados por ser fácilmente atacada por ácidos, oxidantes y álcalis siendo posible utilizarla como endulzante, preservante, antioxidante, excipiente, agente granulador y tensioactivo de jabones, en productos de belleza y tintas (Boscolo, 2003).

Otras posibilidades de procesamiento de la sacarosa son la oxidación, la pirólisis, la hidrogenación, la aminólisis, la halogenación y por vía bacteriológica y síntesis orgánica (sucroquímica o síntesis dirigida a sacarosa).

Las categorías en las que se pueden encuadrar los productos a fabricar utilizando como plataforma química a la sacarosa caen en las siguientes

categorías comerciales de Alimentos, Alimento balanceado (ganados), Combustibles, Explosivos, Elastómeros, Lubricantes, Disolventes, Acondicionadores de suelos, Fibras, Adhesivos, Papeles, Plaguicidas, Plastificantes, Bioplásticos, Revestimientos de superficies, Agentes reductores de tensión superficial, Medicinas, Fármacos y Cosméticos.

Las ventajas que se obtienen con estos productos es que la materia prima empleada, la sacarosa, es un recurso renovable, regenerable de origen agrícola y que el impacto ambiental es controlable por la biodegradabilidad de los mismos, su atoxicidad y no cancerígenos.

Según Van Nostrand (1990) los principales productos de reactividad de la sacarosa son, entre otros.

Fructosa, ácido glucónico

Sorbitol, manitol

Glicerol

2-Metilpiperazina

Hidroximetilimidazol

Furfural hidroximetil-5

Ácido levulinico

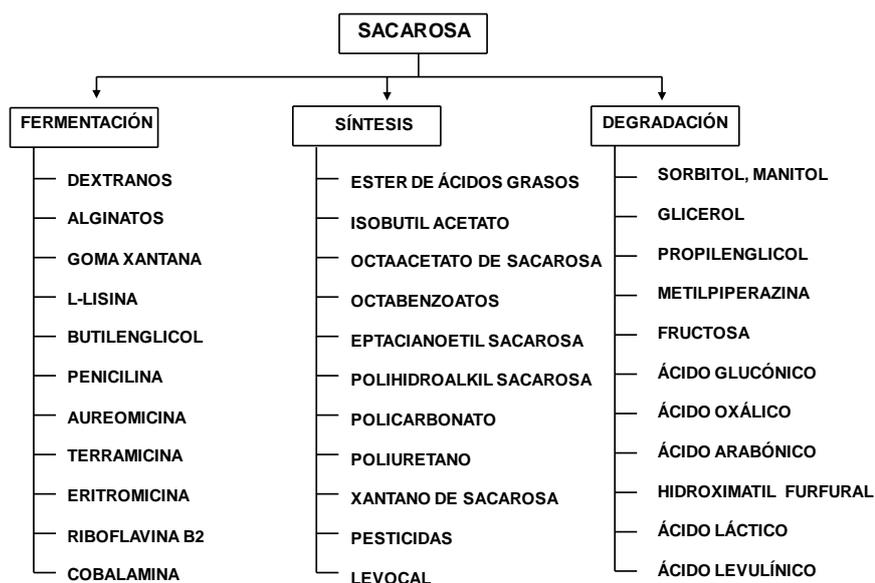
Ácido láctico

Ácido oxálico

Ácido arabónico

### ***Productos que se pueden obtener de la Sacarosa***

A continuación se muestra un esquema donde se detallan algunos de los compuestos que se pueden obtener utilizando a la sacarosa como plataforma química.

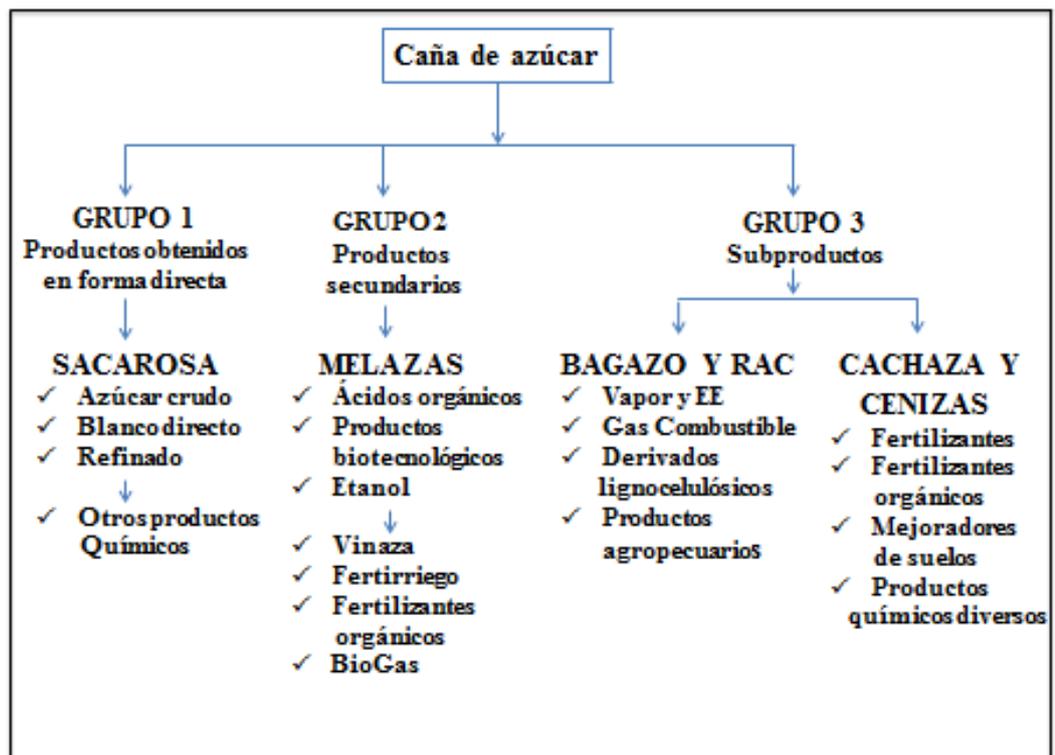


Surge la pregunta de *¿Qué derivado de la caña de azúcar industrializar?* Y la respuesta es compleja por la cantidad de factores que inciden ya que cada producto requiere de una inversión en instalaciones y equipos de un valor importante y la rentabilidad depende del costo de la Materia Prima (MP), el costo del procesamiento y el transporte hasta el mercado consumidor (Aguilar 2010).

Llamando Grupo 1 al producto obtenido en forma directa de la MP, Grupo 2 a los productos secundarios y Grupo 3 a los subproductos, podemos plantear el esquema que se presenta a continuación.

Esta división se puede ampliar encontrando una infinidad de productos posibles de obtener.

El desafío de la integración de la producción agrícola—industrial con miras a la ampliación de los productos a elaborar está presente y con seguridad permitiría llegar a la **sustentabilidad** tan necesaria para mantener el equilibrio entre el desarrollo que impone el ser humano para su supervivencia y el ambiente como fuente de los recursos naturales necesarios para la vida.



## CAPÍTULO 5

# **OTRAS OPCIONES PARA TRABAJAR**

Esquema de fermentación de melaza diluida con agua, diluida con jugo clarificado o con vinaza reciclada.

En el esquema no se indica pero también se puede considerar la opción de fermentación del jugo de caña clarificado.

### **Propuesta de trabajo**

El alcohol y los demás compuestos que se producen durante el desarrollo de la fermentación del jugo (Hernandez 2007), en realidad durante la fase de crecimiento logarítmico y también durante la fase estacionaria de la población de levaduras, interfieren su desenvolvimiento y a medida que aumenta la concentración de estos compuestos en el líquido en fermentación, se dificulta la reproducción de las levaduras.

Si durante esta fase, sobre todo durante la fase de crecimiento logarítmico se recircula el líquido en fermentación sobre el enfriador, pero separando las levaduras, y luego las sustancias de menor tamaño que producirían un ensuciamiento acelerado de las membranas y luego se lo pasa por una cascada de membranas (varias en serie), se podría ir bajando el contenido de alcohol y demás compuestos durante el proceso de ésta, la fermentación, con el objetivo de mantener las condiciones del sustrato con la menor cantidad de sustancias que interfieren y/o dificultan el desarrollo de las levaduras.

Por descontado que exige un trabajo muy detallado de seguimiento a fin de determinar cuáles son los parámetros controladores del desarrollo del cultivo y buscar la manera de actuar sobre los mismos.

Logrando controlar los parámetros principales que producen interferencia e inhiben el crecimiento normal del cultivo, se plantea la posibilidad de aumentar la transformación de carbohidratos en alcohol y con ello aumentar la velocidad y sobre todo el rendimiento del proceso de la fermentación.

El planteo se elabora por el hecho de la gran cantidad de nutrientes residuales que quedan en la vinaza, y que con una fermentación controlada y posiblemente llevada a cabo en varias etapas, se pueda lograr el objetivo del trabajo, que es el de terminar el proceso de obtención de azúcar y de bio-etanol con un efluente – vinaza - de menor carga orgánica y por ende, de mejor aplicación para fertirriego u otros usos.

El desarrollo tecnológico de las membranas para filtración, comenzando desde lo más elaborado que es la Osmosis Inversa (OI), la nano Filtración (nF), la Ultra Filtración UF) y las que continúan con mayores tamaños de porosidad (Kujawski, 2000; Pérez Bermúdez *et al*, 2011), hace que se dispongan en el mercado opciones de cerámica, de materiales sintéticos, etc. con fijación para trabajo estático, con rotación y seguramente alguna opción especial adicional, y que las alternativas de trabajo se amplíen y con ello las posibilidades de obtener una vinaza con menor carga contaminante.

Como el Alcohol y los demás compuestos de fermentación, aldehídos, esteroides, etc. están en la solución acuosa que contiene los carbohidratos (azúcares) en fermentación es necesario precisar el tamaño de los productos a separar y retornar el solvente, agua, para evitar que se concentre la solución, obstruya las membranas y aumente la concentración del sustrato en fermentación, que posiblemente dificultaría el desarrollo de las levaduras.

Seguramente se requerirá de varias etapas que tratando parte del caudal del mosto en fermentación que se recircularía para enfriamiento, logren la puesta a punto del proceso y con ello obtener la reducción de los productos de fermentación en el mosto de manera de simular, durante un tiempo mayor que el de la fermentación normal, las condiciones óptimas para el mantenimiento de la fase de desarrollo logarítmico de la población de levaduras.

En estas condiciones el cultivo es más sensible a las condiciones adversas que se pueden presentar en el mosto en fermentación, lo que exige un ajuste muy preciso y continuo de las variables controladoras que seguramente incluyen el grado de acidez, concentración, temperatura, etc.

## ***Esquema del circuito propuesto***

Una opción es la de derivar parte del caudal que circula sobre el enfriador y pasarlo por una separación de sólidos por centrifugación (*Decanter*). De allí y como es un caudal relativamente pequeño se podría pasar por un filtro del tipo de los auto-limpiantes de malla de 50 micrones o si se dispone en el mercado, de una malla de menor tamaño de poro.

El retorno de la centrífuga y del filtro debería enviarse junto con el resto del caudal de retorno del enfriador, de manera que la variación de concentración que produce esta incorporación de sólidos afecte lo menos posible. Por supuesto que una vez que el sistema entra en estado estacionario, retornando al fermentador el agua separada de los productos de la fermentación, la variación que pudiera producirse es reducida, dependiendo de la relación de caudales recirculado y tratado.

Este tipo de filtros es de uso frecuente en la industria química de producción de tintas de impresión gráfica, siendo generalmente de acero inoxidable, con diseño similar al tipo sanitario (uso alimenticio) para facilitar la limpieza.

Desde allí se plantea la opción de procesar el mosto en fermentación, con la menor cantidad posible de SS en una nano filtración o ultra filtración, debiendo evaluar prácticamente cual es el tamaño de poro necesario para permear parte del solvente, agua, mezclado con el etanol y los demás productos de la fermentación.

Se plantea la necesidad de eliminar la mayor cantidad posible de compuestos producidos durante el desarrollo de las bacterias a fin de mantener el mosto del fermentador en las condiciones lo más favorables posible para extender el tiempo y el desarrollo de las levaduras y así lograr un mayor rendimiento en la producción de alcohol, por una parte, y quizás lo más importante, lograr una vinaza residual de menor carga orgánica.

A partir de esta etapa se abren muchas posibilidades porque una vez obtenidos los compuestos de interés, se plantea la deshidratación por Osmosis Inversa (*pervaporation*) (Kujawski 2000). En el esquema se indica una etapa, pero posiblemente en la práctica se deberán instalar varias etapas en serie.

El proceso se deberá ir ajustando a medida que avanza la temporada de zafra, porque la composición de la caña, la materia prima, va variando según

todos los parámetros ya indicados y que inciden, en el punto “**Factores que afectan la composición química del jugo de caña**” del **CAPÍTULO 3**.

El proceso de eliminación del agua, solvente, por OI difícilmente sea total, quedando un exceso de agua libre en la mezcla de los compuestos separados.

De allí se debería poder separar por membranas al etanol como mezcla azeotrópica y luego sumarlo a la corriente de vino a destilar o incorporar al sistema una etapa de *pervaporación* para deshidratarlo si se logra la separación en condiciones similares a las obtenidas en la columna de destilación (Kumar *et al.* 2010).

Las posibilidades de variar las etapas del proceso, así como las diferentes combinaciones de los equipos deberían ofrecer una metodología versátil y ágil para el procesamiento del vino.

También las distintas opciones ofrecerán un efluente diferente y con distinta composición química, porque la destilación del vino destruye levaduras que quedaron atrapadas en éste por el aumento de temperatura.

Las opciones de control automático de los procesos facilita mucho el empleo de elementos complejos y con requerimientos específicos concretos que solo se logran con monitoreo continuo de los parámetros representativos y el control de los mismos a través de tecnologías nuevas como son los controladores que trabajan con metodología predictiva o adaptativa.

Por ejemplo una opción a considerar podría ser la medición de la reducción del flujo del producto permeado y mediante un dispositivo del tipo PLC mantener limpios los poros del sistema de filtración a través de inyecciones de agua pura en flujo contrario por un período muy breve y sin un aumento excesivo de la presión, para lo cual se requieren las válvulas y demás elementos servo-comandados con la precaución de disponer la instalación de elementos filtrantes apropiados previo a cada uso del agua para limpieza.

Efectuando los ensayos a nivel de planta piloto es un desafío a la ingeniería de procesos el desarrollo de este tipo de circuitos combinados, donde se aúnan diferentes operaciones unitarias aprovechando las ventajas de cada una, con el compromiso de mantener el control y el registro de los parámetros representativos de las características de los productos de interés a controlar y los productos a obtener.

De hecho que la vinaza se degrada por acción de bacterias, de otro tipo que las levaduras que producen alcohol, pudiendo producir Biogás, que es una manera de reducir la alta carga orgánica que arrastra después de la destilación.

Si se desarrollan cepas de levaduras aptas para procesar algunos (la mayor cantidad posibles) de los compuestos orgánicos que lleva la vinaza normalmente y transformarlos en alcohol, y luego en Bioetanol, por supuesto que con adición de algunas sustancias como ser correctores de pH, nutrientes específicos, etc. se podría plantear un aumento de la capacidad de producción de las plantas instaladas, con agregado de algunos equipos.

### ***Principales productos de la fermentación alcohólica*** (Hernández 2007).

- Alcoholes
  - etanol, metanol, alcoholes alifáticos con más de 2 átomos de C, y alcoholes superiores (isobutanol, alcohol isoamílico, amílico, llamados genéricamente aceite de fusel).
- Aldehídos
  - primordialmente acetaldehído.
- Esteres:
  - acetato de isobutilo y acetato de isoamilo.
- Ácidos orgánicos
  - Ácidos volátiles: fórmico, acético, propiónico, butírico y láctico y trazas de otros ácidos grasos. Ácidos tartárico, málico, succínico, y trazas de otros compuestos.
- Gases
  - Dióxido de Carbono.

Dada la gran cantidad de variables presentes en un caldo de melaza a fermentar y la gran cantidad de productos que se forman, es imprescindible efectuar ensayos e identificar las cepas que se inoculan en cada caldo, obviamente la cepa mayoritaria que se desarrolla, porque con seguridad que se tendrán varias cepas diferentes de la misma especie en cada cultivo.

**Tabla 4: COMPUESTOS QUE SE PUEDEN ENCONTRAR EN LÍQUIDOS ALCOHÓLICOS OBTENIDOS POR FERMENTACIÓN.**

NOMBRE	PESO MOLECULAR	DENSIDAD A 15-20°C	PUNTO DE FUSION	PUNTO DE EBULLICION
ALCOHOLES				
Etílico	46.05	0.789	-112	78.4
Propílico	60.06	0.804	-127	97.98
Isopropílico	60.06	0.780	-85.	82.5
Butílico	74.08	0.810	-79.9	117
Isobutílico	74.08	0.805	-108	107.8
Butílico secundario	74.08	0.808		99.5
Amílico	88.09	0.817		137.8
Glicerina propanotriol	92.06	1.26	17.9	290
ALDEHIDOS				
Etílico	44.03	0.783	-123.5	20.2
Butílico	72.10	0.817		73
Isovalérico	86.08	0.803	-151	92.5
Furfural	96.03	1.159	-38.7	160.5
ESTERES				
Formiato de etilo	74.05	0.906	-79	54
Acetato de etilo	88.06	0.901	-82.4	77.1
Acetato de propilo	102.08	0.886	-92.5	101.6
Acetato de isopropilo	102.8	0.877	-73.4	89.9
Acetato de butilo	116.90	0.882	-76.8	125.1

Datos obtenidos de “tecnologiaslimpias.org” (313101\_ee)

## ***Propuesta para aumento del rendimiento de la fermentación***

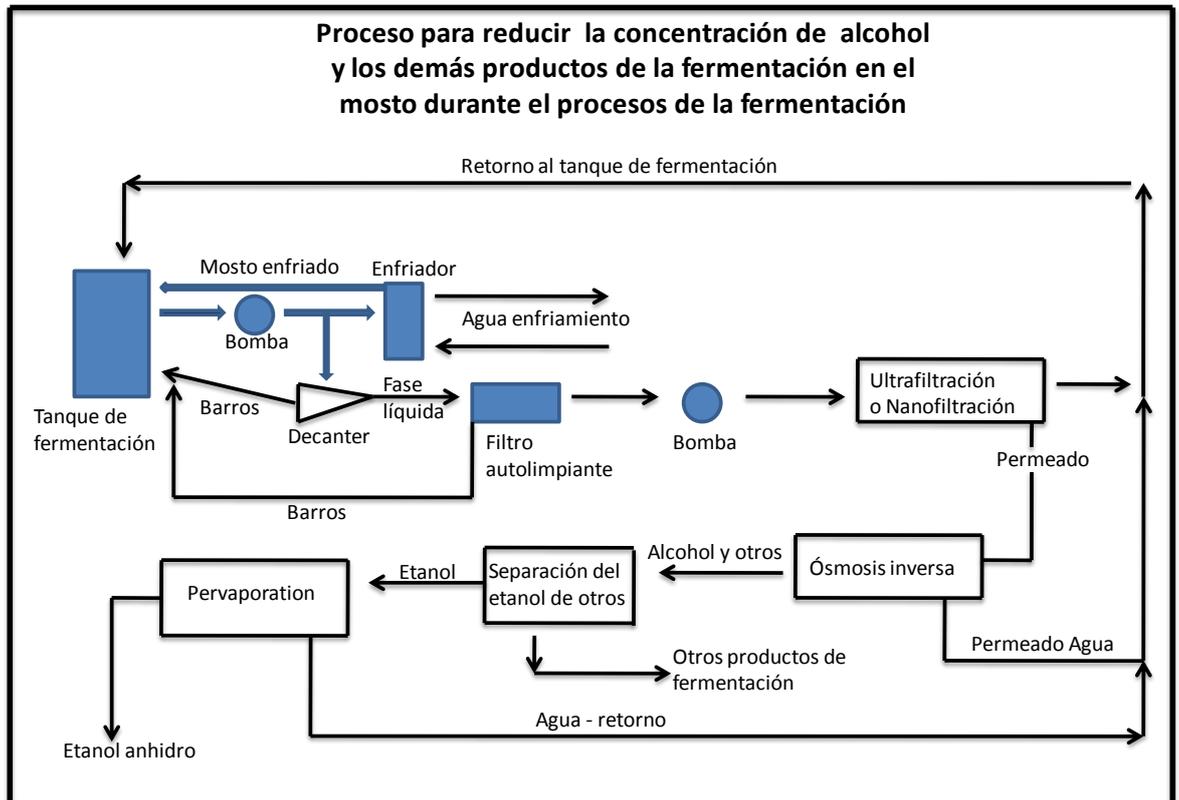
A continuación se presenta un esquema muy simplificado de bloques donde se esboza la propuesta cuya función principal es la de tender a un aumento de la producción de alcohol del sustrato en fermentación.

