

Estrategias para minimizar las pérdidas de sacarosa asociadas a la calidad de la caña

Tatiana Daza Merchán, Sara Pereddo, Juan Gabriel Rodríguez, Jose David Tascón, Tatiana Sánchez, Nicolás Gil

Centro de Investigación de la Caña de Azúcar



Caña de azúcar en Colombia



40% Cosecha manual

Producción 2017

Área sembrada: 243,232 ha

Caña molida: 23,946,738 t

Azúcar producido: 2,579,652 t

Etanol: 364,800 m³

Energía eléctrica generada: 1,487,160 MWh



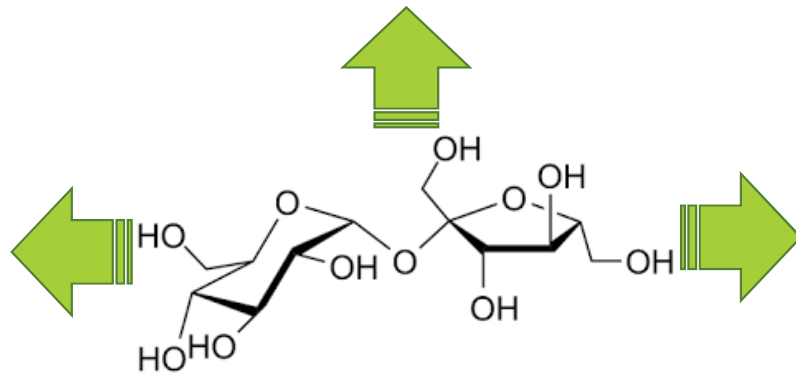
60% Cosecha mecanizada



Campo



Cosecha



"Estabilidad de la Sacarosa"