Como la vinaza queda con alta carga orgánica compuesta de restos de melaza diluida no fermentada se plantea la posibilidad que si se reduce el contenido de productos de fermentación a medida que se van produciendo durante el desarrollo de las levaduras inoculadas, generalmente *Saccharomices Cervisiae*, se podría suponer que con un tratamiento adecuado y un ajuste de los parámetros del mosto, el cultivo podría seguir desarrollando la conversión de materias orgánicas en productos de fermentación.

Si se plantea el empleo de un sistema continuo de fermentación se podrían instalar varias etapas con distintas levaduras que, aptas para procesar diferentes componentes del mosto (Garzón Castaño *et al*, 2009), podrían aumentar la transformación de estos en etanol con el consiguiente aumento en el rendimiento y la mejora ambiental consecuente al producir un efluente de menor carga orgánica.

En el esquema de la página siguiente se indican los equipos de proceso principales que serían los que, con toda la instrumentación y elementos de operación y control necesarios producirían la operación de reducción de los compuestos que, como deshechos del desarrollo, elaboran los cultivos de levaduras en el sustrato.

**Diagrama 4: PROCESO DE FERMENTACIÓN MODIFICADO**



## Alternativas para mejora del rendimiento del proceso de fermentación alcohólica

### Objetivo:

- Aumento de la sustentabilidad del ciclo agro-industrial.
- Un producto final, **la vinaza**, cuya composición química permita amplia utilización como fertirriego.

El tratamiento propuesto consiste en transformar del mosto, a medida que se produce el alcohol y los demás compuestos que se forman durante el desarrollo de las levaduras, la mayor cantidad de sustancias posibles de manera que su tratamiento posterior presente una menor exigencia ambiental y reduzca la problemática actual del uso y/o disposición final de la vinaza.

La cepa principalmente utilizada para la producción del bioetanol, por su alto rendimiento, es la *Saccaromises Cervisiae* permitiendo en un sistema de fermentación continua la inoculación de otras cepas aptas para degradación del mosto residual a medida que avanza el proceso.

La fermentación se inicia en la etapa de desarrollo de la población, llamada de crecimiento logarítmico, que es cuando mayor rendimiento de formación de productos tienen las cepas (Sigifredo *et al* 2011) y con el objeto de evitar la intoxicación que produce el alcohol a medida que aumenta su concentración en el mosto y mantener alto su rendimiento de transformación se plantea la fermentación a menor presión que la de equilibrio a la temperatura en que se encuentra con el objeto de extraer, por evaporación, los volátiles generados.

Como es de esperar, la depresión aumenta la evaporación del medio acuoso en el cual se encuentra suspendido el sustrato, que se debe condensar y retornar al efecto de mantener la concentración en valores adecuados, óptimo para el desarrollo de las cepas inoculadas.

El circuito debería contar con las siguientes etapas básicas de proceso:

- ✓ Tanque de fermentación.
- ✓ Sistema de control de temperatura del mosto en fermentación, por recirculación sobre intercambiadores de calor tipo de placas.

- ✓ Sistema de vacío con descarga de gases extraídos a través de un condensador, con la opción de producir vacío con un eyector de vapor y enviar los productos evaporados, recalentados con el vapor del eyector, a una columna de platos para la separación de los condensables y el agua, condensarlo y separarlo para retornarlo al tanque de fermentación, por bomba u otro método para regular el flujo y mantener la depresión en el tanque.
- ✓ Otra opción podría ser un sistema de separación del agua de los condensados, por medio de una filtración por Ósmosis Inversa (OI), retornando esta agua (el permeado) al tanque de fermentación.
- ✓ Opcional de tratamiento de separación del alcohol de los otros productos por UF ó nF y tratamiento de deshidratación del alcohol por *pervaporation* u otros medios cuyas tecnologías se encuentran disponibles.

Con un sistema como el descrito se lograría aumentar la transformación de materia orgánica del mosto en alcohol, con el principal objetivo de lograr un sub-producto de la fermentación, la vinaza, utilizable para fertirriego en cualquier tipo de suelos y mejore la sustentabilidad de todo el ciclo productivo.

### ***Proceso de fermentación con vacío en el tanque***

Al reducir la presión del tanque donde se desarrolla la fermentación se producirá un evaporación importante que baja la temperatura del mosto y produce vapores mezcla de agua con los productos de la fermentación, donde el producto mayoritario es el alcohol, cuya temperatura de vaporización, como azeótropo, es menor que la del agua .

Con ello se espera lograr una separación de los productos de la fermentación del mosto donde se desarrollan las levaduras y con ello disminuir la toxicidad que representa una alta concentración de estos productos para las levaduras.

Al efectuar el vacío con un eyector de vapor se puede lograr un incremento suficiente de la temperatura que permita enviar la descarga del

eyector hacia una columna de destilación para la separación de los productos obtenidos.

En la columna se separan las corrientes de los diferentes productos y se direccionan a cada uno hacia el depósito para su posterior tratamiento.

En el esquema que se muestra en la figura siguiente, se instala un condensador a la salida de los gases de la columna de destilación donde se enfrían los mismos con el objeto de evitar arrastres de volátiles, que se recuperan y envían al fondo de la columna que recibe el flujo caliente de la descarga del eyector y vuelve a vaporizar los condensados retornados.

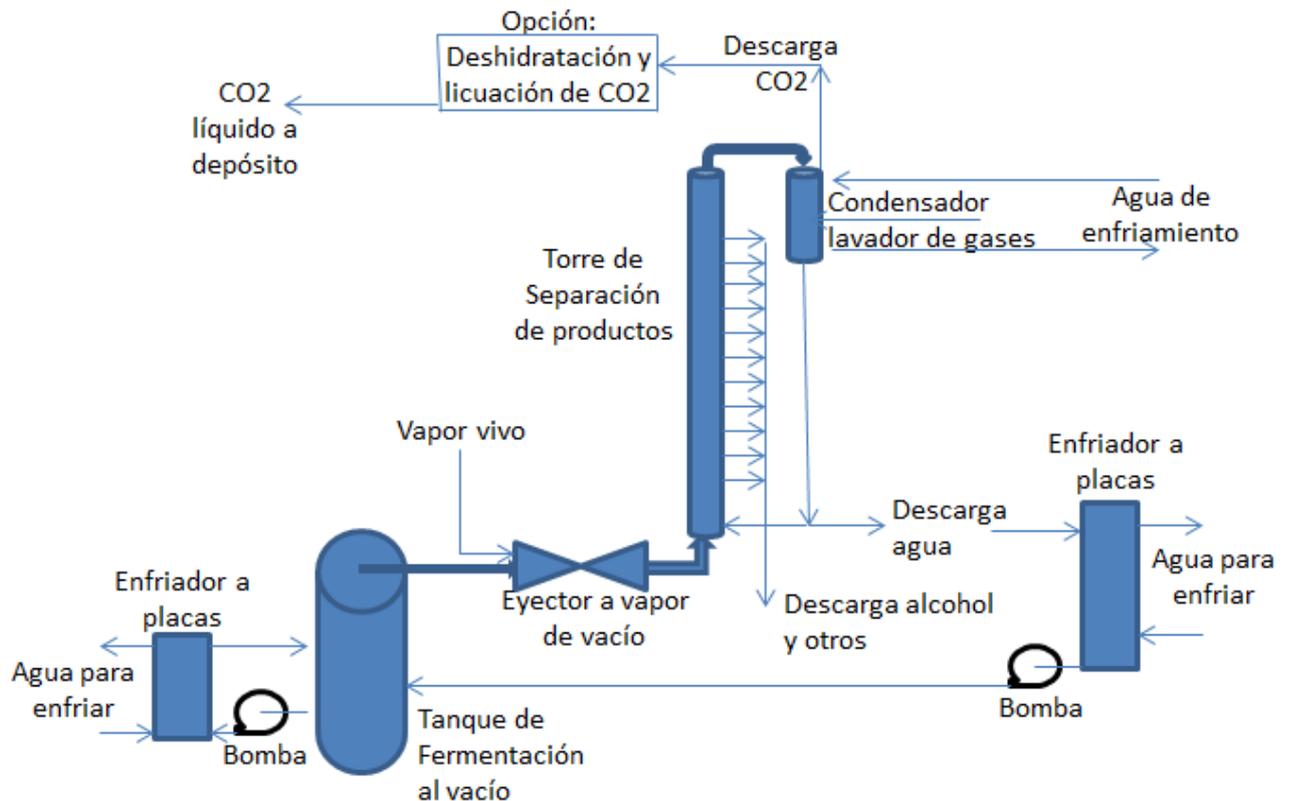
Parte del agua se debe retornar al fermentador a fin de evitar el aumento de la concentración del mosto, que produce un efecto inhibitor para el desarrollo de las levaduras.

Como se retorna un flujo de agua cuya temperatura puede variar, es imprescindible instalar un enfriador/calentador y controlar la temperatura del mosto en el fermentador.

También es necesario controlar el pH del mosto residual, que puede variar al extraer los ácidos volátiles formados durante el proceso, e implementar un medio de adición dosificada de reguladores de pH compatible con el desarrollo de las cepas.

Diagrama 5: ESQUEMA DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN AL VACÍO

## ESQUEMA DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN AL VACÍO



Aplicado a la fermentación continua, posibilita inocular con diferentes cepas a los fermentadores a medida que avanza el flujo y modifica su composición química, abriendo un abanico de posibilidades muy amplio, cuyo principal objetivo es el de obtener un producto final que sea manipulable y apto para fertirriego en cualquier tipo de suelo.

Seguramente donde se indica enfriador, en alguna etapa del proceso sea necesario incorporar calor en lugar de extraerlo.

Dada la gran cantidad de variables que afectan directamente el desarrollo de las cepas se recomienda la implementación de una instalación piloto que permita ensayos con medición y registro de los parámetros controlados.

## Descripción del proceso

La fermentación de melaza para la obtención de alcohol - bioetanol – en escala industrial requiere de tanques de fermentación donde se carga la melaza diluida con agua, jugo mixto y agua y, a veces, se incluye parte de vinaza que se recicla.

El proceso clásico se desarrolla durante un cierto tiempo de fermentación luego del cual el mosto fermentado se filtra y pasa por una centrífuga que separa la fase líquida de las levaduras y otros sólidos que pudieran estar presentes.

Esta fase líquida llamada vino se envía a una planta de destilación donde se eleva su temperatura a fin de evaporar el alcohol enviándolo a la columna de platos para la obtención de los destilados.

El tiempo de residencia del mosto en el tanque fermentador llega hasta el límite entre el desarrollo exponencial del cultivo y su etapa estacionaria en razón que durante esta última baja mucho el rendimiento de transformación de azúcares en alcoholes.

Como es de suponer ello implica un balance entre la productividad de la instalación, las necesidades de producción, la disponibilidad de la materia prima y las necesidades de elaboración de producción, función de los compromisos de entrega asumidos.

Obviamente que la interrupción temprana del proceso lleva a la pérdida de algún porcentaje de azúcar que queda residual en el mosto.

También, el aumento de temperatura del mosto aparte de evaporar a los volátiles para su destilación, “*cocina*” a las levaduras residuales que quedaron en el mosto, modificando en parte su composición.

El alto contenido de sustancias orgánicas residuales y de no-azúcares arrastrados de la producción primaria desde el ingenio, producen una complicación importante en el procesamiento posterior a la destilación y de su re-utilización como subproducto y/o disposición final.

El valor residual de la vinaza, subproducto de la fermentación alcohólica está en la alta carga de elementos que contiene y que son nutrientes que la planta de caña de azúcar necesitó para su desarrollo y la formación de savia que es la que contiene a la sacarosa.

Por la alta concentración que queda de estos no-azúcares en la vinaza se dificulta su disposición final y también su empleo para riego de las plantaciones de caña. Además la alta carga orgánica dificulta su tratamiento, manipuleo, almacenaje, etc. por la atracción de insectos y vectores diversos que produce.

Con el fin de obtener una mejora en el rendimiento de producción de alcohol, y aumentar la transformación de los residuos azucarados y también parte de la materia orgánica contenida, se propone una modificación que además disponga de otras opciones a aplicar para el mayor aprovechamiento posible del líquido residual que podría continuar con tratamiento bacteriológico con diferentes cepas.

El cambio consiste en mantener depresión en el tanque fermentador de manera que el alcohol y los otros volátiles que se producen durante la fermentación se evaporen en forma rápida reduciendo al mínimo posible la concentración de estos en el mosto.

Con el objeto de separar los compuestos obtenidos en la fermentación, que son volátiles, se plantea crear la depresión al sistema fermentador por medio de una tobera eyectora cuyo fluido motor es vapor a alta presión, que al salir del eyector, mezclado con los vapores se inyecta a una columna de platos similar a la de una destiladora, con un condensador en la parte superior.

El mosto residual del fermentador modificará su concentración y temperatura por la evaporación del agua arrastrada por el alcohol y los volátiles evaporados, siendo necesario controlar y mantener las condiciones óptimas para que el desarrollo de las levaduras se mantenga en la fase inicial también llamada “de desarrollo logarítmico”.

El principal problema es el control de los parámetros claves para mantener las mejores condiciones del desarrollo de las levaduras, que seguramente requerirá la adición gradual de sustancias que compensen la mayor transformación de compuestos azucarados en primera instancia.

El vapor arrastrará a los volátiles evaporados y también al CO<sub>2</sub>, que pasa directo al condensador superior y luego una vez lavado puede ser comprimido y licuado, o empleado al uso que se destine.

Aplicando ésta técnica a un proceso de fermentación continua se deberá ajustar el paso de un recipiente al siguiente en función de la medición del

rendimiento de cada etapa y/o del valor de los parámetros que se seleccionan como controladores de cada etapa.

De esta forma se puede pasar por varias etapas consecutivas y lograr aumentar la producción de alcohol, incorporando a las etapas siguientes de la inicial a cepas adaptadas a la concentración de sustancia que contenga el mosto en cada tanque.

De la columna de donde se separan los productos, se pueden obtener no solamente el combustible bioetanol, sino una importante variedad de productos de origen orgánico que sea factible de producir.

Para la implementación de la diversas opciones se deben llevar a cabo los balances de masa y de energía de cada una de las etapas del proceso, los cambios en la composición química del mosto a medida que avanza en éstas (las etapas del proceso) y los productos orgánicos disponibles para fermentación, y según ello, seleccionar la cepa más apropiada para los productos que sea posible obtener.

De ésta manera se lograría reducir significativamente el volumen de mosto residual, llamado vinaza en el proceso tradicional, y que éste producto final tenga un contenido de sustancias adecuado para su empleo en fertilización y beneficio de suelos productivos.

Por supuesto que para cada etapa se debe disponer de los elementos de control automatizados para mantener estables dentro de una banda de regulación predeterminada, los parámetros controladores que, *prima facie* son la temperatura y el pH del mosto. También se debe tener en cuenta su homogeneización a lo largo del avance de la fermentación en cada una de las etapas.

El calor que ingresa es el que se libera por la reacción de fermentación y a su vez se le suma el calor aportado por el vapor, cuyo condensado mezclado con el agua evaporada del mosto debería regresar al tanque, por lo menos una parte, a fin de mantener la concentración dentro de los parámetros fijados.

Es importantísimo tener en cuenta que el vapor vivo que se utiliza como fluido motor en la tobera eyectora debe estar libre de sustancias como las adicionadas para el tratamiento de agua de las calderas, que en general son volátiles (para que arrastrados por el vapor formen una película protectora de las tuberías de alta presión).

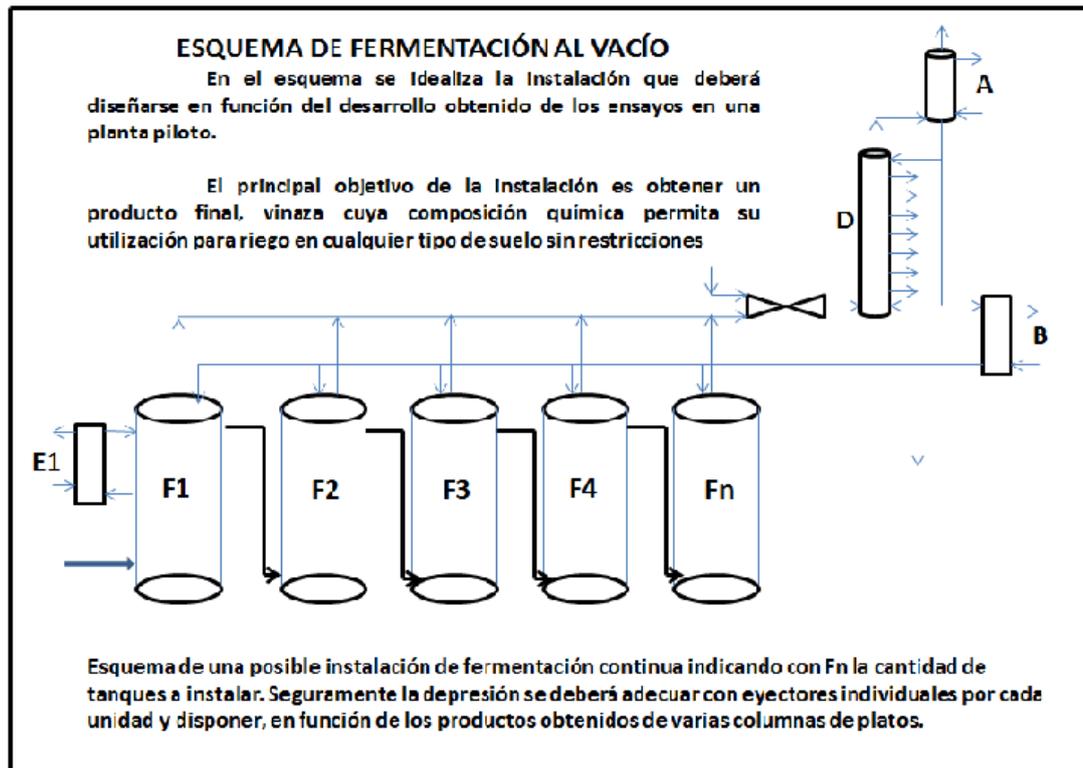
## Fermentación extractiva

VARIABLES A CONSIDERAR PARA VALORAR LOS PARÁMETROS DEL PROCESO.

- Presión de trabajo.
- Calor incorporado por el desarrollo de las levaduras.
- Calor para evaporación de los VOC y agua.
- Volumen y masa de vapores a evacuar del reactor de fermentación.
- Energía a extraer/incorporar al reactor.
- Caudal de ingreso de mosto.
- Temperatura a mantener en el mosto.
- pH a mantener.
- Control del potencial de óxido reducción.
- °Brix.
- Análisis de concentración de iones.

Durante el desarrollo del trabajo es conveniente evaluar la posibilidad de requerir el control de otros parámetros.

**Diagrama 6: ESQUEMA DE FERMENTACIÓN EXTRACTIVA**



A continuación se muestra el **Diagrama 7** que representa una etapa del proceso de fermentación continua con extracción por vacío.

Para que el sistema pueda funcionar debería estar controlado por un sistema computarizado que en función de todos los valores medidos y del instructivo implementado efectúe los ajustes necesarios para mantener lo más constante posible estos valores y con ello los rendimientos y lograr el agotamiento total de los azúcares del mosto en fermentación.

A continuación de esta primera etapa se puede implementar un número variable de etapas, abriendo un espectro amplio de posibilidades de obtención de diversos productos, de acuerdo con la composición del mosto residual y la disponibilidad de levaduras que produzcan compuestos de interés para el mercado.

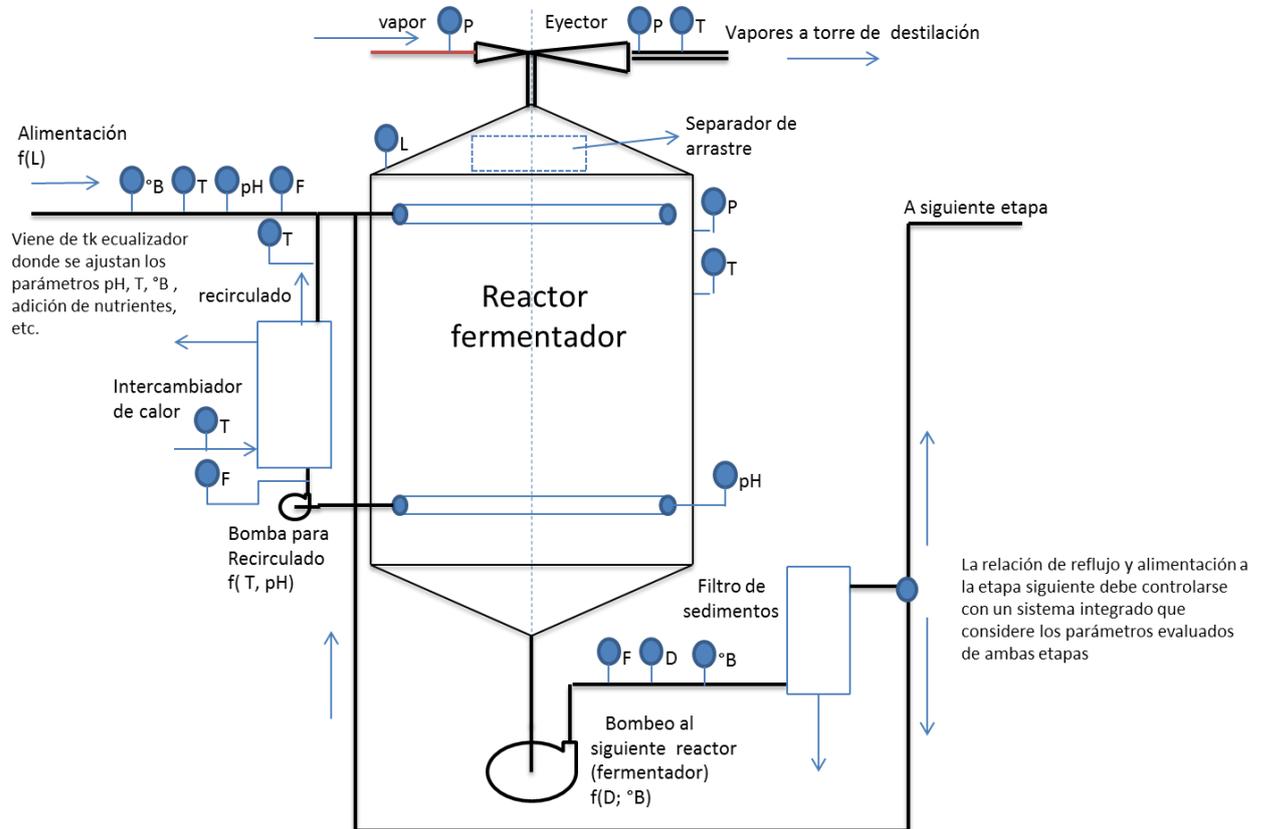
Una forma posible es la de instalar tanques intermedios que actúen de equalizadores y de ajuste de las características necesarias para cada etapa con la sola limitación que los productos de estas etapas deberían tener un punto de evaporación con temperaturas inferiores a las del agua de forma de continuar con la extracción por vacío, o pasar al uso de instalaciones como la descrita en el **Diagrama 4**.

En el caso de que el producto de interés requiera de un aumento de temperatura se debería enviar el mosto previamente calentado a una columna de destilación separada, única donde finalizaría el proceso por las transformaciones que se producen en el mosto durante la etapa de calentamiento.

- Proceso de fermentación extractiva por vacío.
- El proceso de fermentación alcohólica tiende a disminuir en su actividad de producción de etanol a partir del momento que la concentración de éste, el etanol, supera un cierto valor y comienza a intoxicar a las levaduras que lo producen.
- En un mosto en fermentación, la producción de alcohol es función del desarrollo de las levaduras y su producción sigue aproximadamente las pautas de crecimiento de la población.

## Diagrama 7: FERMENTACIÓN EXTRACTIVA POR VACÍO

### ESQUEMA DE LA PRIMER ETAPA DE FEMENTACION EXTRACTIVA POR VACÍO



- Para ilustrar este tema se presenta la curva de crecimiento del cultivo en el mosto, donde se grafica la cantidad de levaduras en un gráfico cartesiano donde en eje Y se indica el Log N; población en unidades y en eje X el tiempo generalmente en hs.

En la **Figura 7** se muestra la curva típica del desarrollo de un cultivo.

## *Cultivo de microorganismos*

### **Crecimiento microbiano en medio líquido**

Para la fermentación alcohólica las levaduras se desarrollan en medio líquido, y en la mayoría de los casos las células que se producen en cada

división continúan su vida independientemente formándose una suspensión de células libres.

En un cultivo batch los microorganismos se desarrollan de acuerdo a cuatro fases diferentes.

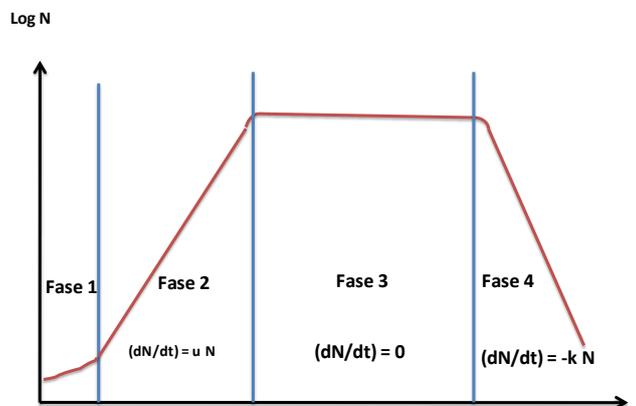
**1. Fase inicial o de adaptación** durante la que los microorganismos adaptan su metabolismo a las nuevas condiciones ambientales donde abundan nutrientes y óptimas condiciones de desarrollo iniciando una etapa de crecimiento exponencial.

**2. Fase exponencial o logarítmica** en ella la velocidad de crecimiento es máxima y el tiempo de generación es mínimo.

Durante esta fase los microorganismos consumen a velocidad máxima los nutrientes del medio y el aumento de la población se representa por modelos matemáticos que se enuncian a continuación.

A continuación se grafica el desarrollo bacteriano representando en el eje Y el número de bacterias, en escala logarítmica y en eje X el tiempo transcurrido para cada etapa representada.

**3. Fase estacionaria.** En ella la población de bacterias se mantiene constante. Las células en esta fase desarrollan un metabolismo diferente al de la fase exponencial y durante ella se produce una acumulación y liberación de metabolitos secundarios que pueden tener importancia industrial.



39

**Figura7: DESARROLLO DE POBLACIÓN DE UN CULTIVO**

Los microorganismos entran en la Fase 3, estacionaria por agotamiento de alguno de los nutrientes esenciales del medio o porque los productos de desecho que han liberado durante la Fase 2 exponencial hacen que el medio sea inhóspito para el desarrollo y probablemente represente el estado real metabólico que se produce en ambiente naturales con mayor fidelidad.

**4. Fase de muerte**, se produce cuando hay reducción del número de células vivas en el medio.

### **Proceso de fermentación extractiva**

Para una simulación de operación de planta se plantea el siguiente esquema de trabajo:

Inicio de la preparación en un tanque homogeneizador y un tanque ecualizador.

En el tanque homogeneizador se obtiene una mezcla homogénea de agua y melaza que debe mantener una concentración y acidez prefijada.

Como el sistema es continuo se regulan los flujos de alimentación de ambos productos y a la vez se ajusta el pH con dosificación de ácido o solución alcalina, que proviene de dos tanques separados y con la normalidad ya ajustada. Se debe evitar la adición de productos concentrados, que se podrían diluir en el tanque homogeneizador, por lo difícil que resultaría obtener valores precisos de pH y las oscilaciones que ello produciría.

Lo mismo sucede con aportes de flujo con diferencias de temperatura elevadas, se debe plantear una transferencia de calor con un salto térmico pequeño y un flujo grande.

El salto de temperatura debe ser controlado muy cuidadosamente condicionando a los sistemas con el empleo de sensores de alta sensibilidad porque una diferencia exagerada de temperatura entre entrada y salida destruye a las levaduras que se van adicionando a medida que ingresa la melaza y el agua.

En este tanque es donde se prepara la melaza diluida y se ajustan automáticamente los parámetros de control del proceso.

El concentrado de levaduras, pie de cuba, es lo último que se agrega cuando la mezcla con los valores ajustados pasó al tanque ecualizador, que

debe tener un Tiempo de Residencia Hidráulico (TRH) reducido y estar cerrado, con una tubería de ecualización de presiones, algo menor que PTN pero mayor que la de trabajo del fermentador, ya que en este se inicia la etapa de desarrollo de las levaduras y debería ser ambiente anaeróbico.

En el caso que se detecten variaciones bruscas en el tanque homogeneizador, que al ser flujo continuo arrastra las variaciones al ecualizador, una manera de atenuar las variaciones muy bruscas de composición es la de generar un reflujo inyectando al ecualizador una corriente del fermentador a la vez que se aumenta en igual proporción el flujo de salida del ecualizador al fermentador.

También se controlan los parámetros del fermentador y cuando el THR aumenta para lograr una transformación de los azúcares agotándolos hasta los valores establecidos como ajustes de operación, se debe disponer la opción del envío desde el ecualizador al segundo fermentador.

De esta manera se dispone de la opción de trabajo en serie o en paralelo y con un ajuste de parámetros evaluados en cada uno de los fermentadores, aumentar el rendimiento total y también estabilizar la operación del tercer o cuarto fermentador que funcionaría como terminador para la producción de alcoholes por el agotamiento total de azúcares.

A partir del último fermentador se dispone de un mosto residual, que no es vinaza, porque se ha mantenido a baja temperatura y con mayor concentración que la vinaza usualmente obtenida, que puede pasar a una etapa posterior de degradación de la materia orgánica residual, ya sea por acetogénesis y metanogénesis u algún otro proceso para obtención de productos por desarrollo de bacterias o levaduras.

También se puede plantear la concentración y secado para adición a alimentos balanceados, o su incorporación a mezclas para producción de fertilizantes orgánicos por compostaje.

## **Producción de biofertilizantes**

Es una opción que está en fase de desarrollo con buenas perspectivas para el aprovechamiento integral de los sub-productos que se obtienen del procesamiento de la caña de azúcar, que son la cachaza, cenizas y vinaza.

Para que el desarrollo de las bacterias que producen la transformación de las sustancias de la mezcla en compuestos asimilables por los cultivos, se deba controlar la humedad, la temperatura y una remoción periódica para la aireación, que es el momento en que se adiciona la vinaza como fuente de nutrientes y humedad.

Este proceso, denominado compostaje, tiene una gran importancia al valorizar los tres principales subproductos del proceso de la caña de azúcar, quedando solamente por incorporar al circuito productivo el RAC que al momento se desaprovecha a pesar del alto potencial energético que posee.

Una de las principales ventajas del fertilizante orgánico es la de, una vez seco, poder ser utilizado en campos en producción, incorporándolo al cultivo cuando el desarrollo es incipiente y que tiene un potencial y un poder residual importante, perdurando el efecto mayor tiempo que los productos que incorporan nitrógeno como es el caso de la urea, cuyas pérdidas por nitrificación, lixiviado, sublimación, etc. son muy altas.

Para asegurar la rentabilidad de la producción las instalaciones de preparación del biofertilizante deben ubicarse lo más cerca posible del ingenio y de los campos donde se prevé su aplicación con el objetivo de reducir la incidencia del transporte.

## ***Conclusiones del Capítulo***

Sumando todas las posibles acciones a llevar adelante en la mejora del proceso para la obtención de los productos de interés que ofrece una materia prima con la Caña de Azúcar, se *debería poder* llevar a un grado de sustentabilidad mucho mayor que el procesamiento actualmente empleado.

Aquí se indica “*debería poder*”, porque el problema principal, si bien hay dificultades tecnológicas, es el de la rentabilidad de los procesos que se emplean. Pero las condiciones económicas del mercado, que son las rectoras del desarrollo tecnológico, son cambiantes y funcionan de acuerdo a la oferta y demanda, siempre que se eviten interferencias y condicionamientos que desvíen el rumbo hacia el empleo de las tecnologías existentes, que en muchos casos son obsoletas y contaminantes.

Por ello es previsible que en plazos relativamente cortos se superen los inconvenientes que actualmente frenan el desarrollo y la implementación de nuevos procesos, más eficientes y sobre todo, menos contaminantes.

Sumando a estas previsiones, las posibilidades que ofrecen los procesos biológicos con el empleo de microorganismos genéticamente modificados, la probabilidad de lograr grandes avances en el procesamiento de productos de origen agrícola se amplían y con mejores tecnologías que lleven adelante procesos más limpios, se llegue a la sustentabilidad tan necesaria para mantener el equilibrio de la relación entre los seres humanos y la naturaleza.

Como ejemplo de los posibles desarrollos a llevar adelante se cita el del empleo de Cianobacterias que, genéticamente modificadas (Woods *et al.* 2007), producen alcohol utilizando como fuente de energía la luz solar y a través de un proceso de fotosíntesis y absorbiendo CO<sub>2</sub> del aire logran la producción de alcohol a escala industrial.

Citando ejemplos como estos, se prevén posibilidades de trabajo que exceden a la imaginación y presentan un gran desafío para las generaciones futuras que dispondrán de las herramientas tecnológicas y del conocimiento suficiente para llevar a cabo los desarrollos que a la fecha solo están en los laboratorios de *R&D* y en algunos países cuyos recursos permiten la ampliación y aplicación a escalas industriales.

Por ello el mayor desafío que se presenta es el de la capacitación, donde se requiere poner mayor énfasis en las metodologías de aprendizaje que

optimicen la captación de conocimientos por parte de las nuevas generaciones y los preparen para los futuros retos que deberán enfrentar.

Sumando estos desafíos al de la necesaria adaptación de los minifundistas que aún a sabiendas toman actitudes que representan acciones negativas para el normal desarrollo y aplicación de los cambios en los procesos, se presenta un futuro muy promisorio y con un compromiso cada vez mayor por parte de todos los actores intervinientes.

## CAPÍTULO 6

# CONCLUSIONES FINALES

El trabajo se enfocó hacia la eliminación de la mayor cantidad posible de impurezas – no azúcares – que acompañan a la sacarosa que contiene el jugo de caña luego de la extracción del tallo de la planta.

Algunas impurezas que se incorporan durante el proceso de triturado y prensado son más fácilmente eliminables que otras, separándolas por una simple precipitación con el agregado de sustancias químicas cuya acción principal es la de reaccionar y formar compuestos no solubles que se aglomeran y separan por sedimentación.

Otras, que son solubles, se pueden separar únicamente por medio de reacciones químicas específicas que, muchas veces, son más perjudiciales que beneficiosas. Estas impurezas se podrían separar por otros medios que pueden ser físicos o químicos, pero que requieren un control estricto de la composición y la dosificación de aditivos siguiendo las variaciones del contenido de las impurezas en el jugo.

Para poder mejorar el proceso de industrialización de la caña es necesario integrar el trabajo del campo con la industria que elabora la caña y obtiene los productos de valor buscados que son el ingenio y la destilería.

La mencionada integración implica una serie de compromisos y pautas de trabajo que se requieren establecer en función de la evaluación y cuantificación de las variables controlantes del proceso de preparación de la materia prima obtenida de la caña, la savia extraída también llamada *jugo de caña*.

Para que el proceso industrial de producción tenga las condiciones óptimas de elaboración se deben establecer programas de trabajo que con suficiente flexibilidad permitan obtener una materia prima que tenga la menor variación posible en su composición química.

Como en todo proceso industrial, el rendimiento del mismo y la calidad del producto elaborado dependen en forma directa de la materia prima y del proceso que se aplica, que deberá ser el adecuado a la composición química de ésta, la materia prima disponible.

De ésta materia prima se busca de obtener como producto de valor la sacarosa que se encuentra disuelta y que para obtenerla debe pasar por una serie de etapas para purificarla, concentrarla, cristalizarla, sepárala del líquido residual que la rodea, lavarla, centrifugarla, secarla y envasarla.

Por lo tanto, como en todos los procesos donde se elaboran productos de materias primas de origen vegetal, es normal y aceptable que exista una variación en la composición química de la materia prima.

Lo que se necesita, desde el punto de vista del ingenio, es la adecuación de los parámetros de composición de la caña a valores constantes, predecibles y medibles con instrumental suficientemente robusto para un trabajo continuo.

Con dichos valores se debería poder ajustar las variables del proceso de eliminación de impurezas – Clarificación – para que sea lo más efectivo posible con el objeto de generar un efluente final de todo el ciclo de trabajo, la Vinaza, que sea menos contaminante y que sea utilizable como sub-producto fácilmente aplicable al actual uso en fertirriego sin las limitaciones de empleo por la alta carga de sales y otros compuestos.

Se concluye que el ciclo de trabajo que se lleva a cabo en la fabricación del azúcar de la caña es posible de mejorar pero que requiere para ello de una acción integrada entre el productor primario y el elaborador de dicha materia prima que es el ingenio azucarero.

Tal como se detalla en el Resumen y en la Presentación, tanto el productor primario como el que elabora esa producción deberían trabajar mancomunados con un solo objetivo final único y que, tal como se demuestra en los capítulos precedentes, es el de asegurar la **SUSTENTABILIDAD** de la producción agroindustrial con prioridad para el sector agrícola.

Dicha producción agrícola es la base de sustento del trabajo de los productores independientes que suman un porcentaje importante en la provisión de la materia prima a las industrias que radicadas en la Provincia de Tucumán y deben afrontar el desafío en cada zafra de procesar “*lo que le llevan*” y con ello asumir la responsabilidad del cuidado del ambiente, cada vez más exigente de atención.