Fábrica

Proceso Agroindustrial de Producción de Azúcar

Calidad de caña

Directa

Indirecta

Sólidos solubles

Sacarosa

Fibra

MEM

MEV

No azúcares

Color



Fuentes de pérdida de la sacarosa

Antes de la cosecha

- Estado fitosanitario
- Edad
- Época de corte
- Prácticas de cultivo
- Variedad

Después de corte y/o cosecha

- Tipo de corte (Quema)
- Materia extraña
- Tiempo de permanencia
- Clima

Fábrica

Calidad de Materia Prima

Bagazo
Cachaza
Miel

P. Determinadas
P. Indeterminadas

Aparentes
Físicas
Inversión

Descomposición

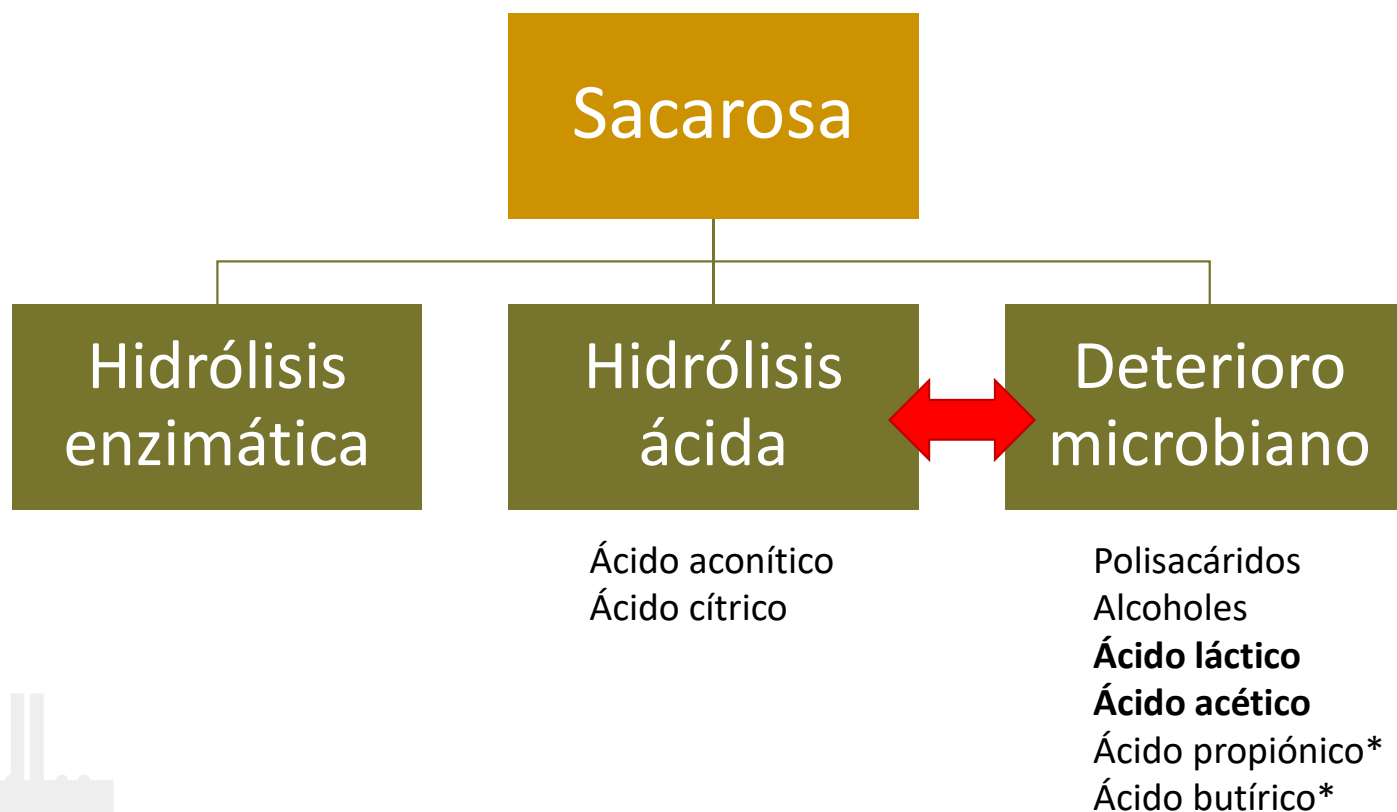
Recuperación de sacarosa

Calidad de azúcar

Eficiencia de fermentación

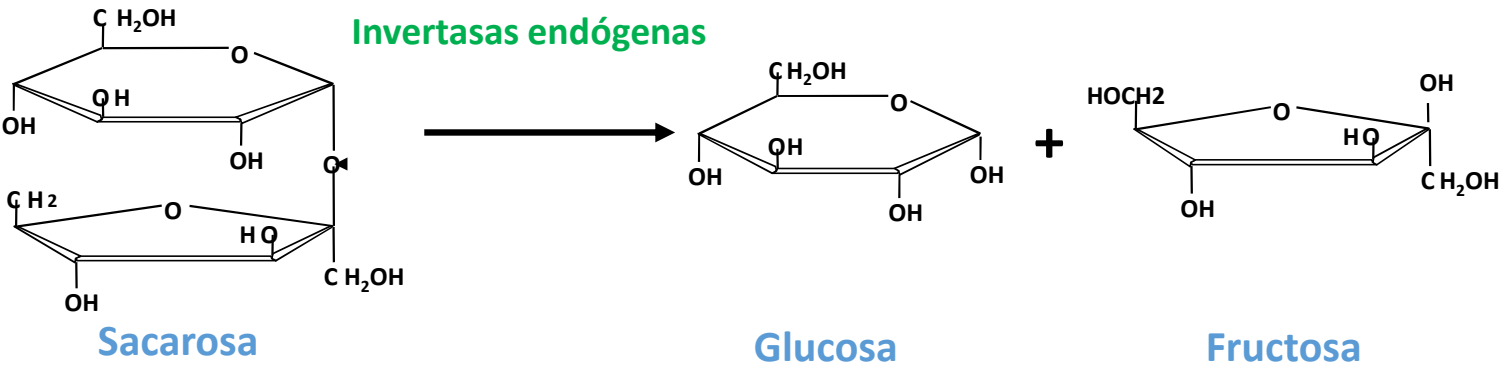


Factores naturales que influyen en las pérdidas de sacarosa entre corte y molienda