Seguramente se podría acompañar el cambio necesario a aplicar al proceso integrado de campo e industria con la generación de instrumentos legales que definan y encuadren claramente las pautas del accionar conjunto, con márgenes de guía que eviten los desvíos que, cuando concluyen con

detrimentos ambientales, deben ser saneados y mitigados en forma inmediata por todos los que han sumado algún cambio sin contar con el acuerdo de todos.

Con el párrafo precedente se quiere significar que aunque sea productor primario, comúnmente llamado “cañero”, no debería desentenderse de su producción hasta que la misma fuera totalmente elaborada, siguiendo las pautas para alcanzar la trazabilidad hasta la clarificación, muy difícil de alcanzar en las condiciones de trabajo tradicionales. Solo se podría obtener una aproximación con un sistema totalmente organizado.

Aunque en primer momento sea difícil de comprender porque en general se considera al productor primario como la víctima o la parte débil del proceso cuando dispone de una superficie cultivable reducida o sea que cuenta con escasos recursos, debería cumplir igualmente todas las pautas que fija un cuidado ambiental necesario para alcanzar la tan ansiada sustentabilidad de la producción.

Con ello se debería exigir el cumplimiento de las pautas de trabajo que fija la industria que recibe su caña y que asuma los controles y demás costos que no puede asumir el productor para que su producción sea de calidad aceptable y le permita al ingenio mantener un adecuado desempeño ambiental.

Sin embargo a través de una lectura rápida pareciera que las propuestas atentan contra la libertad de trabajo y de desempeño, debemos o deberíamos recordar siempre que la producción agrícola es altamente contaminante del ambiente, que no se percibe tan directamente como la contaminación industrial porque es difusa, pero es de una magnitud significativa e importante y que a su vez produce alta erosión en los suelos cuando el desempeño es inadecuado.

Como ejemplo de la necesidad que el productor agrícola asuma con responsabilidad su trabajo se cita la *Resolución por la cual se establecen las normas que regulan la recepción, muestreo, análisis y cálculo del rendimiento de la caña de azúcar de producción nacional por parte de las centrales azucareros en todo el territorio nacional* publicada en la Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela el 8 de diciembre de 2008 bajo el número 39.076.

En dicha norma establecen un periodo de tiempo entre el corte y la recepción de la caña por la industria de 24 horas, aplicando descuentos sobre

el rendimiento cuando se excede llegando al 2 % para un máximo de 72 horas.

Además, la citada norma asigna a la industria establecer el programa de corte en función del índice de madurez identificando el sitio de zafra debiendo identificar por separado lotes de distinto *tablón* identificando de esta manera las áreas de cosecha.

Un ejemplo muy contundente es el daño ambiental que produce la quema de la caña, práctica aún muy extendida entre los productores, sobre todo los que tienen menores superficies de tierra cultivada, por la facilidad que se produce para el corte y la recolección cuando se efectúan manualmente estos trabajos.

Demás está en explayarse sobre el daño que produce este tipo de acciones que son penadas por Ley pero que es muy difícil de demostrar la culpabilidad del autor del hecho y que perjudica el desarrollo del proceso de elaboración de la caña por el deterioro que produce en la composición química de la savia.

El trabajo está orientado a buscar las causas de las dificultades del proceso para la elaboración del azúcar y sus derivados y de plantear posibles cambios que mejoren el desempeño ambiental, tomando en consideración a todos los actores que intervienen en la cadena de valor del producto y los cambios que cada uno, en su propio ámbito, debe llevar a cabo.

## CAPÍTULO 7

### BIBLIOGRAFÍA

- ABBARA Abdul Aziz, ABDEL-RAHMAN Ali K. & BAYOUMI Mohamed R 2002. **Application of membrane filtration to the sugar industry, state of the art.** Sugar Technology Research Institute, Assiut University, Egypt.
- ABBARA Abdul Aziz, ABDEL-RAHMAN Ali K. & BAYOUMI Mohamed R. 2004. **Microfiltration and Ultrafiltration of Sugarcane Juice in the Production of Plantation White Sugar.** Sugar Technology Research Institute, Department of Food Engineering, Al-Baath University, Homs, Syria.
- ABDALBASIT Mohamed, GASMALA A. YANG Rujin, NIKOO Mehdi, & MAN Su. 2012. **Production of Ethanol from Sudanese Sugar Cane Molasses and Evaluation of Its Quality.** Jiangnan University, Wuxi China.
- AGUILAR Antonio, HERNÁNDEZ Bárbara & OLIVA Deny. 2007. **Solución medioambiental sustentable en la cosecha de la caña.** CINAZ, La Habana, Cuba.
- AGUILAR N., RODRIGUEZ LAGUNES D. A. & CASTILLO MORÁN A. 2010. **Azúcar, co-productos y sub-productos en la diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar.** Facultad de Ciencias Biológicas y Agrícolas. Universidad Veracruzana. Veracruz. México.
- AKBAR Nadia M. & KHWAJA Mahmood A. 2006. **Study on Effluents from Selected Sugar Mills in Pakistan: Potential Environmental, Health, and Economic Consequences of an Excessive Pollution Load.** Sustainable Development Policy Institute (SDPI). Islamabad, Pakistan.
- ARAÚJO, Federico A. Dantas de. 2007. **Processo de clarificação do caldo decana pelo método da bicarbonatação.** Universidade Católica de Pernambuco. Brasil. Revista Ciências & Tecnologia. Ano 1 • n. 1 • julho-dezembro 2007.

- BECERRA HERNANDEZ Catalina, GÓMEZ CABAL Diana María & MARRIAGA CABRALES Nilson. 2008. **Tratamiento de Vinazas**. Escuela de Ingeniería Química. Cali, Colombia.
- BHATTACHARYA P. K., SHILPI AGRAWAL S. & RAMA GOPAL U. V. S. 2000. **Ultrafiltration of sugar cane juice for recovery of sugar: analysis of flux and retention**. Department of Chemical Engineering, Indian Institute of Technology. Separation and Purification Technology 21.Pp.: 247-259.
- BOLAÑOS DE FORD Fernando. 2005. **Polisacáridos de la caña, su efecto en la calidad del azúcar y algunos mecanismos de control**. Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar.
- BONELLI César Luis, PILAN María T. *et al.* 2007. **Informe final sobre estado de la biota del embalse Río Hondo y afluentes**. Santiago del Estero, Subsecretaría de Recursos Hídricos, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Universidad Nacional de Córdoba.
- BORGES Eduardo P., LOPES Mario Lucio & AMORIM Henrique. 2012. **Impact of sugar cane juice chemical composition on clarification and VHP sugar quality**. International Sugar Journal 2012, Vol. 114, No. 1364 pp 552-558.
- BURK Mark J. 2010. **Sustainable production of industrial chemicals from sugars**. International Sugar Journal 2010, Vol. 112, No. 1333 pg 30-35.
- CÁRDENAS Jerónimo J. 2007. **Potencialidad del cultivo de caña de azúcar en Argentina como fuente de bioetanol**. Estación Experimental Agroindustrial “Obispo Colombres”. Las Talitas, Tucumán, Argentina.
- CARDONA MONTOYA Mónica Liliana. 2009. **Seguimiento de las variables fisicoquímicas del clarificador sri y verificación de la eficiencia del tacho continuo fletcher smith para la optimización de la elaboración de azúcar en el INGENIO RISARALDA**. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia.
- CARRIZO Ramón, DONNARI Eva, MARCOS Oscar & PRIERI Ana. 2006. **Potencial geológico-minero de ceolitas sedimentarias en el distrito**

**Paganzo.** La Rioja: Servicio Geológico Minero Argentino, Anuario 2005.

CASEN S. D., MARTO L. A., MEDINA M. M., ROMERO R. E., TORRES BUGEAU, A. & PEREZ, D. 2011. **Evaluación del desempeño de dos enfardadoras para la recolección de residuo agrícola de cosecha (RAC) de caña de azúcar en Tucumán.** Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes. Av. W. Cross 3150, Las Talitas, Tucumán, Argentina.

CHOU Chung Chi & ENGEL Livia. 2009. **Simplified refining process for the 21st century.** Sugar Industry Technologists, Louisiana, USA.

CORDOVÉS HERRERA, Marianela. 2007. **Cane sugar and the environment. Industrial promotion.** GEPLACEA.

CORTÉZ Raúl Alejandro. 2003. **Direct white sugar production: Optimization and chemical regeneration of fixed-bed activated carbon adsorbers.** Faculty of the Louisiana State University. Louisiana. USA.

CUERVO MULET, Raúl A., LEDESMA Johanny Angel, DURÁN VENEGAS José Antonio & ARGOTE VEGA Fransisco E. 2010. **Aislamiento y control microbiológico de Leuconostoc Mesteroides, en un ingenio para optimizar el rendimiento de azúcar y etanol.** Universidad de San Buenaventura. Colombia. Vol 8 No 2 Julio-diciembre 2010.

D'ANGELO Juan, PAZ Dora & CÁRDENAS Gerónimo J. 2006. **Posibilidades del secado de bagazo en la industria azucarera de México.** Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes, Las Taitas, Tucumán, Argentina. Ingeniería Mecánica Tecnología y Desarrollo Vol. 2 No. 2 (2006) 41 – 46.

DEAN John A. 1976. **LANGE'S HANDBOOK OF CHEMISTRY.** Professor Emeritus of Chemistry. University of Tennessee, Knoxville. MCGRAW-HILL, INC. Fifteenth Edition.

DE OLIVA NETO Pedro, DORTA Claudia, AZEVEDO CARVALHO Ana Flavia, GOMEZ DE LIMA Valeria Marta & FERNANDEZ DA SILVA Douglas. 2013. **The Brazilian technology of fuel ethanol fermentation – yeast inhibition factors and new perspectives to**

**improve the technology.** Materials and processes for energy: (A. MÉNDEZ VILAS Ed.). Brasil.

DOHERTY W. O. S. & EDYE L. A. 1999.**An overview on the chemistry of clarification of cane sugar juice.** Sugar research Institute. Mackay,QLD. Au. Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol., 21: 381-388, 1999.

DOHERTY W.O.S., GREENWOOD J., PILASKI D. & WRIGHT P.G. 2002.**The effect of liming conditions in juice clarification.** Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol., Vol. 24, 2002.

DOHERTY William O. S., FELLOWS Christoper M., GORJIAN Sargon, SENGOLES Ernst & CHEUNG Wai Hung. 2003. **Flocculation and sedimentation of cane sugar juice particles with cationic homo- and co-polymers.** Australia. Journal of Applied Polymer Science 90(1):316-325.

DOHERTY W.O.S., RACKEMANN D.W. 2009. **Some aspects of calcium phosphate chemistry in sugarcane clarification.** Sugar Research and Innovation, Queensland University of Technology, Brisbane, Qld, Australia.

DOMÍNGUEZ-DOMÍNGUEZ María M., ÁLVAREZ-CASTILLO Alberto, GRANADOS-BAEZA Manuel & HERNÁNDEZ-CAMPOS Francisco. 2012. **Estudio de la cinética del pretratamiento e hidrólisis ácida del bagazo de caña de azúcar.** Instituto Tecnológico de Zacatepec, Mexico.

DYMOND By G. C.. 1950. **Multiple effect evaporator scale in NATAL** Resumee pg. 63 – 67.

EAAOC. 2014. **Reporte agroindustrial.** Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Las Talitas, Tucumán. N° 90. Enero 2014. ISSN 2346-9102.

EAAOC. 2015. **Reporte Industrial, Boletín 103 Enero 2015.** Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Las Talitas, Tucumán. N° 90. Enero 2014. ISSN 2346-9102.

EGGLESTON Guillian, MONGE Drian & OGIER Blaine E. 2002.**Sugarcane factory performance of cold, intermediate, and hot**

**lime clarification processes.** Journal of Food Processing Preservation 26 (2003) 433-454.

EGGLESTON Gillian, HARPER William. 2006. **Determination of sugarcane deterioration at the factory: Development of a rapid, easy and inexpensive enzymatic method to measure mannitol.** United States Food Chemistry 98 (2006) 366–372.

ENSINAS Adriano, NEBRA Silvia A., LOZANO Miguel A. & SERRA Luis. 2007. **Design of Evaporation Systems and Heaters Networks in Sugar Cane Factories Using a Thermoeconomic Optimization Procedure.** State University of Campinas, Campinas-SP, Brazil.

FADDA Guillermo & MORANDINI Miguel. 2002. **El uso agrícola de la vinaza. Revisión de antecedentes y caracterización de las condiciones del área cañera Tucumana para su aplicación.** Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Las Talitas, Tucumán, Argentina.

FADEL M., KERRA Abeer A., MOUAFI Foukia E. & KAHIL Tarek. 2013. **High Level Ethanol from Sugar Cane Molasses by a New Thermotolerant *Saccharomyces cerevisiae* Strain in Industrial Scale.** National Research Center, Dokki, Cairo, Egypt.

FAJARDO CASTILLO Erika Esperanza & SARMIENTO FORRERO Sandra Constanza. 2007. **Evaluación de melaza de caña como sustrato para la producción de *saccharomices cerevisiae*.** Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

FILHO Murillo Villela, ARAUJO Carlos, BONFÁ Alfredo & PORTO Weber. 2011. **Chemistry Based on Renewable Raw Materials: Perspectives for a Sugar Cane-Based Biorefinery.** São Paulo, SP, Brazil.

FLÓREZ GÁLVEZ Diana María. 2007. **Evaluación comparativa del método de sulfitación frente al empleo de Peróxido de hidrógeno en el proceso de decoloración de meladura en el Ingenio Risaralda s. a.** Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia.

FOGLIATA, Franco A. 2014. **Los cañaverales de Tucumán están perdiendo productividad por hectárea.** Colegio de Ingenieros Agrónomos y Zootecnistas de Tucumán.

GACETA OFICIAL De la República Bolivariana de Venezuela. **Resolución por la cual se establecen las normas que regulan la recepción, muestreo, análisis y cálculo de rendimiento de la caña de azúcar de producción nacional por parte de los centrales azucareros en todo el territorio nacional.** Publicación N° 39.076 de fecha 9 diciembre 2008.

GARCÍA CLAROS Juan Carlos. 2011. **Emissão de gases de efeito estufa na obtenção do etanol de cana-de-açúcar: uma avaliação considerando diferentes cenários tecnológicos em MINAS GERAIS.** Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. Brasil.

GARCÍA-GARCÍA, Lucia; BORDALLO-LÓPEZ, Eduardo; DOPICO-RAMÍREZ, Daisy & CORDERO-FERNÁNDEZ, Dolores. 2013. **Obtención de celulosa microcristalina a partir del bagazo de la caña de azúcar.** Ciudad de La Habana, Cuba. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, vol. 47, núm. 1, enero-abril, 2013, pp. 57-63.

GONCALVES G. C., MENDES E. S., PEREIRA N. C., BARROS S. T. D. de. & DA COSTA S. C. 2005. **Operating parameters influence of ultrafiltration on flux and quality of sugarcane juice permeate.** Universidade Estadual de Maringá. Brasil.

GROßMANN Dirk & PELAEZ, Manuel. 1970. **Remoción y prevención de incrustaciones en las fábricas productoras de azúcar de caña.** KEBO GmbH&Co.KG, Düsseldorf, Germany.

HERNÁNDEZ NODARSE, C. Maria Teresa. 2000. **Tendencias actuales en la producción de bioetanol.** Universidad Rafael Landívar, Boletín Electrónico No. 08.

JENEKAR G. M. 2005. **Production of Sulphur free sugar by Phosphatation.** Vishnupuri, Nanded, India.

KHAN Mohammad Rafiq. 2010. **Potential of Thermoelectric Power from Bagasse by Sugar Mills of Pakistan.** Thailand.

KULKARNI By D.P. 1986. **Cane sugar manufacture in India.** Published by: The Sugar Technologists' Association of India. New Delhi. India.

KUMAR Vishal, VIJAY V. K. & AGRAWAL U. S. 2001. **Studies on Centrifugal Clarification of Sugarcane Juice - Possibilities and**

**Limitations.** Centre for Rural Development & Technology, IIT Delhi, India.

KUMAR Santosh, SINGH Neetu & PRASAD Ram. 2010. Department of Chemical Engineering. H. B. Technological Institute. Kampur. India.

LARRAHONDO Jesús E. 2012. **La caña de azúcar como planta biofábrica, sus subproductos y coproductos. La caña de azúcar como recurso renovable.** Corporación BIOTEC. Colombia.

LEÓN-MARTINEZ Tamara, DOPICO-RAMIREZ Daisy, TRIANA-HERNANDEZ Omar & MEDINA ESTEVEZ Marelys. 2013. **Paja de la caña de azúcar. Sus usos en la actualidad.** Ciudad de La Habana, Cuba.

LOAYZA PÉREZ Jorge Eduardo. 2009. **Fundamentos para el diseño de procesos industriales sostenibles.** Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú.

MARÍN OCAMPO Laura Viviana. 2012. **Determinación de las condiciones apropiadas de preparación de un floculante como componente fundamental en el proceso de clarificación de jugo en RIOPAILA CASTILLA S.A, Planta RIOPAILA.** Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia.

MATHIER Diego, SALEME Pablo, BRAGACHINI Mario, SÁNCHEZ Federico, BRAGACHINI Marcos & MÉNDEZ José. 2012. **La caña de azúcar como cultivo energético.** INTA, Argentina.

MATIC M., 1969. **Aspects of flotation clarification of mixed juice.** Sugar Milling Research Institute. June 1969 pg. 199 – 205.

MESA ORAMA Jesus & GONZÁLEZ PENICHET Leonel. 2003. **Balance de CO<sub>2</sub> en la obtención de energía renovable a partir de caña de azúcar.** ICIDCA, Cuba.

MONES Luc. 2001. **Sugarcane as Renewable Feedstock for the Chemical Industry: Challenges and Opportunities.** National Renewable Energy Laboratory (NERL). Colorado. USA.

MONTE ALEGRE Ranulfo, RIGO Maurício & JOEKES Inés. 2003. **Ethanol Fermentation of a Diluted Molasses Medium by**

***Saccharomyces cerevisiae* Immobilized on Chrysotile.** Faculdade de Engenharia de Alimentos; UNICAMP; Campinas - SP - Brazil.

MORANDINI Miguel, HERNÁNDEZ Carlos, ROJAS QUINTEROS Hugo, SANZANO Agustín. 2009. **Efecto de la conservación de residuos de cosecha de la caña de azúcar en la temperatura de un suelo Argiudol típico de la Llanura & Chacopampeana sub húmeda - húmeda (Tucumán - Argentina).** Rev. ind. agric. Tucumán v.86 n.1 Las Talitas ene./jun. 2009 pp 1-12.

NOGUEIRA Andressa Milene Parente & VENTURINI FILHO Waldemar Gastoni. 2007. **Clarificação de Caldo de Cana por Micro e Ultrafiltração: Comprovação de Viabilidade Técnica em Experimentos Preliminares.** Universidade Estadual Paulista (UNESP). -SP, Brasil.

OGDEN Joan, FULNER Mark. 1990. **Assessment for new technologies for co-production of alcohol, sugar and electricity from sugar cane.** Princeton University. New Jersey. USA.

OSUNKOYA O. A. & OKWUDINKA N. J. 2011. **Utilization of sugar refinery waste (molasses) for ethanol production using *Saccharomyces Cervicae*.** American Journal of Scientific and Industrial Research. doi:10.5251/ajsir.2011.2.4.694.706.

PELUFFO Silvio. 2012. **Manual azucarero 2012, herramienta de ingeniería para la industria azucarera.** Tucumán. Argentina.

PINTO Ana. 2004. **Fenoles. TRABAJO DE QUIMICA ORGANICA II.** Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Central del Ecuador.

PRATI Patricia, MORETTI Roberto Hermínio. 2008. **Study of clarification process of sugar cane juice for consumption. Desenvolvimento de processo de clarificação de caldo de cana para consumo.** São Pedro - SP, Brasil.

PRINSEN, Pepijn. 2010. **Composición Química de diversos materiales lignocelulósicos de interés industrial y análisis estructural de sus ligninas.** Universidad de Sevilla. España.

RAFIQ KHAN Mohamed. 2010. **Potential of Thermoelectric Power from Bagasse by Sugar Mills of Pakistan.** PEA-AIT International

Conference on Energy and Sustainable Development, Chiang Mai, Thailand.

RANUCCI LEMOS Lorena. 2012. **Influencia de diferentes teores de dextrana e amido em azucar cristal na formacao de flocs em solusoes acidas carbonatadas esoluciones alcoolicas.** UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA, Ponta Grossa, Brasil.

REECE Niconor Niconey. 2003. **Optimizing aconitate removal during clarification.** Louisiana State University. Louisiana State.USA.

RODRÍGUEZ GIMÉNEZ Efraim. 2005. **The dextranase along sugar-making industry.** Ciudad de La Habana, Cuba.

SAHA N. K., BALAKRISHNAN M. & ULBRICH M. 2006.**Polymeric membrane fouling in sugarcane juice ultrafiltration: role of juice polysaccharides.**TERI School of Advanced Studies; Darbari Seth Block India. Desalination 189 (2006) 59-70.

SASKA M., ZOSSI B. S.& LIU H. 2009. **Removal of colour in sugar cane juice clarification by defecation, sulfitation and carbonation.** Audubon Sugar Institute, USA.

SASKA Michael & CHOU. 2006. **Antioxidants: an excellent phytochemical functional food from sugarcane.** Audubon Sugar Institute, Louisiana State University Agricultural Center, St. Gabriel, Louisiana, USA.

SCHELLER Henrik Vibe & ULVSKOV Peter. 2010. **Hemicelluloses.** Pennsylvania Sate University. USA. Annu. Rev. Plant Biol. 2010. 61:263–89.

SERRANO GALVIS Laura. 2006. **Determinación de las poblaciones microbiológicas en el proceso de extracción de jugo de caña de azúcar en el INGENIO MANUELITA S.A.** PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA, BOGOTÁ, 2006.

SIMPSON R. 1996.**The chemistry of clarification.** Sugar Milling Research Institute, University of Natal, (1996) 70.

- SLUITER A., HAMES B., Ruiz R., SCARLATA C., SLUITER J. & TEMPLETON D. 2006. **Determination of Sugars, Byproducts, and Degradation Products in Liquid Fraction Process Samples.** National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado.USA.
- STEINDL, Roderick J. & DOHERTY W.O.S. 2005. **Syrup Clarification for Plantation White Sugar to meet New Quality Standards.** Sugar Research Institute Au.
- STEINDL R.J. 2010.**Clarification of cane juice for fermentation.** Sugar Research & Innovation, Queensland University of Technology, Australia. Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol., Vol. 27, 2010.
- SUBRAMANIYAN S. & PREMA P. 2002. **Biotechnology of Microbial Xylanases: Enzymology, Molecular Biology and Application.** Biochemical Processing Division. Regional Research Laboratory (CSIR), Trivandrum - 695 019, INDIA.
- THAI Caroline C.D. 2013.**Studies on the clarification of juice from whole sugar cane crop.** School of Chemistry, Physics and Mechanical Engineering Science and Engineering Faculty Queensland University of Technology. Australia.
- THAI, Caroline C.D., & DOHERTY, William O.S. 2012.**Characterisation of sugarcane juice particles that influence the clarification process.** Queensland University of Technology, Brisbane Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists.
- TOMIE KUNITAKE, Mariana. 2012. **Processamento e estabilidade de caldo de cana acidificado,** UNIVERSIDADE DE SAO PAULO, PIRASSUNUNGA. Brasil.
- VALDÉS DELGADO, Antonio. 2007. **Coproducts from the Sugarcane Agroindustry. Industrial Biotechnology and Biomass Utilisation – Prospects and Challenges for the Developing World.** SEI STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE. UNITES NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION (UNIDO).
- WALFORD S. N. 1996. **Composition of cane juice.** Sugar Milling Research Institute, University of Natal, Durban. Proc S Afr Sug Technol Ass (1996) 70.

- WALKER Graeme M. 2011. **125th Anniversary Review: Fuel Alcohol: Current Production and Future Challenges**. Yeast Research Group, School of Contemporary Sciences, University of Abertay Dundee, Scotland.
- WALTHER D C & JENSEN C R C. 2002. **Towards a new process to produce white sugar directly from cane juice**. Tongaat Hulett Sugar Ltd. Proc S Afr Sug Technol Ass (2002) 76 503-513.
- WALTHER D. C. & TURNER L. M. 1995. **Analysis of scale from some south African sugar mills**. Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association - June 1995 pg. 138 – 143.
- WYNARCZYK Hilario. 2002. *El trabajo de tesis. Orientaciones técnicas, especialmente para niveles de licenciatura y máster en ciencias de la administración y sociales*. Buenos Aires: Ciencia y Técnica Administrativa. E-book.  
<http://www.cyta.com.ar/biblioteca/bddoc/bdlibros/eltrabajodetesis/caratula.htm>
- WYNARCZYK Hilario. 2003. “**La estructura de la tesis. Un modelo estándar para grados de licenciatura y máster en ciencias de la administración y ciencias sociales**”. Buenos Aires: *E-Journal Ciencia y Técnica Administrativa*. En línea:  
[http://www.cyta.com.ar/biblioteca/bddoc/bdlibros/guia\\_tesis/guia\\_tesis\\_archivos/principal.htm](http://www.cyta.com.ar/biblioteca/bddoc/bdlibros/guia_tesis/guia_tesis_archivos/principal.htm)
- WYNARCZYK Hilario. 2014 (a). **Portafolio 1. Del proyecto a la tesis. La prosa académica. Materiales didácticos para la elaboración de un proyecto de tesis y una tesis. Informaciones útiles para la redacción de papers y trabajos finales**. Maestría en Gestión Ambiental, 3IA, UNSAM. Metodología de la Investigación y Taller de Tesis. Material de cátedra.
- WYNARCZYK Hilario. 2014 (b). *Kit de supervivencia, cuarta versión. Colección de materiales para la producción de un proyecto de Tesis de Magíster en Gestión Ambiental y TIF de Especialista en Gestión Ambiental*. Maestría en Gestión Ambiental, 3IA, UNSAM. Metodología de la Investigación y Taller de Tesis. Material de cátedra.
- WYNARCZYK Hilario. 2014 (c). *Breviario del artesano. Pautas para la presentación del TIF para el posgrado de Especialista en Gestión*

*Ambiental. Maestría en Gestión Ambiental, 3IA, UNSAM. Metodología de la Investigación y Taller de Tesis. Material de cátedra.*

WONG Y. C. & SANGGARI V. 2014. **Bioethanol Production from Sugarcane Bagasse using Fermentation Process.** Faculty of Agro Based Industry. University Malaysia Kelantan, *ORIENTAL JOURNAL OF CHEMISTRY*, 2014, Vol. 30, No. (2): Pg. 507-513.

YU Hong. 2003. **The mechanisms of composite fouling in Australian sugar mill evaporators by calcium oxalate and amorphous silica.** School of Chemical Engineering and Industrial Chemistry. The University of New South Wales.

ZABED Hossain, FARUQ Golam, SAHU Jaya Narayan, AZIRUN Mohad Sofian, HASHIM Rosli & BOYCE Amru Nasrulhaq. 2013. **Bioethanol Production from Fermentable Sugar Juice.** Institute of Biological Sciences, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia.

ZOSSI B. Silvia, CÁRDENAS Gerónimo J., SOROL Natalia & SASTRE Marcos .2012. **Influencia de compuestos azúcares y no azúcares en la calidad industrial de caña de azúcar en Tucumán (R. Argentina) Parte 1: caña limpia y despuntada.** ESTACIÓN EXPERIMENTAL AGROINDUSTRIAL OBISPO COLOMBRES, Las Talitas, Tucumán. *Rev. ind. agric. Tucumán* vol.87 no.1 Las Talitas jun. 2010.

ZOSSI B. Silvia, CÁRDENAS Gerónimo J., SOROL Natalia & SASTRE Marcos. 2012. **Análisis del proceso de sulfitación en la remoción de compuestos no azúcares en jugos de variedades de caña de Tucumán (R. Argentina).** ESTACIÓN EXPERIMENTAL AGROINDUSTRIAL OBISPO COLOMBRES. Las Talitas, Tucumán. *Rev. ind. agric. Tucumán* vol.89 no.2 Las Talitas jul./dic. 2012.

## ETAPA 1 Extracción del jugo

Esta etapa está muy condicionada por el tiempo que ha transcurrido desde el momento del corte de la caña hasta el ingreso al trapiche, que cuando supera las 12 horas comienza a modificarse la sacarosa del jugo de la caña, transformándola en dextrano, por acción de una bacteria llamada *Leuconostoc Mesenteroides* (Ranucci 2012; Cuervo 2010).

El dextrano, un polisacárido, que tiene un comportamiento diferente a la sacarosa, aumenta la viscosidad del jugo y dificulta por tanto el trabajo en las concentradoras, en las cristalizadoras, y en las centrífugas por cristalizar en forma diferente a la sacarosa, produciendo un cristal tipo aguja, que la malla de la centrífuga no puede retener aumentando con ello las pérdidas.

Imágenes de cristales de Sacarosa y Dextrano, donde se observa la diferencia de forma que adquieren se muestran en la Figura 1.

Al aumentar la viscosidad del jugo dificulta su trasiego y la operación de los equipos de evaporación para la concentración.

En el **ANEXO II** se desarrolla la fórmula del dextrano y se detallan las propiedades y características.

A fin de trabajar con el jugo limpio y homogéneo se requiere que a continuación de la Etapa 1 se proceda al filtrado del jugo, siendo conveniente desde el punto de vista del control del proceso que tanto el bombeo del jugo como el filtrado del mismo estén incorporados a ésta etapa, a los fines del balance de masa y de la contabilización de las pérdidas.

El bombeo del jugo es un punto de pérdidas, ya sea por los sellos o prensa estopas de la bomba y por la regulación del nivel del tanque de recepción del jugo que descarga del molino, que en general tiene un volumen pequeño en relación al caudal bombeado que condiciona el tiempo máximo de detención de la bomba de trasiego y si no se tiene un sistema automatizado de accionamiento con dos bombas, es probable que se produzcan rebases, por la inercia del funcionamiento del trapiche.

El sistema que tienen los ingenios en general es que el tanque que capta los jugos recién extraídos está ubicado bajo el trapiche en un pozo que permite recuperar los rebases, pero que en general es un sitio muy contaminado y con dificultad de acceso para una limpieza adecuada.

A continuación, en la **Figura1** se muestran cristales de sacarosa y de dextrano.



**Figura 1: CRISTALES DE SACAROSA Y DEXTRANO**

Se presentan las etapas de trabajo del ingenio, detallando las principales entradas y salidas de cada una de estas etapas, con el fin de presentar un lineamiento para obtener un balance de masa, que por la recuperación de las pérdidas de productos, el agua de imbibición, el agua de lavado de barros del filtrado de los sedimentos, dificultan el control de operación y de pérdidas.

De las etapas de acondicionamiento del jugo de caña, sin duda la de mayor relevancia es la clarificación, porque todo el proceso que sigue depende directamente de la pureza obtenida durante la preparación del jugo.

La tendencia es obtener azúcar “blanco directo” que consiste en lograr una calidad de azúcar que permite su utilización en producción de gaseosas sin necesidad de la etapa de refinación.

Con el jugo limpio los demás procesos posteriores a la clarificación alargan el periodo entre limpiezas, reducen la contaminación por lavado de equipos y aumentan consecuentemente el rendimiento al tener un jugo con menor cantidad de impurezas (no azúcares).

### Etapa 1: EXTRACCIÓN DEL JUGO DE CAÑA

ETAPA 1	Entradas	Salidas
Extracción del jugo	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Caña</li> <li>✓ Impurezas arrastradas</li> <li>✓ Agua de lavado</li> <li>✓ Tierra y Maloja</li> <li>✓ Elementos extraños</li> <li>✓ Aditivos bactericidas</li> <li>✓ Agua de imbibición</li> <li>✓ Aceite trapiches</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Jugo</li> <li>✓ Bagazo</li> <li>✓ Bagacillo</li> <li>✓ Algunas impurezas solubles (tierra/sales)</li> <li>✓ Aceite del trapiche</li> <li>✓ Restos de Aditivos de limpieza</li> </ul>
Bombeo del jugo	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Jugo de trapiches 1ra prensada + imbibición</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Jugo a filtrado + energía del bombeo</li> </ul>
Filtrado del jugo	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Jugo del bombeo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Jugo filtrado + energía del bombeo a sulfitado</li> <li>✓ Residuos sólidos, bagacillo, restos de maloja, etc.</li> </ul>

### Etapa 2: ADICIÓN DE SO<sub>2</sub>

ETAPA 2	Entradas	Salidas
Sulfitado del jugo	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Jugo de caña recién extraído y filtrado</li> <li>✓ SO<sub>2</sub></li> <li>✓ Aire de combustión</li> <li>✓ Vapor de combustión</li> <li>✓ Exceso de aire de combustión del S</li> <li>✓ Jugo de lavado del filtrado de cachaza</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Jugo de caña sulfitado (jugo + SO<sub>2</sub>)</li> <li>✓ Vapor de agua (evaporación del jugo)</li> <li>✓ Vapores de combustión</li> <li>✓ Exceso del aire de combustión</li> <li>✓ Gases residuales de la combustión</li> <li>✓ Bombeo del jugo para Etapa 3 + energía bomba</li> </ul>

El jugo recién filtrado entra al tanque de sulfitado, incorporando SO<sub>2</sub> que reacciona con las distintas sustancias que contiene formando nuevos productos.

### **Etapa 3: CALENTAMIENTO Y ADICIÓN DE LECHADA DE CAL O SACARATO DE CALCIO.**

El jugo sulfitado pasa a la siguiente etapa que puede ser de calentamiento y adición de la lechada o a la inversa, adición de lechada y luego el calentamiento, según determine la autoridad de producción del ingenio que se trate.

Independiente del orden de los procesos, lo que se lleva a cabo en ésta etapa es la adición de óxido de calcio hidratado en solución de agua o sacarato de calcio y además energía en forma de calor.

El calentamiento del jugo debe ser controlado con precisión por la importancia que tiene la temperatura en el siguiente proceso de sedimentación. Si se agrega la cal a baja temperatura y luego se aumenta esta, se reducen las posibles pérdidas por la inversión de la sacarosa. En cambio, si se adiciona la cal a alta temperatura, la reacción es un poco más rápida pero si por alguna circunstancia se mantiene bajo el pH, aumenta la inversión.

Seguramente cambia también la respuesta del equipo de intercambio de calor utilizado para el calentamiento del jugo, que por la presencia de la cal seguramente aumenta el ensuciamiento reduciendo el periodo entre limpiezas.

<b>ETAPA 3</b>	<b>Entradas</b>	<b>Salidas</b>
<b>Encalado y calentamiento del jugo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <b>Jugo del sulfitado</b></li> <li>✓ <b>Lechada de cal</b></li> <li>✓ <b>Energía térmica</b></li> <li>✓ <b>Energía de mezcla</b></li> <li>✓ <b>Aditivos floculantes</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <b>Jugo a clarificador</b></li> <li>✓ <b>Calor por pérdidas</b></li> <li>✓ <b>Bombeo a sedimentador + energía del bombeo</b></li> <li>✓ <b>Vapor por evaporación del jugo (por la temperatura)</b></li> <li>✓ <b>Se elimina la evaporación si el sistema se mantiene a presión</b></li> </ul>

#### Etapa 4: CLARIFICACIÓN

Este proceso se desarrolla en un tanque especialmente diseñado llamado sedimentador que permite la separación de los sólidos del líquido, que queda clarificado.

Tal como se describió previamente en relación al proceso de clarificación éste, el proceso de clarificación, requiere que se disponga del Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) mayor que el mínimo necesario para la formación del floculo y que este se desplace hasta el fondo del sedimentador y forme parte del barro a descargar. Durante el recorrido el floculo “filtra” al líquido del tanque y retiene las partículas coloidales que se “adhieren” por diferencias de potencial (potencial Z de cada partícula).

ETAPA 4	Entradas	Salidas
Clarificación-sedimentación	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ <b>Jugo de caña caliente y con los aditivos correspondientes</b></li><li>✓ <b>Energía de bombeo (y mezcla on-line)</b></li><li>✓ <b>Energía del barredor de fondo</b></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ <b>Jugo clarificado</b></li><li>✓ <b>Barros</b></li><li>✓ <b>Vapores, en sistemas presurizados no fugan vapores</b></li><li>✓ <b>Bombeo del jugo claro + energía de bombeo</b></li><li>✓ <b>Bombeo de barros + energía de bombeo</b></li><li>✓ <b>Pérdidas de calor al ambiente</b></li></ul>

Además el tanque de sedimentación, el sedimentador, debe cumplir las condiciones descritas previamente para cumplir lo más eficientemente posible con el proceso de separación de los SS.

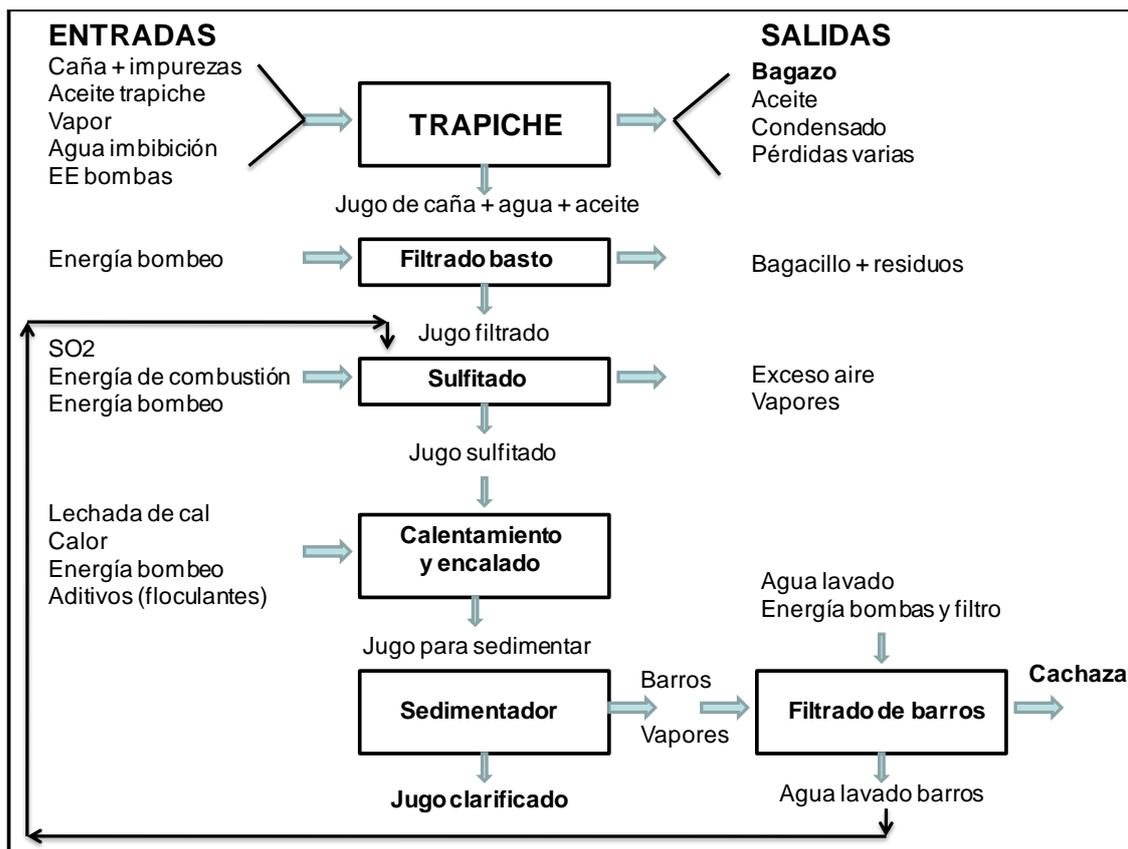
Queda la etapa de tratamiento de los barros.