*Raramente se detectan en fábrica de azúcar

Efecto de los enzimas



Invertasa ácida
pH 4,8 – 5,2

Invertasa neutra



Adaptado de: Eggleston, 2015

Centro de Investigación de la Caña de Azúcar



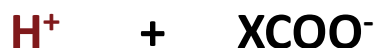
Efecto de los ácidos orgánicos

Ácido aconítico (cis and trans), ácido cítrico, ácido láctico, entre otros

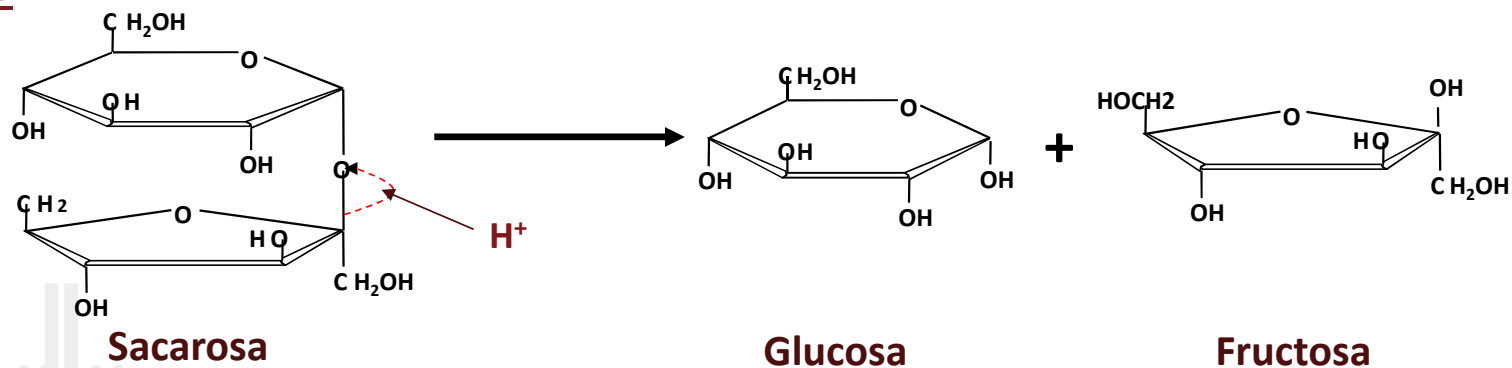
Mecanismo

X Ácido orgánico

Condiciones ácidas en
el jugo



Entonces

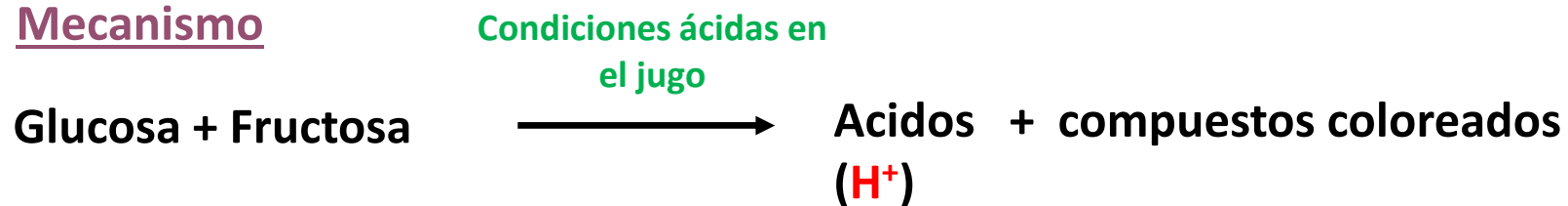


Adaptado de: Eggleston, 2015

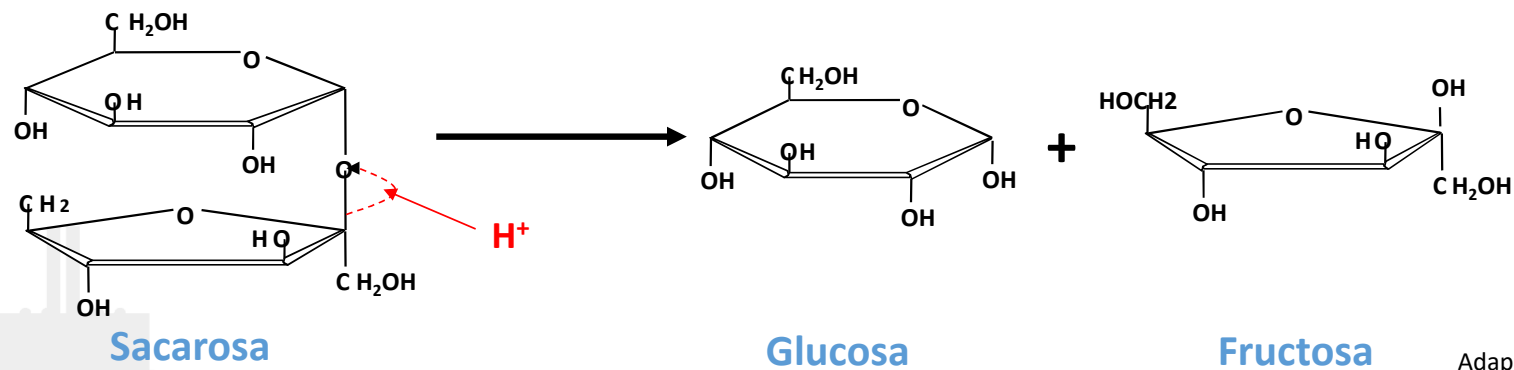
Efecto de los azúcares reductores

- Azúcares reductores pueden catalizar la inversión ácida de la sacarosa

Mecanismo



Entonces



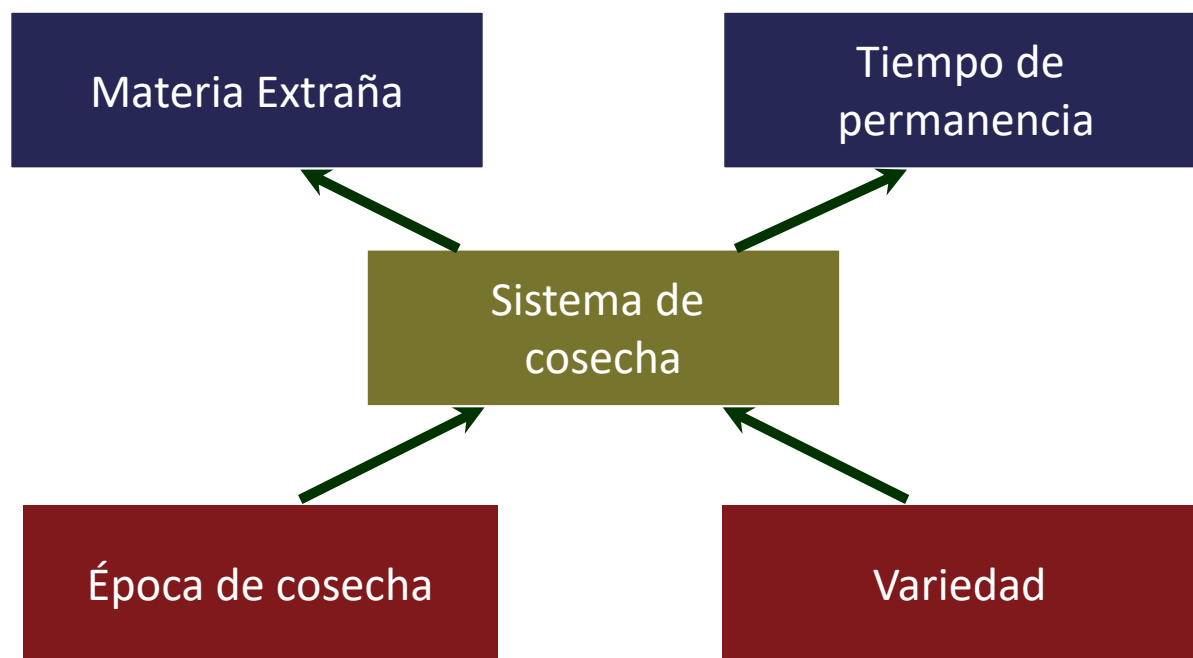
Adaptado de: Eggleston, 2015



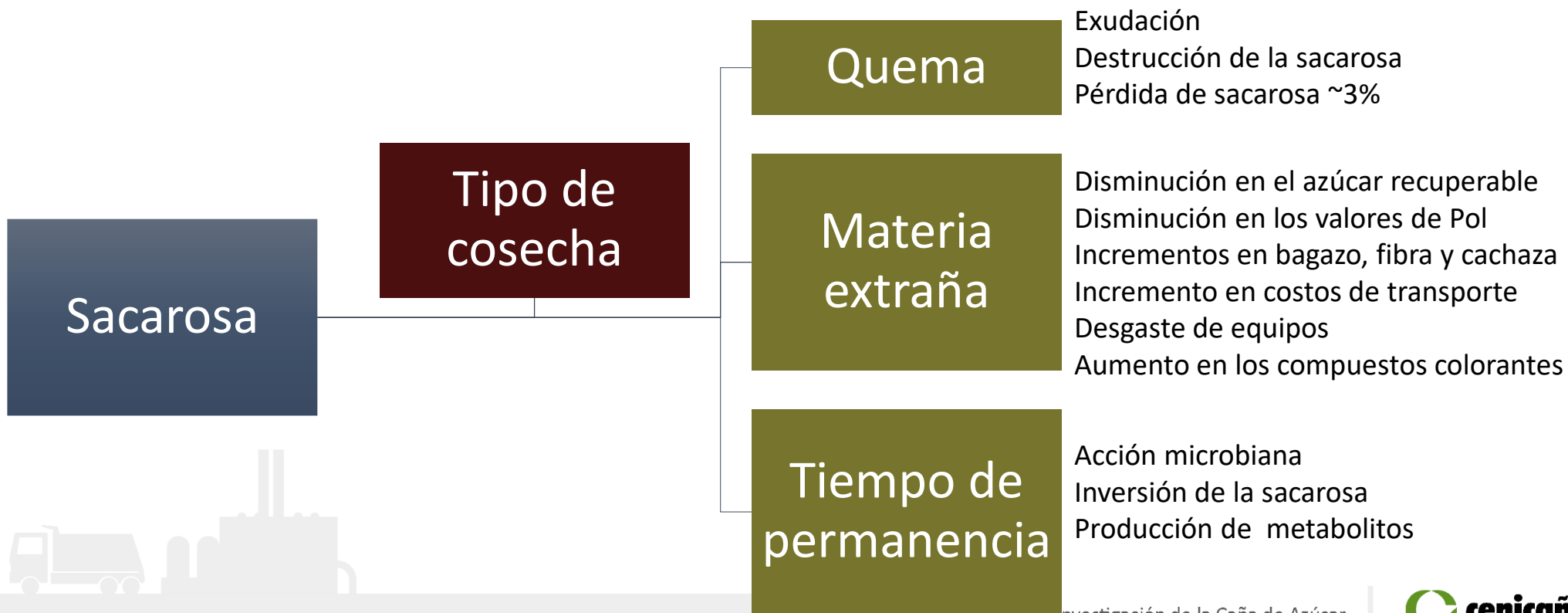
Pérdidas en cosecha