#### Etapa 5: FILTRADO DE LOS BARROS

El filtrado que se lleva a cabo tiene por objeto reducir el contenido de sacarosa retenida en el barro, que es muy fluido, y por otra parte reducir el contenido de humedad del mismo para que su manipulación y transporte sea más eficiente y de menor costo (menos Kg. totales).

ETAPA 5	Entradas	Salidas
Filtrado de barros	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Barros líquidos</li> <li>✓ Agua de lavado</li> <li>✓ Energía de movimiento del filtro</li> <li>✓ Bagacillo (opción en algunos casos)</li> <li>✓ Energía consumida por la bomba de vacío</li> <li>✓ Agua anillo cierre bomba vacío</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Cachaza</li> <li>✓ Jugo de lavado</li> <li>✓ Bombeo jugo + energía bombeo</li> <li>✓ Rastra de cachaza en algunos casos.</li> <li>✓ Descarga agua anillo cierre vacío</li> </ul>

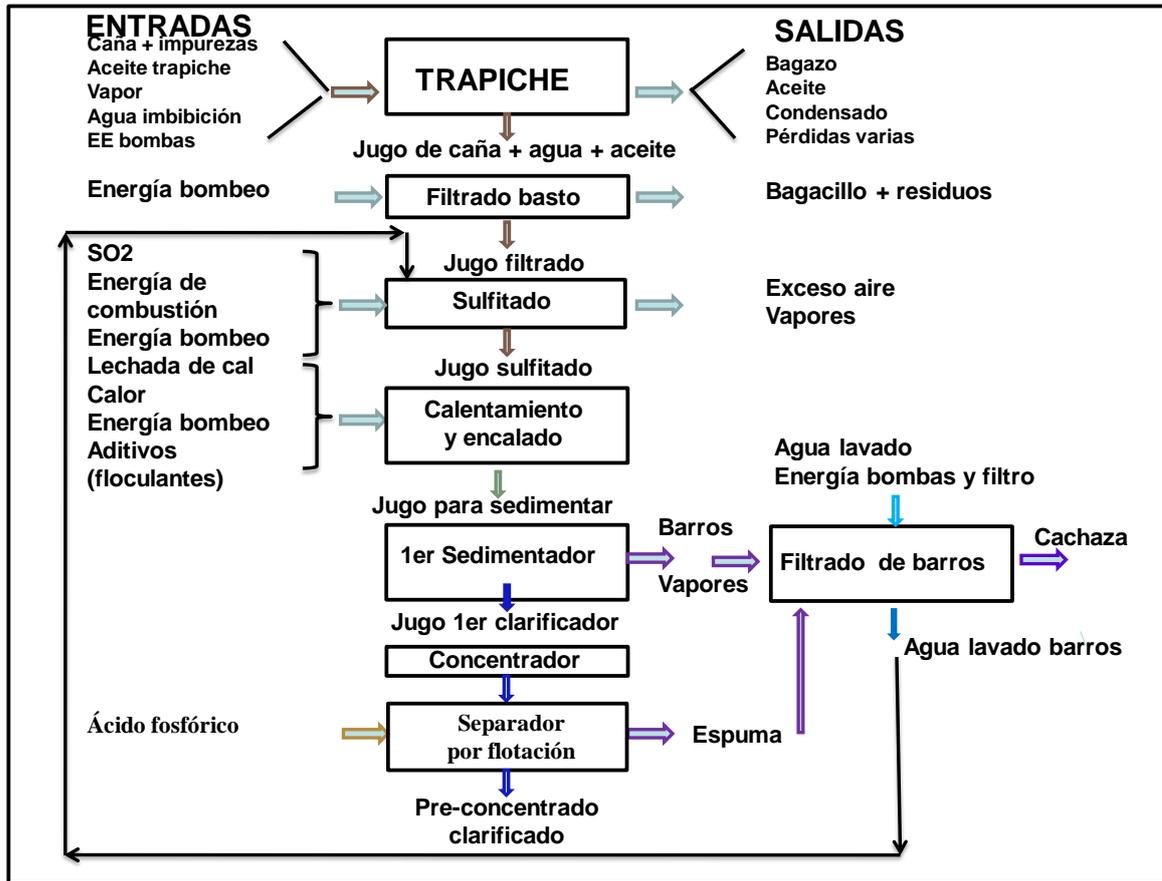
**Diagrama 1: CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE CAÑA CON UNA SOLA SEDIMENTACIÓN**



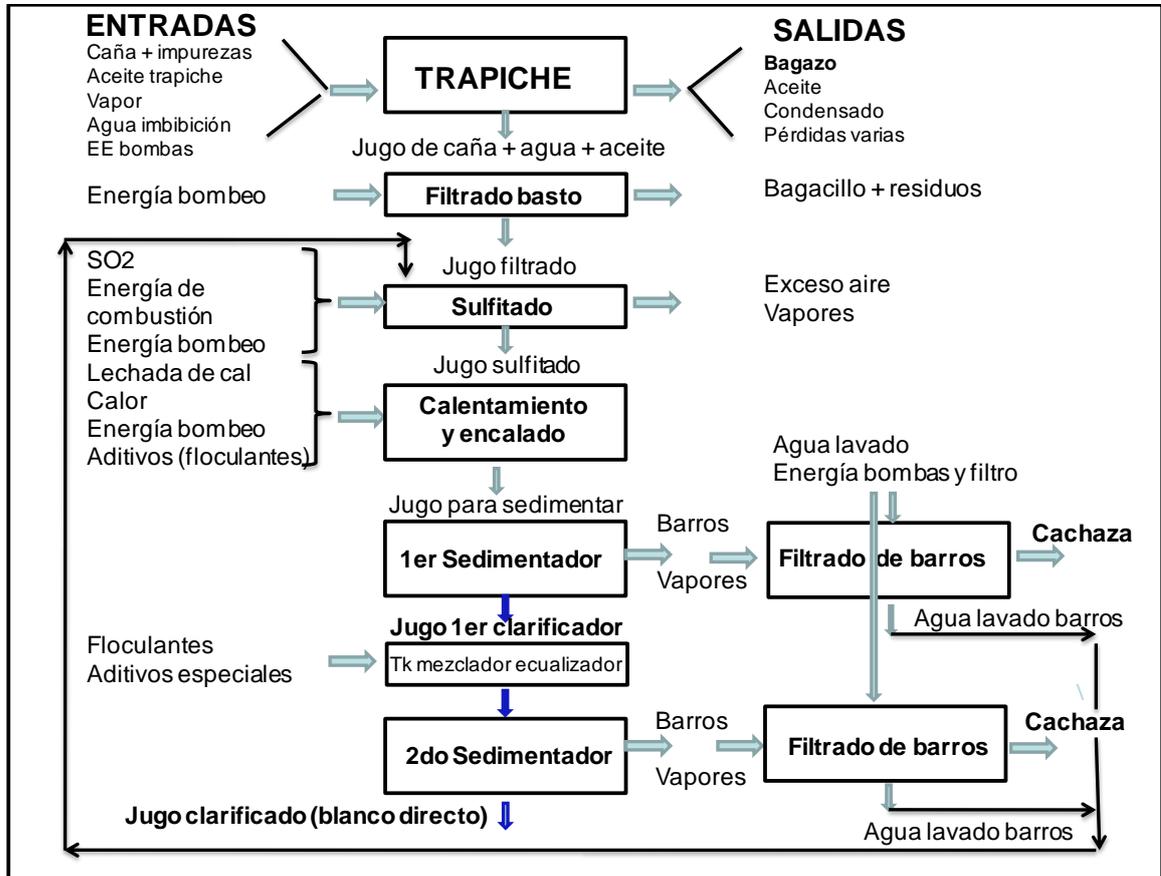
**Diagrama 2: ENTRADAS Y SALIDAS DEL PROCESO**

Entradas	Salidas	Pérdidas
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <b>Jugo sulfitado SO2</b></li> <li>✓ <b>Lechada de cal + floculante</b></li> <li>✓ <b>Agua de lavado de Barros</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <b>Jugo clarificado</b></li> <li>✓ <b>Cachaza</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <b>Jugo crudo</b></li> <li>✓ <b>rebases del trapiche</b></li> <li>✓ <b>Jugo sulfitado</b></li> <li>✓ <b>Arrastre en cachaza</b></li> </ul>

**Diagrama 3: CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE CAÑA CON DOS ETAPAS DE SEDIMENTACIÓN**



**Diagrama 4: CLARIFICACIÓN CON DOS ETAPAS MODIFICADO**



## ANEXO II

# COMPONENTES DEL TALLO DE CAÑA

Componentes del jugo de caña.....	131
Componentes de los insolubles del jugo de caña.....	132
Bagazo.....	132
Componente principal del jugo de caña.....	134
Inversión de la sacarosa.....	135
Otros compuestos presentes en el jugo de caña.....	135
Ácidos presentes y formados en el jugo.....	141
Antocianinas.....	149

## INDICE DE FIGURAS:

COMPONENTES DEL TALLO DE CAÑA .....	129
COMPONENTES DEL JUGO DE CAÑA .....	131
<i>Componentes de los insolubles del jugo de caña</i> .....	132
Bagazo:.....	132
Los componentes principales son Celulosa y Lignina. A fin de ilustrar la complejidad de estos compuestos se adjunta a continuación un detalle sobre Celulosas (Prinsen 2010). .....	132
Figura 1: EN HEMICELULOSAS LOS ENLACES B-(1—4) UNEN LOS ÁTOMOS C1, O Y C4 EN POSICIÓN ECUATORIAL, ENTRE LAS UNIDADES DE GLUCOSA, XILOSA Y MANOSA .....	133
<i>Componente principal del jugo de caña</i> .....	134
SACAROSA $C_{12}H_{22}O_{11}$ .....	134
FIGURA 2: ESTRUCTURA DE UNA MOLÉCULA DE SACAROSA (GALVÁN 1991).....	134
GLUCOSA $C_6H_{12}O_6$ .....	134
Figura 3: GLUCOSA.....	134
Figura 4: FRUCTOSA.....	134
<i>Inversión de la sacarosa</i> .....	135
<i>Otros compuestos presentes en el jugo de caña</i> .....	135
Figura 5: ISÓMEROS DEL ALMIDÓN .....	136
Figura 6: MOLÉCULAS DE DEXTRANO.....	137
Flavonoides.....	137
Figura 7: DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA DE LAS ANTOCIANINAS .....	138
PRESENTES EN LA CAÑA DE AZÚCAR .....	138
Figura 8: FLAVONA .....	139
Figura 9: FLAVONOIDE .....	139
Figura 10: FLAVONOIDES .....	140
<i>Ácidos presentes y formados en el jugo</i> .....	141
Figura 12: ÁCIDO TARTÁRICO .....	142
Figura 13: ISÓMEROS DEL ÁCIDO TARTÁRICO .....	143
Figura 14: ÁCIDO MÁLICO .....	144
Figura 15: ÁCIDO ACONÍTICO .....	145
Figura 16: ÁCIDO SUCCÍNICO .....	145
Figura 17: ÁCIDO GLICÓLICO .....	146
Figura 18: ÁCIDO LÁCTICO .....	147
Figura 19: ÁCIDO ACÉTICO .....	149
<i>Antocianinas</i> .....	149
Figura 20: MOLÉCULA DE ISOQUERCITINA, (EJEMPLO DE GLUCÓSIDO) .....	150

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Composición química del jugo de caña (valores promedio).....	131
Tabla N° 2: Composición de la fibra (en base seca).....	132
Tabla N° 3: Otros compuestos contenidos en el jugo de caña.....	135
Tabla N° 4: Isómeros del almidón.....	136
Tabla N° 5: Isómeros del dextrano.....	137
Tabla N° 6: Isómeros de flavonoides.....	140
Tabla N° 7: Ácidos presentes y formados (Marín Ocampo 2012).....	141
Tabla N° 8: Isómeros del ácido oxálico.....	141
Tabla N° 9: Isómeros del ácido cítrico.....	142
Tabla N° 10: Isómeros del ácido tartárico.....	143
Tabla N° 11: Isómeros del ácido málico.....	144
Tabla N° 12: Isómeros del ácido aconítico.....	145
Tabla N° 13: Isómeros del ácido succínico.....	146
Tabla N° 14: Isómeros del ácido glicólico.....	146
Tabla N° 15: Isómeros del ácido láctico.....	147
Tabla N° 16: Isómeros del ácido acético.....	148
Tabla N° 17: Antocianinas.....	149
Tabla N° 18: Isómeros de catequinas.....	150

## Componentes del jugo de caña

El esquema con segunda clarificación es apto para el agregado de elementos con alta Capacidad de Intercambio Cationico como por ejemplo Zeolitas, de tal manera transferir al sedimento los iones presentes en el jugo, que son los nutrientes para las plantas (Zossi 2012).

Con el objeto de mostrar la composición química del jugo de caña, se transcriben los datos de los principales compuestos que contiene.

**Tabla 1: COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL JUGO DE CAÑA (VALORES PROMEDIO) (Marín Ocampo 2012).**

Constituyente químico	Porcentaje
<b>En los tallos:</b>	
- Agua	73 - 76
- Sólidos	24 - 27
- Sólidos solubles ( °Brix)	10 - 16
- Fibra (seca)	11 - 16
<b>En el jugo:</b>	
<b>Azúcares</b>	
- Sacarosa	75 - 92
- Glucosa	70 - 88
- Fructosa	2 - 4
<b>Sales</b>	
- Inorgánicas	3 - 3,4
- Orgánicas	1,5 - 4,5
- Ácidos orgánicos	1 - 3
- Aminoácidos	1,5 - 5,5
<b>Otros no azúcares</b>	
- Proteínas	1,5 - 2,5
- Almidones	0,5 - 0,6
- Gomas	0,001 - 0,050
- Ceras, grasas y otros	0,3 - 0,6
- Compuestos fenólicos	0,15 - 0,50
	0,10 - 0,80

Si se seca el sedimento (cachaza) se pueden mantener las características químicas y almacenar para utilizarlo en etapas posteriores a la zafra y con la caña en crecimiento, con ventaja respecto de los fertilizantes sintéticos por la

disponibilidad gradual de los iones evitando en parte el lixiviado, con alguna semejanza a la aplicación de fertilizantes con el riego por goteo.

Además se reduce significativamente la huella de carbono<sup>1</sup> del fertilizante por su tipo de elaboración local, en el sitio de utilización reduciendo el transporte que requieren los otros fertilizantes sintéticos, elaborados en centros petroquímicos ubicados a gran distancia.

El principal elemento que contiene el jugo de caña es el agua, que se extrae al concentrar.

En los sub-productos, bagazo, melaza y cachaza queda retenido un % de humedad residual, que se busca minimizar.

Luego están los sólidos insolubles como fibra y en cantidad casi igual los sólidos solubles.

### *Componentes de los insolubles del jugo de caña*

**Tabla 2: COMPOSICIÓN DE LA FIBRA (EN BASE SECA)**

<b>Celulosa</b>	<b>39,01</b>	<b>Ácido urónico</b>	<b>2,16</b>
<b>Lignina</b>	<b>23,09</b>	<b>Arabinano</b>	<b>2,06</b>
<b>Xilano</b>	<b>22,05</b>	<b>Galactano</b>	<b>0,46</b>
<b>Extraíbles</b>	<b>3,78</b>	<b>Manano</b>	<b>0,35</b>
<b>Cenizas</b>	<b>3,66</b>		

#### **Bagazo:**

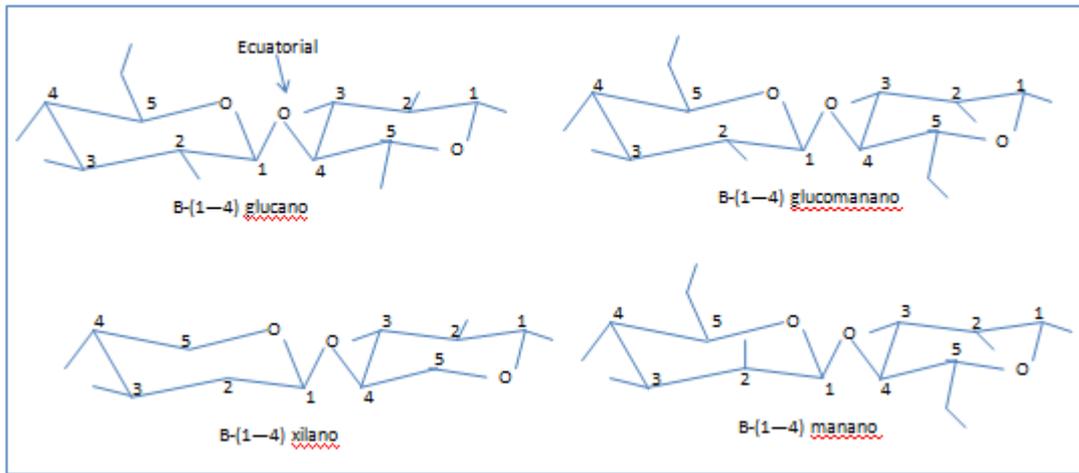
Los componentes principales son Celulosa y Lignina. A fin de ilustrar la complejidad de estos compuestos se adjunta a continuación un detalle sobre Celulosas (Prinsen 2010).

Las hemicelulosas no siempre se clasifican de la misma forma. Se pueden clasificar según la cadena principal de xilanos (Xyl), xiloglucanos (XyG), mananos y glucomananos (Scheller 2010). Son ramificados con **una** cadena principal de glucosa, xilosa y/o manosa con enlaces B-(1-4) entre sí,

<sup>1</sup> Los Kg. de CO<sub>2</sub> emitidos durante todo el ciclo de producción hasta que llega a su destino final.

todos en posición ecuatorial en el C<sub>1</sub> y C<sub>4</sub> (Figura 6). Otros autores lo clasifican en xilanos, glucuronoxilanos, arabinoxilanos, mananos, glucomananos y galactoglucomananos.

Las hemicelulosas de la pared celular de las gramíneas normalmente contienen una cadena principal de b-(1,4) xilopiranosil con a-L arabinofuranosa en las ramificaciones (Izydorczyk 1995; Sun *et al*,2002; Xiao *et al*, 2001). En algunos casos como en las plantas del orden de los *Poales* (principalmente cereales) se alternan enlaces B-(1—3) con B-(1—3). Las ramificaciones de hemicelulosa consisten en oligosacáridos, una cadena pequeña típicamente entre 1 y 4 unidades de D-galactosa, D-manosa, L-arabinosa, D-xilosa, L-fucosa, L-ramnosa y/o D-ácido glucurónico.



**Figura 1: EN HEMICELULOSAS LOS ENLACES B-(1—4) UNEN LOS ÁTOMOS C1, O Y C4 EN POSICIÓN ECUATORIAL, ENTRE LAS UNIDADES DE GLUCOSA, XILOSA Y MANOSA**

## Componente principal del jugo de caña

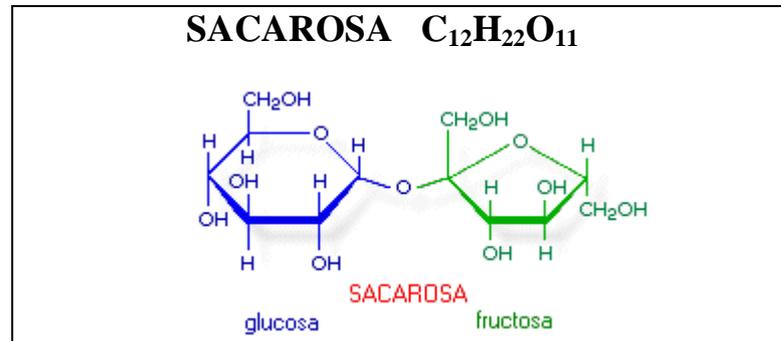


Figura 2: ESTRUCTURA DE UNA MOLÉCULA DE SACAROSA (Galván 1991)

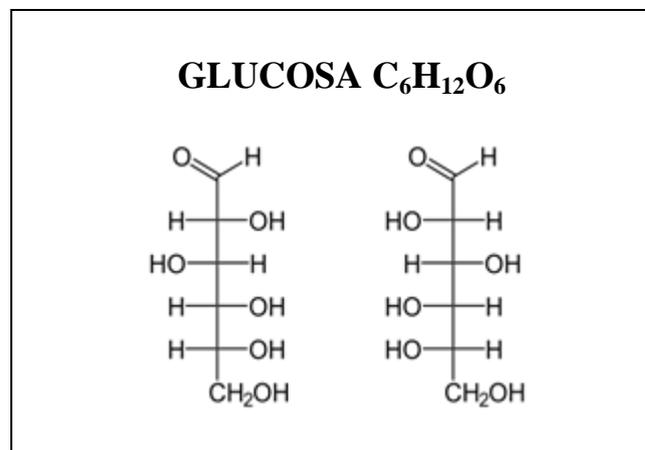


Figura 3: GLUCOSA.

## FRUCTOSA

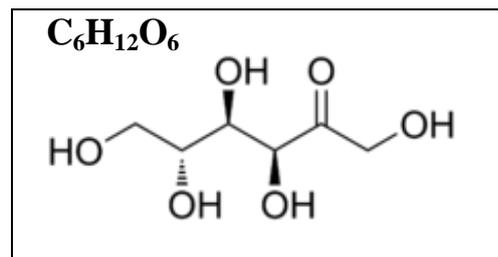
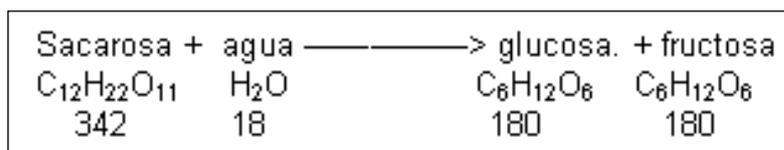


Figura 4: FRUCTOSA

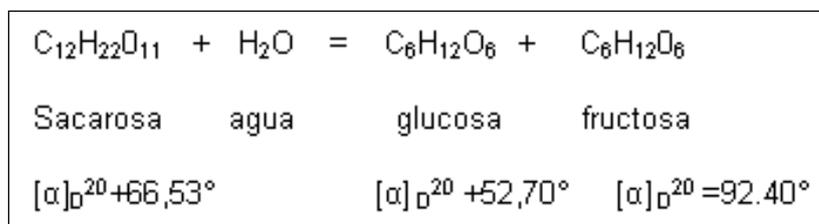
El cambio energético requerido para activar la reacción:



Proviene de las bacterias, hongos y levaduras en rápida proliferación (Gavelán 1992).

### ***Inversión de la sacarosa*** (Id. 1991).

La sacarosa se hidroliza con facilidad en soluciones ácidas a velocidades que aumentan notablemente según el aumento de la temperatura y la disminución del pH, con liberación de los monosacáridos constituyentes, según la reacción:



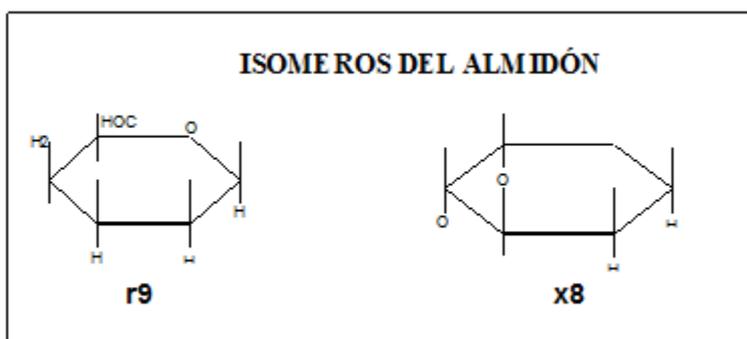
### ***Otros compuestos presentes en el jugo de caña***

**Tabla 3: ALGUNOS COMPUESTOS PRESENTES EN EL JUGO DE CAÑA SON LOS QUE SE DETALLAN A CONTINUACIÓN:**

<p>En este grupo están</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Almidón</li> <li>✓ Dextrano</li> <li>✓ Cestosa</li> <li>✓ Aldosas</li> <li>✓ Triosas: dihidroxiacetona</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Tetrosas: eritrulosa</li> <li>✓ Pentosas: ribulosa, xilulosa</li> <li>✓ Hexosas: fructosa, psicosa, sorbosa, tagatosa</li> <li>✓ Heptosas: sedoheptulosa</li> </ul>
---	--

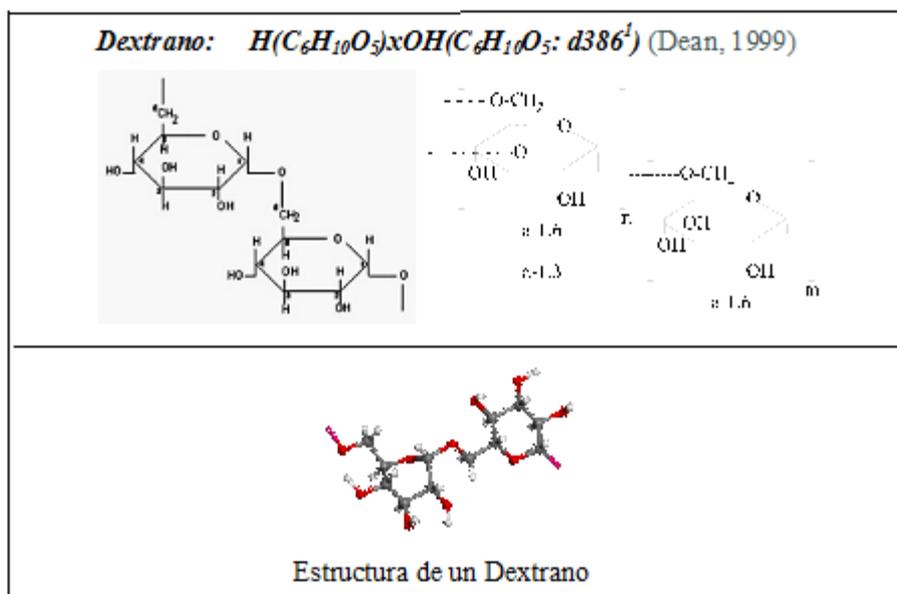
**Tabla 4: ISÓMEROS DEL ALMIDÓN**

<b>Polisacáridos: Almidón (C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>: a300, r9, x8) (Dean 1999)</b>			
<b>Número</b>	<b>a300</b>	<b>r9</b>	<b>x8</b>
<b>Nombre</b>	<b>L(+)</b> arabinose	<b>D-ribose</b>	<b>D-(´)-xylose</b>
<b>Fórmula</b>			
<b>Peso molecular</b>	<b>150,13</b>	<b>150,13</b>	<b>150,13</b>
<b>Referencia Beilstein</b>	<b>31; 32</b>	<b>1; 859</b>	<b>31; 47</b>
<b>Densidad gm/ml</b>			<b>1,535</b>
<b>Índice de refracción</b>			
<b>Punto de fusión °C</b>	<b>157-160</b>	<b>88-92</b>	<b>156-158</b>
<b>Punto de ebullición °C</b>			
<b>Flash point °C</b>			
<b>Solubilidad en 100 partes de solvente</b>	<b>100 agua 0,4 alcohol</b>	<b>s aq; sl s alc</b>	<b>117 aq; s hot</b>



**Figura 5: ISÓMEROS DEL ALMIDÓN**

*Nota:* Cuando los trozos de caña cortada quedan expuestos a la intemperie más tiempo que el recomendado comienzan a desarrollarse bacterias que degradan a la sacarosa transformándola en dextrano.



**Figura 6: MOLÉCULAS DE DEXTRANO**

**Tabla 5: ISOMEROS DEL DEXTRANO**

<b>ISÓMEROS DE DEXTRANO</b>		
<b>Número</b>	<b>d386a</b>	<b>d386b</b>
<b>Nombre</b>	<i>Diethyl oxidiformate</i>	<i>3,3-diethylpentane</i>
<b>Fórmula</b>	$\{C_2H_5OC(=O)\}_2O$	$C(C_2H_5)_4$
<b>Peso molecular</b>	<b>162,14</b>	<b>128,26</b>
<b>Referencia Beilstein</b>	<b>12; 8182</b>	
<b>Densidad gm/ml</b>	<b>1,12</b>	<b>0,7536</b>
<b>Índice de refracción</b>	<b>1,3980</b>	<b>1,4206</b>
<b>Punto de fusión °C</b>	<b>--</b>	<b>-33</b>
<b>Punto de ebullición °C</b>	<b>93</b>	<b>146</b>
<b>Flash point °C</b>	<b>69</b>	<b>--</b>
<b>Solubilidad en 100 partes de solvente</b>	<b>50 alc; s esters; ketones; s aq 0,4 alcohol</b>	<b>--</b>

### **Flavonoides**

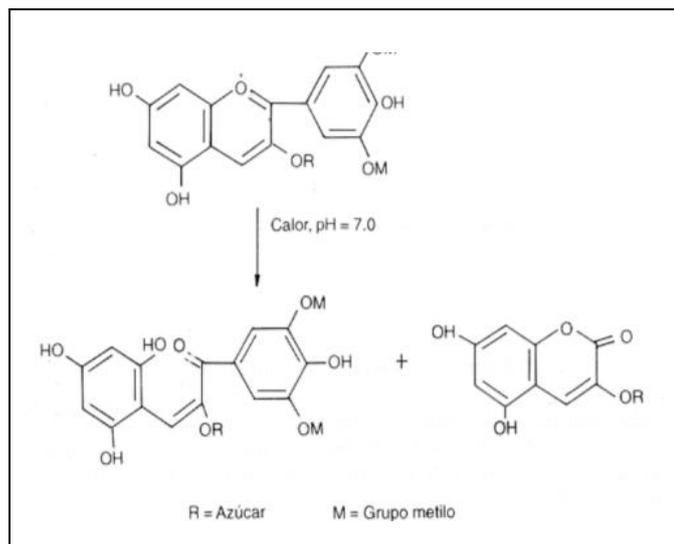
- antocianinas (pigmentos catiónicos oscurecen a medida que pH baja).
- catequinas.
- chalconas.

-flavonoles.

-flavonas.

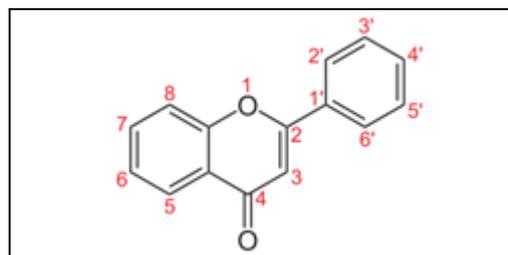
Las flavonas derivadas del tricino, luteolino y apigenino son colorantes no ionizados a pH bajo estables en medio alcalino, que persisten durante la clarificación y suponen un 30% del color del azúcar crudo.

Los flavonoides tienen una alta solubilidad en agua y se extraen de los tallos en la etapa de trituración. El grupo de antocianinas está constituido por pigmentos catiónicos cuyo color se torna oscuro cuando el pH disminuye, pero se descompone fácilmente a pH 7.0, originando un glicósido de coumarina incoloro, Figura 12



**Figura 7: DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA DE LAS ANTOCIANINAS PRESENTES EN LA CAÑA DE AZÚCAR**

Las flavonas derivadas del tricino, el luteolino y el apigenino, constituyen otra clase de flavonoides de importancia en la caña de azúcar. Estos compuestos son colorantes de carácter ligeramente ácido y existen en forma no ionizada a pH bajo. En general, la contribución de los flavonoides al color del jugo se incrementa rápidamente entre pH 7.0 y 9.0.



### Figura 8: FLAVONA

Flavonoide (del latín *flavus*, "amarillo") es el término genérico con que se identifica a una serie de metabolitos secundarios de las plantas. Son sintetizados a partir de una molécula de fenilalanina y 3 de malonil-CoA, a través de lo que se conoce como "vía biosintética de los flavonoides", cuyo producto, la estructura base, se cicla gracias a una enzima isomerasa.

La estructura base, un esqueleto C6-C3-C6, puede sufrir posteriormente muchas modificaciones y adiciones de grupos funcionales, por lo que los flavonoides son una familia muy diversa de compuestos, aunque todos los productos finales se caracterizan por ser polifenólicos y solubles en agua.

Los flavonoides que conservan su esqueleto pueden clasificarse, según las isomerizaciones y los grupos funcionales que les son adicionados, en 6 clases principales: las chalconas, las flavonas, los flavonoles, los flavandioles, las antocianinas, y los taninos condensados.<sup>2</sup> más una séptima clase, las auronas tenidas en cuenta por algunos autores por estar presentes en una cantidad considerable de plantas.

También el esqueleto puede sufrir modificaciones, convirtiéndose entonces en el esqueleto de los isoflavonoides o el de los neoflavonoides, que por lo tanto también son derivados de los flavonoides.

**C<sub>15</sub>H<sub>10</sub>O<sub>2</sub>: b105, m136, p122**

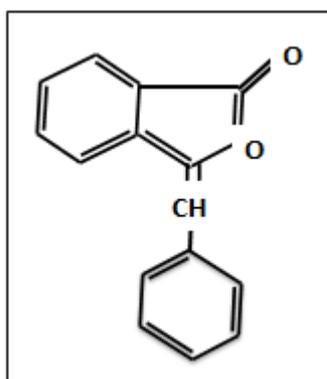


Figura 9: FLAVONOIDE

Tabla 6: ISOMEROS DEL FLAVONOIDE

ISOMEROS DE FLAVONOIDE			
Número	b105	m136	thyp122
Nombre	<i>3-Benzylidene_phtalide</i>	<i>2-Mrthyl-antraquinone</i>	<i>2-Phenyl-1,13-indandione</i>
Fórmula			
Peso molecular	124,21	222,24	222,28
Referencia Beilstein	17; 376	7; 809	7; 808
Densidad gm/ml			1,535
Índice de refracción			
Punto de fusión °C	99-102	170-173	148-150
Punto de ebullición °C			
Flash point °C			

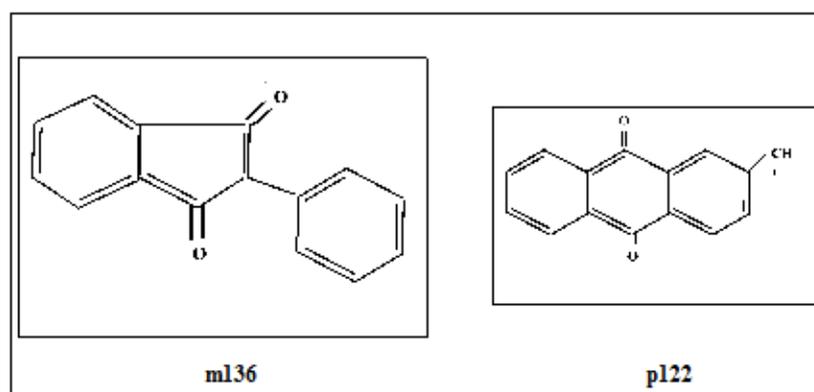


Figura 10: FLAVONOIDES

### Flavonoides

- catequinas
- chalconas
- flavonoles
- flavonas
- flavonas, derivadas del tricino, luteolino y apigenino

## *Ácidos presentes y formados en el jugo*

**Tabla 7: ÁCIDOS PRESENTES Y FORMADOS (Marín Ocampo 2012)**

<b>ÁCIDO</b>		<b>CONCENTRACIÓN (ppm/%Brix)</b>
<b>Naturales</b>	<b>Oxálico</b>	<b>40-200</b>
	<b>Cítrico</b>	<b>900-1800</b>
	<b>Tartárico</b>	<b>10-180</b>
	<b>Málico</b>	<b>1200-1800</b>
	<b>Aconítico</b>	<b>5000-8000</b>
	<b>Succínico</b>	<b>100-200</b>
	<b>Glicólico</b>	<b>Trazas-150</b>
<b>Formados durante el proceso</b>	<b>Láctico</b>	<b>250-670</b>
	<b>Acético</b>	<b>200-300</b>

*Ácido oxálico*  $C_2H_2O_4$ : o52, o53

<b>Tabla 8: ISÓMEROS DEL ÁCIDO OXÁLICO</b>		
<b>Número</b>	<b>o52</b>	<b>o53</b>
<b>Nombre</b>	<i>Oxalic acid</i>	<i>Oxalic acid dhydrate</i>
<b>Fórmula</b>	$HO_2CCO_2H$	$HO_2CCO_2H \cdot 2H_2O$
<b>Peso molecular</b>	<b>90,04</b>	<b>126,07</b>
<b>Referencia Beilstein</b>	<b>2; 502</b>	<b>2; 502</b>
<b>Densidad gm/ml</b>	<b>1,90</b>	<b>1,653</b>
<b>Índice de refracción</b>		
<b>Punto de fusión °C</b>	<b>190 dec</b>	<b>2H<sub>2</sub>O,102</b>
<b>Punto de ebullición °C</b>		
<b>Flash point °C</b>		
<b>Solubilidad en 100 partes de solvente</b>	<b>14 aq; 40 alc; 1,3 eth</b>	<b>14 aq; 40 alc; 1 eth</b>

Ácido cítrico  $C_6H_8O_7$ : c289

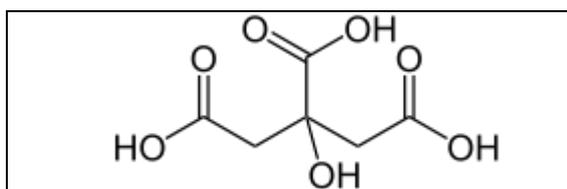


FIGURA 11: ÁCIDO CÍTRICO

Tabla 9: ISÓMEROS DEL ÁCIDO CÍTRICO	
Número	c289
Nombre	Ácido Cítrico
Fórmula	$HOOCCH_2C(OH)(COOH)CH_2COOH$
Peso molecular	192,12
Referencia Beilstein	3; 556
Densidad gm/ml	1,665
Índice de refracción	--
Punto de fusión °C	154
Punto de ebullición °C	--
Flash point °C	--
Solubilidad en 100 partes de solvente	59 aq