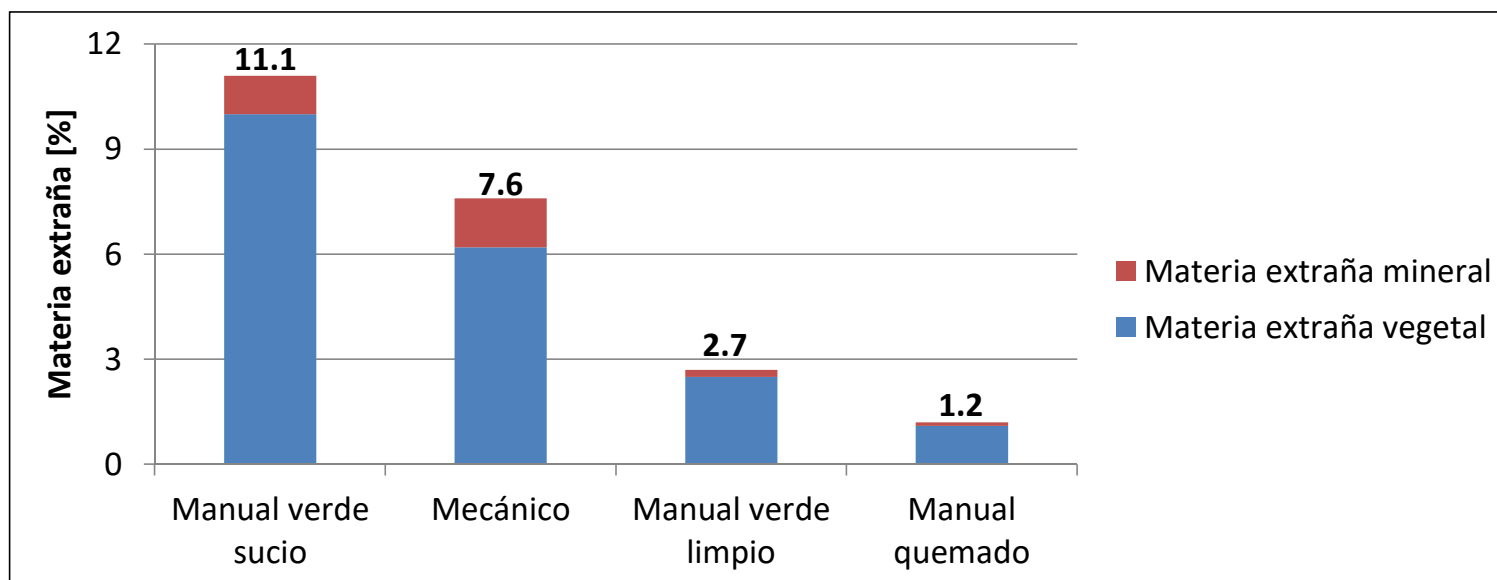
Pérdidas durante y después del corte



Factores operacionales que influyen en las pérdidas de sacarosa entre corte y molienda



Contenido de materia extraña por tipo de cosecha



El tipo y la calidad de la cosecha tienen una relación directa sobre el contenido de materia extraña, con valores de 11.1% de materia extraña total para caña de cosecha manual verde sucia, comparada con 1.2% al tener caña de cosecha manual quemada.

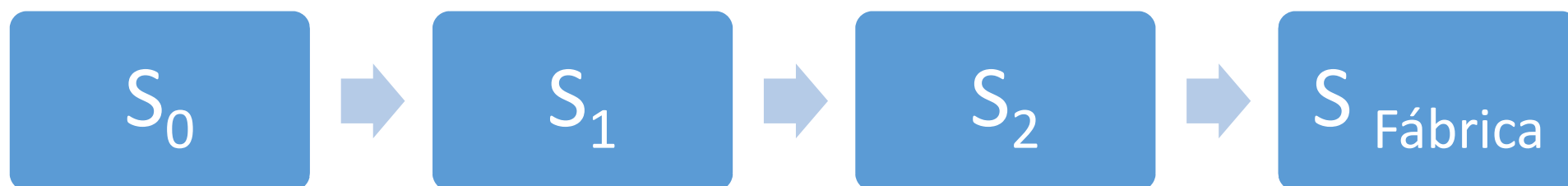
Velocidad de deterioro de la sacarosa según método de cosecha

Tipo de cosecha	Mayor tasa de deterioro	Velocidad de deterioro %/h ¹
Mecanizada verde		1,1
Mecanizada quemada		0,52
Manual quemada		0,24
Manual verde		0,17

Menor tasa de deterioro

Fuente: Adaptado de Eggleston, 2015; ¹Cenicaña 2018

Importancia de la determinación de la sacarosa en campo



Pérdidas por:

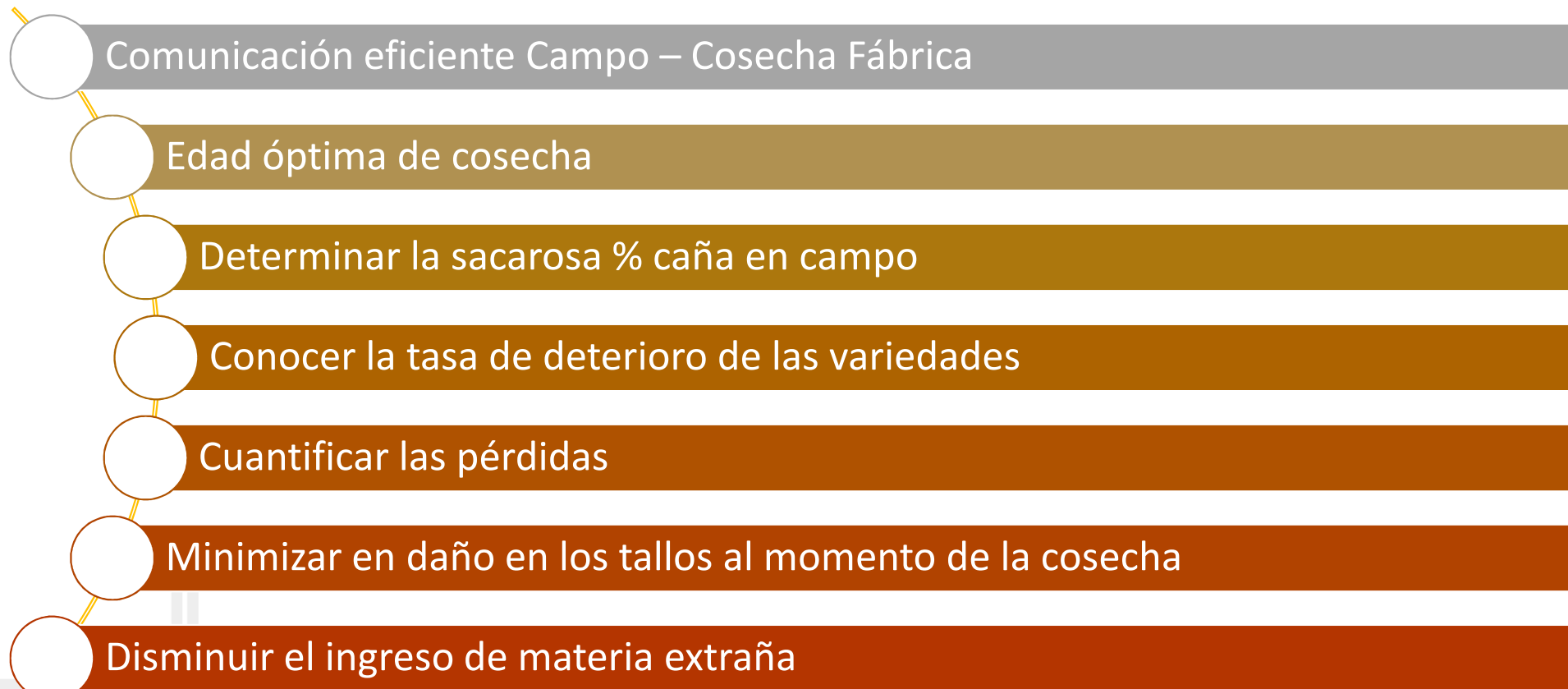
- Quema
- Mecanización
- T. Permanencia

Pérdidas por:

- T. Permanencia
- Materia extraña



Reducción de pérdidas entre cosecha y molienda

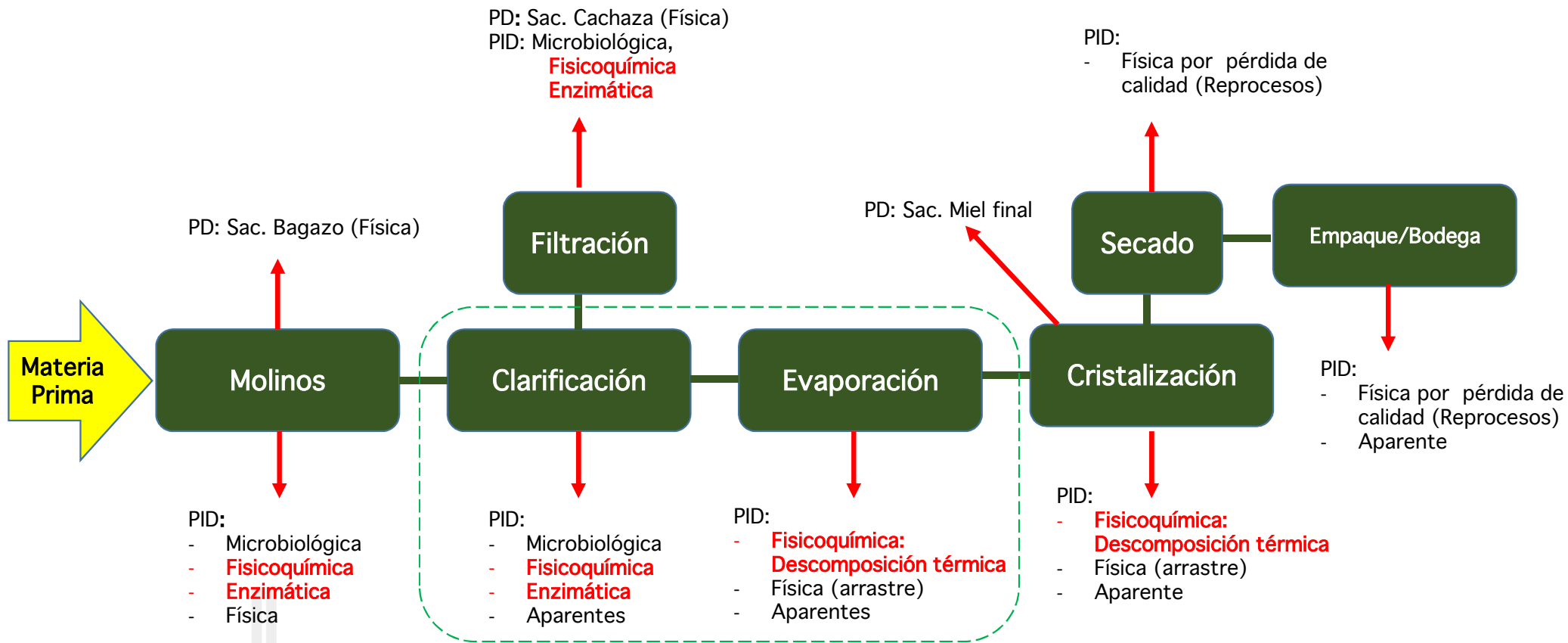




Pérdidas en fábrica

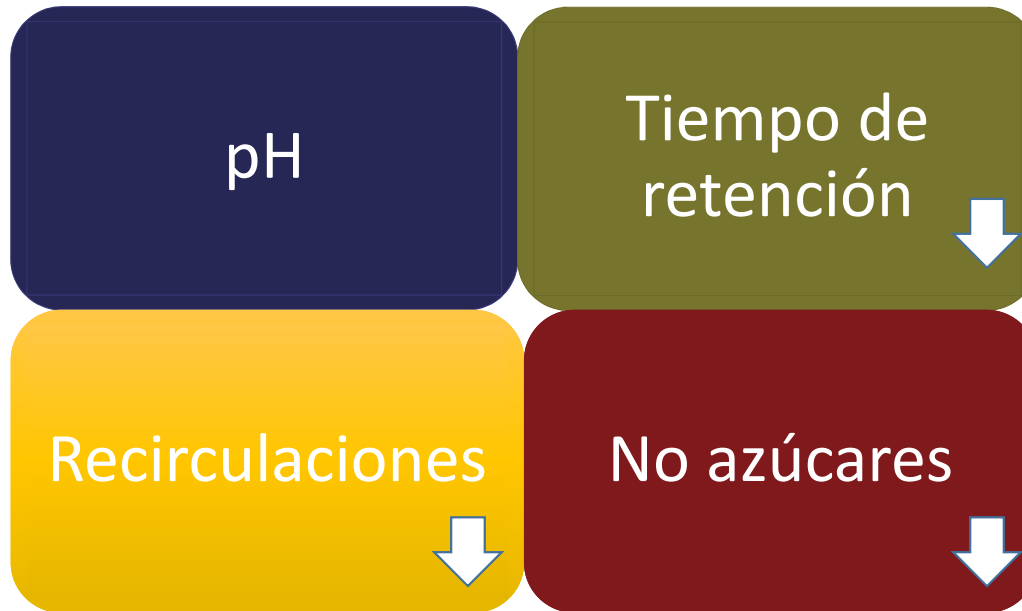


Fuentes de pérdida de sacarosa



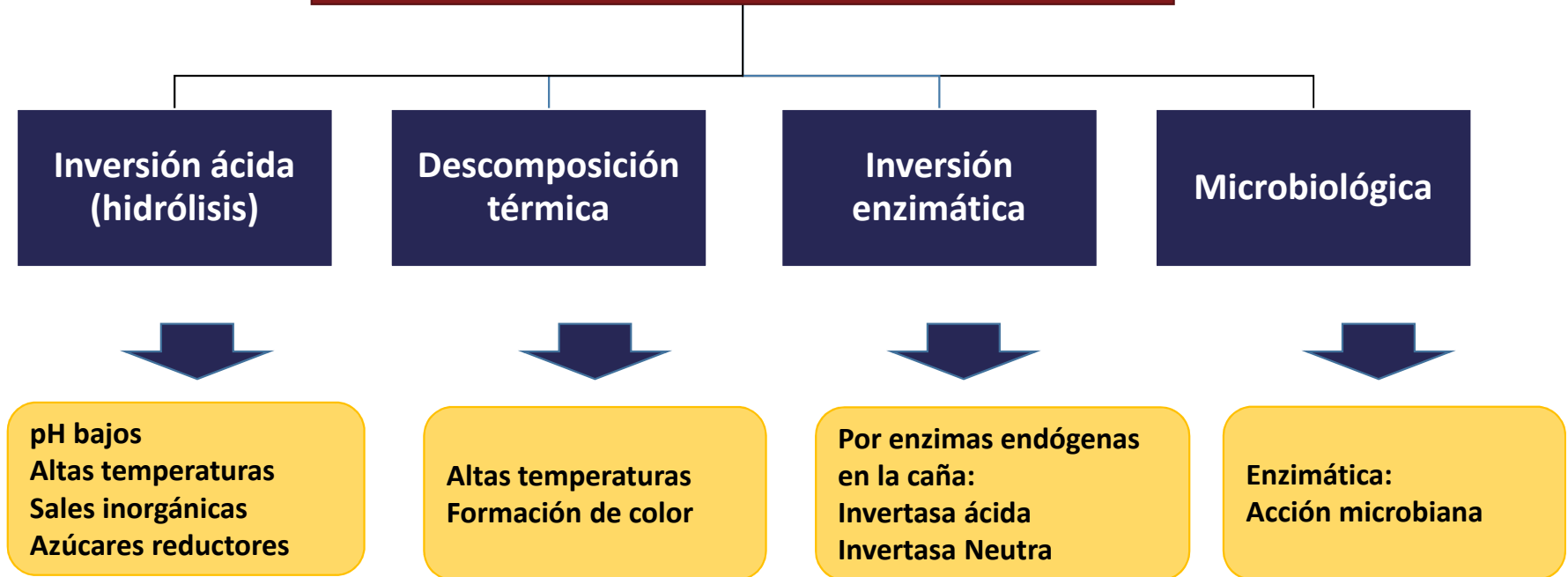
PD: Pérdida Determinada
PID: Pérdida Indeterminada

Reducción de pérdidas de sacarosa en fábrica de azúcar

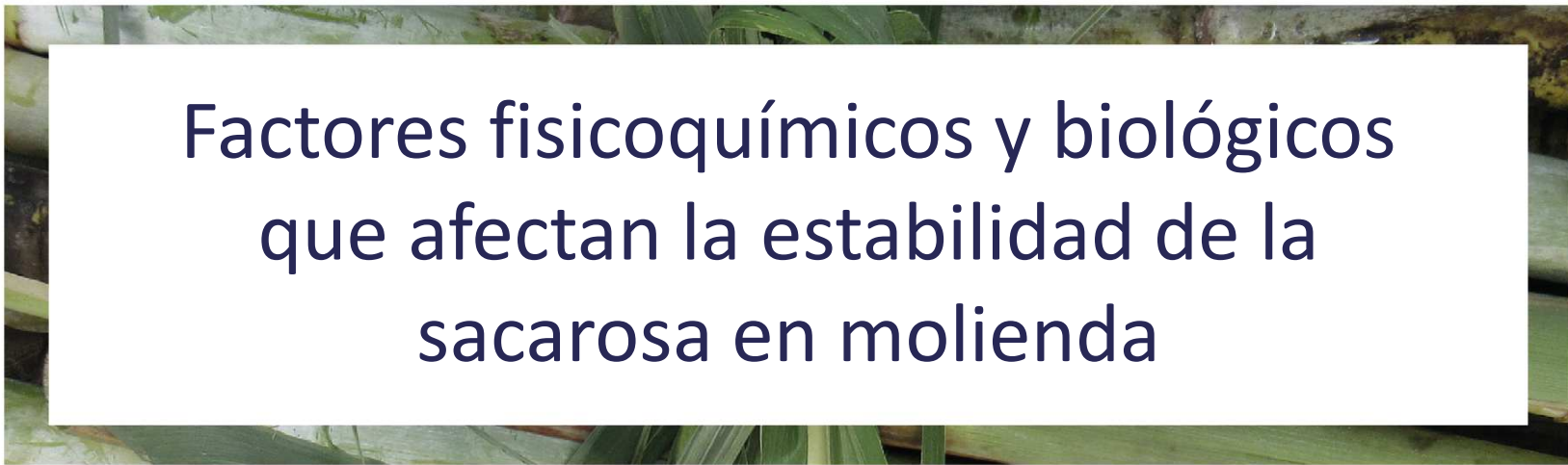


Adaptado de: Eggleston, 2015

Pérdidas de sacarosa



*Las pérdidas por inversión **no pueden estimarse en el proceso a partir de cambios en la pureza**, ya que estas pérdidas son del mismo orden de magnitud que los errores analíticos (Schiffier 2001).*