Ácido tartárico:  $C_4H_6O_6$ : t1, t2, t3, t4

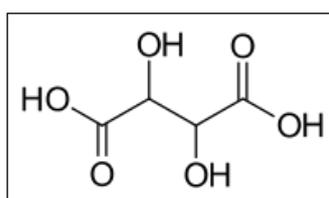


Figura 12: ÁCIDO TARTÁRICO

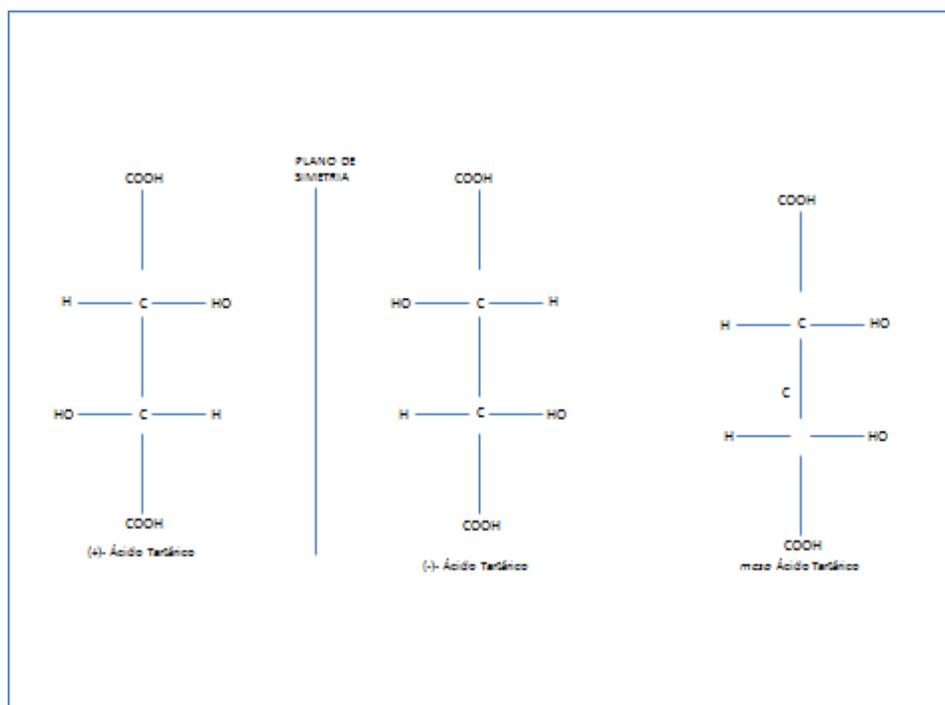


Figura 13: ISÓMEROS DEL ÁCIDO TARTÁRICO

Tabla 10: ISOMEROS DEL ÁCIDO TARTÁRICO				
Número	t1	t2	t3	t4
Nombre	<b>D-(-)- Ácido tartárico</b>	<b>L-(+)- Ácido tratárico</b>	<b>Meso-Ácido tartárico monohydrate</b>	<b>DL-Ácido tartárico monohydrate</b>
Fórmula				
Peso molecular	<b>150,9</b>	<b>150,9</b>	<b>168,11</b>	<b>168,11</b>
Referencia Beilstein	<b>3; 250</b>	<b>3; 481</b>	<b>3;528</b>	<b>3; 522</b>
Densidad gm/ml	<b>1,7598</b>	<b>1,7598</b>	<b>1,666</b>	
Índice de refracción				
Punto de fusión °C	<b>172-174</b>	<b>168-170</b>	<b>140</b>	<b>210-212</b>
Punto de ebullición °C			<b>159-160</b>	
Flash point °C				
Solubilidad en 100 partes de solvente	<b>139 aq;59 MeOHH; 33ReOH; s glic 0,4 eth</b>	<b>Ídem</b>	<b>125 aq</b>	<b>20,6 aq; 5 alc; 1 eth</b>

Su fórmula es: HOOC-CHOH-CHOH-COOH, con fórmula molecular  $C_4H_6O_6$ . Su peso molecular es 150 g/mol.

Contiene, por tanto, dos grupos carboxílicos y dos grupos alcohol en una cadena de hidrocarburo lineal de longitud cuatro.

**Ácido málico:  $C_4H_6O_5$ : d690, h186, h187, o67**

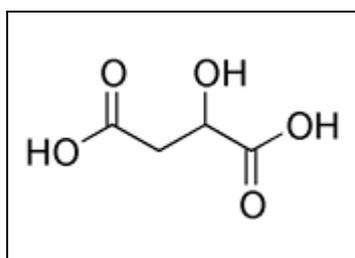


Figura 14: ÁCIDO MÁLICO

Tabla 11: ISOMEROS DEL ÁCIDO MÁLICO				
Número	d690	h186	h187	o67
Nombre	<i>Dimethyl pyro carbonate</i>	<i>DL-Hydroxysuccinic acid</i>	<i>(-)-Hydroxysuccinic acid</i>	<i>2,2'-Oxydiacetic acid</i>
Fórmula	$O(CO_2C H_3)_2$	$HO_2CCH(OH)CH_2CO_2H$	$HO_2CCH(OH)CH_2CO_2H$	$HO_2CCH_2OCH_2CO_2H$
Peso molecular	134,09	134,09	134,09	134,09
Referencia Beilstein	3; 17	3; 435	3;419	3; 234
Densidad gm/ml	1,250			
Índice de refracción	1,399			
Punto de fusión °C			100	142-145
Punto de ebullición °C	46	131-133		
Flash point °C	80			
Solubilidad en 100 partes de solvente				V s aq, alc, sl, s eth

Ácido aconítico:  $C_4H_4O_4 = C(CO_2H)CH_2CO_2H$ : f42, m1

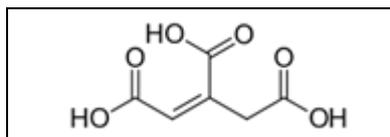


Figura 15: ÁCIDO ACONÍTICO

Tabla 12: ISÓMEROS DEL ÁCIDO ACONÍTICO		
Número	f42	m1
Nombre	<i>Fumaric acid</i>	<i>Maleic acid</i>
Fórmula	$HO_2CCH=CHCO_2H$	$HO_2CH=CHCO_2H$
Peso molecular	116,7	116,7
Referencia Beilstein	2; 737	2; 748
Densidad gm/ml	1,635	1,590
Índice de refracción		
Punto de fusión °C	287	130,5
Punto de ebullición °C	Subl 300	
Flash point °C		
Solubilidad en 100 partes de solvente	0,6 aq, 6,7 alc 0,7 eth	70 alc, s acet, HOAc, sl s eth

Ácido succínico:  $HOOC-CH_2-CH_2-COOH$  ( $C_4H_6O_4$ ): d652, s15

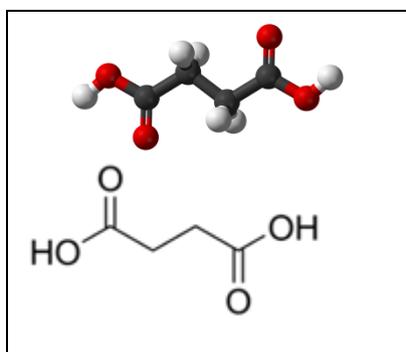


Figura 16: ÁCIDO SUCCÍNICO

Tabla 13: ISÓMEROS DEL ÁCIDO SUCCÍNICO		
Número	d652	s15
Nombre	<i>Dimethyl oxalate</i>	<i>Succinic acid</i>
Fórmula	$\text{CH}_3\text{O}_2\text{CCO}_2\text{CH}_3$	$\text{HO}_2\text{CCH}_2\text{CH}_2\text{CO}_2\text{H}$
Peso molecular	118,09	118,09
Referencia Beilstein	2; 534	2; 601
Densidad gm/ml	1,148	1,552
Índice de refracción	1,379	
Punto de fusión °C	50-54	188
Punto de ebullición °C	163,5	235 dec
Flash point °C	75	
Solubilidad en 100 partes de solvente	6 aq, s alc, eth	7.7 aq, 5,4 alc, 2,8 acet, 0,88 eth i bz

Ácido glicólico:  $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_3$ : h88, p60

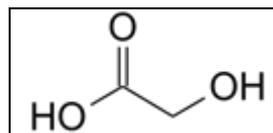


Figura 17: ÁCIDO GLICÓLICO

Tabla 14: ISÓMEROS DEL ÁCIDO GLICÓLICO		
Número	h88	p60
Nombre	<i>Hydroxyacetic acid</i>	<i>Peroxyacetic acid</i>
Fórmula	$\text{HOCH}_2\text{CO}_2\text{H}$	$\text{CH}_2\text{C}(=\text{O})\text{CO}_2\text{H}$
Peso molecular	76,05	76,05
Referencia Beilstein	3; 228	2; 169
Densidad gm/ml		1,266
Índice de refracción		1,3876
Punto de fusión °C	172	-02
Punto de ebullición °C	286	110
Flash point °C		41
Solubilidad en 100 partes de solvente	S aq, alc, acet, eth	V s aq, alc, eth

Ácido láctico:  $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}(\text{OH})-\text{COOH}$  ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ ) : d445, d580, L1, L2, m43, m265, t407

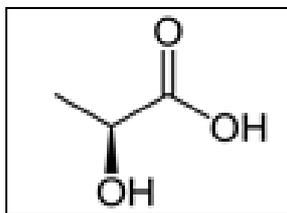


Figura 18: ÁCIDO LÁCTICO

Tabla 15: ISOMEROS DEL ÁCIDO LÁCTICO				
Número	d445	d580	L1	L2
Nombre	<i>1,3-Dihydroxy-2-propanone</i>	<i>Dimethyl carbonate</i>	<i>DL-Lactic acid</i>	<i>L-(+)-Lactic acid</i>
Fórmula	$\text{HOCH}_2$ $\text{C}(=\text{O})\text{CH}_2\text{OH}$	$(\text{CH}_3\text{O})_2\text{C}=\text{O}$	$\text{CH}_3\text{CH}$ $(\text{OH})\text{CO}_2\text{H}$	$\text{CH}_3\text{CH}$ $(\text{OH})\text{CO}_2\text{H}$
Peso molecular	90,08	90,08	90,08	90,08
Referencia Beilstein	1;846	3; 4	3; 286	3; 261
Densidad gm/ml	--	1,065	1,249	1,206
Índice de refracción	--	1,3682	--	1,4270
Punto de fusión °C	65-71	0,5	16,8	53
Punto de ebullición °C	--	90-91	122	119
Flash point °C	--	18	>110	>110
Solubilidad en 100 partes de solvente	v s aq, alc, acet, eth	I aq, misc alc eth	s aq, alc, i chl, PE	vs aq, alc, eth

Tabla 15: ISOMEROS DEL ÁCIDO LÁCTICO (continuación)			
Número	m43	m265	t407
Nombre	<i>Methoxyacetic acid</i>	<i>Methylglycolate</i>	<i>1,3,5-Trioxane/</i>
Fórmula	CH <sub>3</sub> OCH <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> H	HOCH <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	--
Peso molecular	90,08	90,08	90,08
Referencia Beilstein	3; 232	3; 326	19; 381
Densidad gm/ml	1,174	1,168	1,170
Índice de refracción	1,4115	1,417	--
Punto de fusión °C	--	74	60,2
Punto de ebullición °C	202-204	151	115
Flash point °C	>110	67	45
Solubilidad en 100 partes de solvente	Misc aq, alc, eth	--	17,2 aq, vs ak, bz, eth EtOAc

Ácido acético: HCH<sub>2</sub>COOH: CH<sub>3</sub>-COOH (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>); a19, h87, m257

Tabla 16: ISOMEROS DEL ÁCIDO ACÉTICO			
Número	a19	h87	m257
Nombre	<i>Acetic acid</i>	<i>Hydroxyacetaldehyde</i>	<i>Methylformate</i>
Fórmula	CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> H	HOCH <sub>2</sub> CHO	HOCH <sub>2</sub> CHO
Peso molecular	60,05	60,05	60,05
Referencia Beilstein	2; 96	1; 817	2; 18
Densidad gm/ml	1,0492	1,366	0,9815
Índice de refracción	1,3718		1,3465
Punto de fusión °C		93-94	-99
Punto de ebullición °C	118	110	31,7
Flash point °C	39		-19
Solubilidad en 100 partes de solvente	Misc aq, alc, eth, CC14	V s aq, sl s eth	30 aq, misc alc

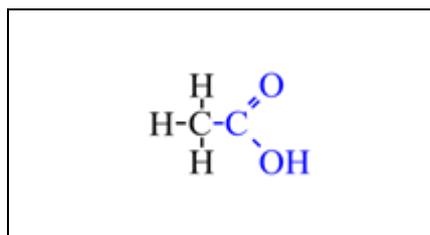


Figura 19: ÁCIDO ACÉTICO

### *Antocianinas*

Desde el punto de vista químico, las antocianinas pertenecen al grupo de los flavonoides y son glucósidos de las antocianidinas, es decir, están constituidas por una molécula de antocianidina, que es la aglicona, a la que se le une un azúcar por medio de un enlace aglicona.

Tabla 17: ANTOCIANINAS

Antocianidina	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
Aurantidinina	-H	-OH	-H	-OH	-OH	-OH	-OH
Capensinidina	-OCH3	-OH	-OCH3	-OH	-OCH3	-H	-OH
Cianidina	-OH	-OH	-H	-OH	-OH	-H	-OH
Delfinidina	-OH	-OH	-OH	-OH	-OH	-H	-OH
Europinidina	-OCH3	-OH	-OH	-OH	-OCH3	-H	-OH
Luteolinidina	-OH	-OH	-H	-H	-OH	-H	-OH
Pelargonidina	-H	-OH	-H	-OH	-OH	-H	-OH
Malvidina	-OCH3	-OH	-OCH3	-OH	-OH	-H	-OH
Peonidina	-OCH3	-OH	-H	-OH	-OH	-H	-OH
Petunidina	-OH	-OH	-OCH3	-OH	-OH	-H	-OH
Rosinidina	-OCH3	-OH	-H	-OH	-OH	-H	-OH

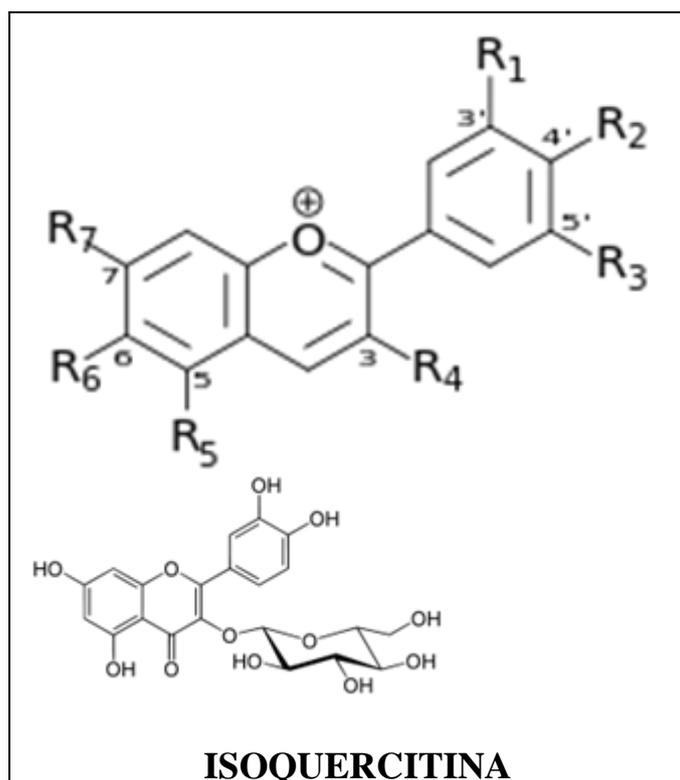


Figura 20: MOLÉCULA DE ISOQUERCITINA, (EJEMPLO DE GLUCÓSIDO)

Tabla 18: ISOMEROS DE CATEQUINAS			
Número	b105	m136	p122
Nombre	<i>3-Benzylidene-phthalide</i>	<i>2-Methyl-antraquinone</i>	<i>2-Phenyl-1,3-indandione</i>
Fórmula			
Peso molecular	124,21	222,24	222,24
Referencia Beilstein	17; 376	7; 809	7; 808
Densidad gm/ml			
Índice de refracción			
Punto de fusión °C	99-102	170-173	148-150
Punto de ebullición °C			
Flash point °C			
Solubilidad en 100 partes de solvente		V s bz, s alc, eth	

Catequinas: C<sub>15</sub>H<sub>10</sub>O<sub>2</sub>: b105, m136, p122

Toda la información presentada es para mostrar la cantidad de compuestos que puede contener el jugo de caña, que entre el compuesto y los isómeros forman un grupo que suman más de 64 y cuya composición varía dependiendo de los factores que se detallan a continuación.

El conjunto de compuestos es variable tanto en composición como en cantidad de cada uno dependiendo de la variedad de la caña, grado de madurez, suelo del que proviene, edad de la plantación y factores climáticos entre otros (estos son los principales factores que intervienen en la modificación del contenido de compuestos del jugo de caña).

También se debe tomar en consideración los cambios que ocurren en la composición del jugo de caña por efectos de temperatura, bajo o alto pH e interacción entre algunos de los compuestos que contiene, p. ej. acidificación y aumento del régimen de inversión de la sacarosa, oscurecimiento por oxidación de algunos flavonoides, etc.

Además se suma a estas interacciones el desarrollo de bacterias que aceleran la degradación de la sacarosa, que es el producto de valor buscado y siempre tratando de maximizar la cantidad obtenida.

La forma de lograr un resultado que obtenga el máximo posible de productos de valor es el de poder predecir medianamente la composición del jugo, por lo menos en los elementos de mayor interacción y en mayor cantidad, que es todo un desafío a la ingeniería de procesos y a la química para la detección on-line de los componentes por medio de análisis continuos con respuesta inmediata e incorporación de los valores a un sistema de control computarizado que pueda asumir la toma de decisión en tiempo real.

Por ello una propuesta para la obtención de una “vinaza” con menor nivel de contaminantes es la que se plantea en el punto de “Control de la etapa de clarificación” con aplicación de los principios de Producción más Limpia.

Principios de Producción más Limpia son, según PNUMA (1992)

Precaución

Prevención

Integración

Utilización de procesos que combinan la conservación de materias primas y recursos como agua y energía

Sistemas eficientes energéticamente

Uso de materiales renovables

## Productos reutilizables y/o reciclables

En cuanto a los procesos, la Producción más Limpia incluye la conservación de las materias primas, el agua y la energía, la reducción de las materias primas tóxicas (toxicidad y cantidad), emisiones y de residuos, que van al agua, a la atmósfera y al entorno.

La Producción más Limpia requiere modificar actitudes, desarrollar una gestión ambiental responsable, crear las políticas nacionales convenientes y evaluar las opciones tecnológicas.

Las técnicas de Producción más Limpia son:

- Mejoras en el proceso
- Buenas Prácticas Operativas
- Mantenimiento de equipos
- Reutilización y reciclaje
- Cambios en la materia prima por una menos contaminante, cuando ello es posible.
- Cambios de tecnología, empleando las tecnologías que generan la menor cantidad de no productos y tienen la mayor eficiencia en el aprovechamiento energético.

Beneficios:

Con la Producción más Limpia, las empresas lograrán:

- Posicionarse competitivamente en el mercado nacional e internacional de cara a los tratados de libre comercio.
- Responder a las tendencias internacionales que emergen en cuanto a normas y estándares ambientales.
- Influir en el desempeño ambiental de las empresas nacionales.
- Contribuir al cumplimiento de la legislación ambiental vigente.
- Generar el consumo y la demanda de productos elaborados con enfoque de Producción más Limpia.

<http://www.pml.org.ni/index.php/produccion-limpia>