Factores fisicoquímicos y biológicos que afectan la estabilidad de la sacarosa en molienda



Efectos del RAC sobre la fábrica

La materia extraña que entra a la fábrica con la caña afecta negativamente las estaciones de preparación y molienda y elaboración, causando los siguientes inconvenientes:

- Disminución de la tasa de molienda del tándem de molinos y menor extracción de sacarosa.
- Mayor deterioro y desgaste en superficies metálicas
- Menor eficiencia de combustión del bagazo en las calderas
- Mayor color e impurezas en materiales de proceso y producto terminado



Impacto de la materia extraña sobre el desempeño de la extracción

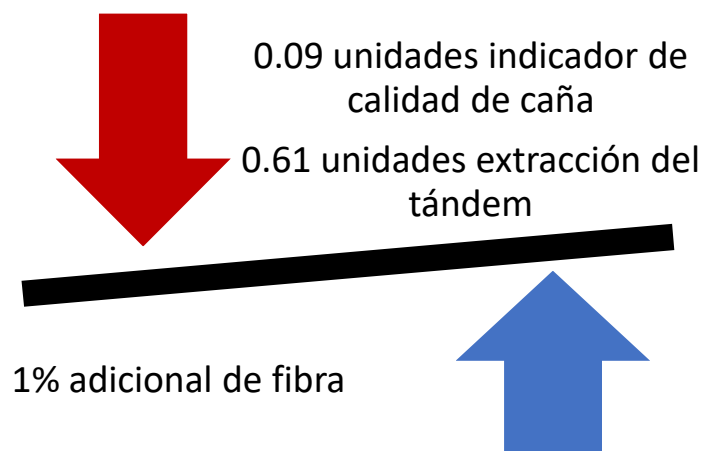
Seguimientos a estaciones de preparación y molienda para evaluar el comportamiento de los indicadores de desempeño ante cambios en la calidad de la caña procesada.

$$\text{Calidad de caña} = \frac{\text{Sacarosa aparente \% Caña}}{\text{Fibra industrial \% Caña}}$$

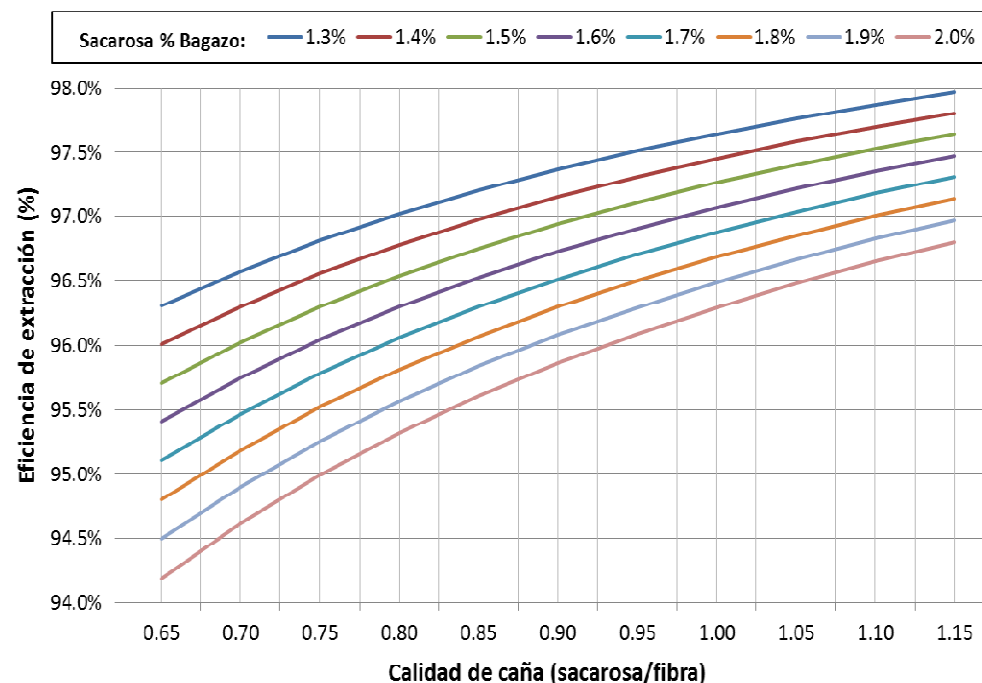
Se desarrolló un modelo de cálculo que utiliza las ecuaciones del balance de masa en molinos para determinar la eficiencia de extracción en función de la calidad de la caña. El modelo fue evaluado con reportes de indicadores de 7 ingenios.



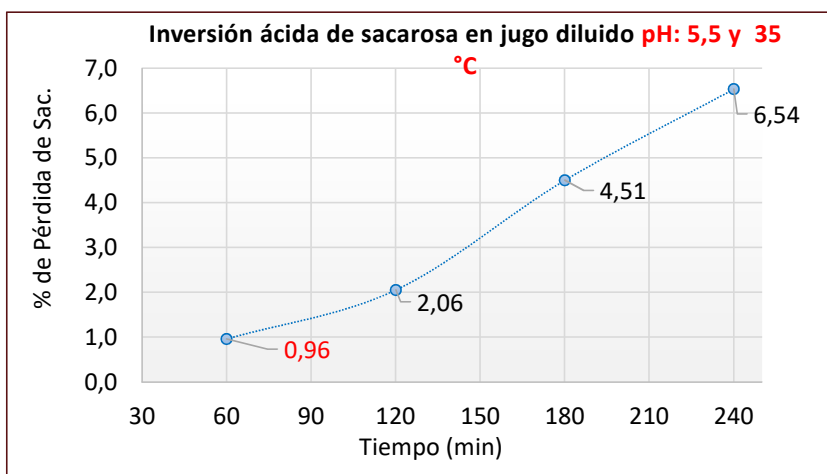
Impacto sobre el indicador de calidad de caña y la extracción



Utilizando el modelo desarrollado se determinó que ante disminuciones de 0.10 en el indicador de calidad de caña, la eficiencia de extracción del tándem decrece 0.5 unidades porcentuales.



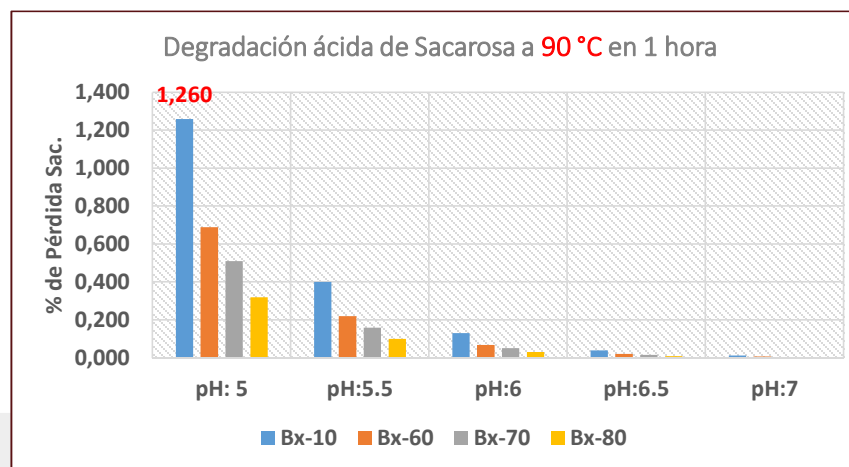
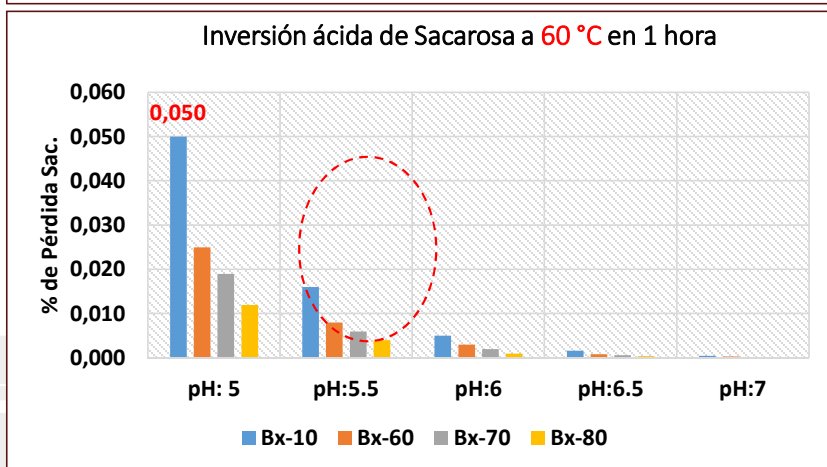
Efecto de la temperatura y pH en las pérdidas de sacarosa



Bajos Brix (actividad del agua) y bajos pH favorecen los procesos de inversión ácida de sacarosa.



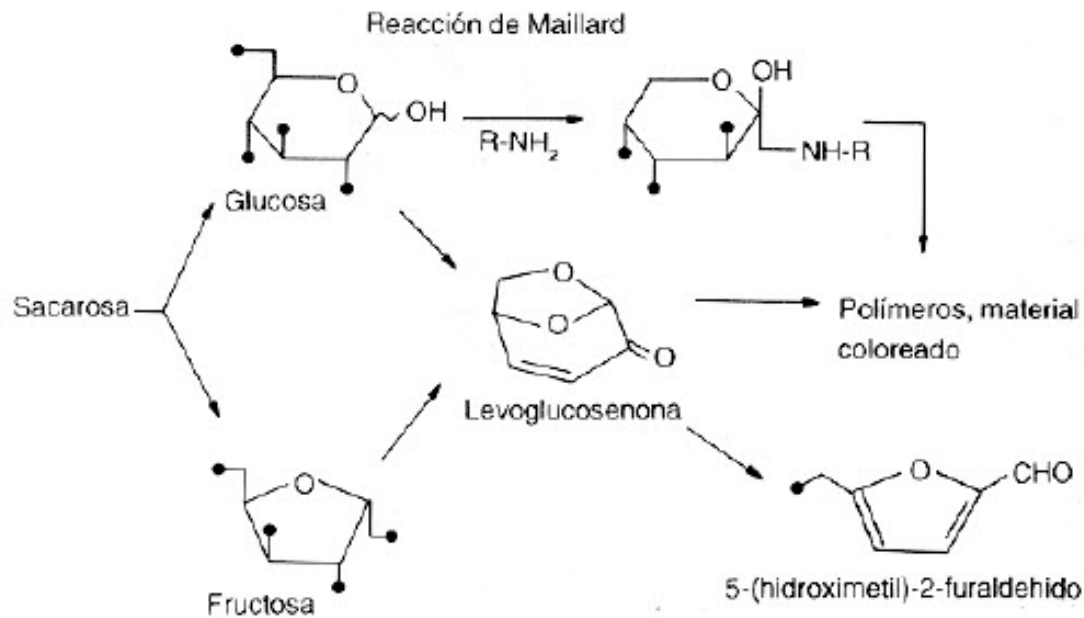
Evitar retener materiales de bajo Brix y bajo pH durante paros en fábrica



Fuente:
Parker, Cane
Sugar
Handbook

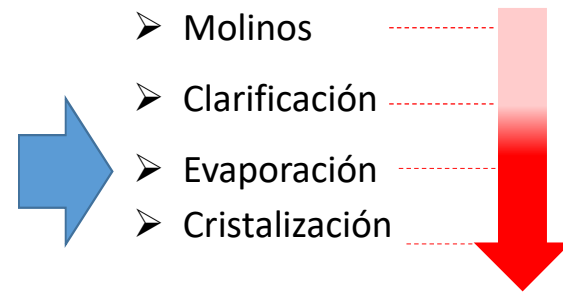
Pérdidas por Descomposición Térmica

Posibles fuentes de la termólisis de la sacarosa y formación de melanoidinas en el procesamiento de materiales



A temperaturas elevadas el pH se reduce

Fuente: Shafizades et al, 1979



- Es significativa por la formación de color, favorece la pérdida de sacarosa debido al incremento en la producción de mieles
- La sacarosa puede caramelizarse y los monosacáridos descomponerse a ácidos orgánicos, estos a su vez reaccionar con iones de calcio, resultando la formación y precipitación de sales de calcio....incrustación



Estudio cinético de la tasa de inversión de la sacarosa en jugo diluido

Cinética de inversión de la sacarosa

Vukov (1965)

$$[sac]_t = [sac]_0 e^{-kt}$$

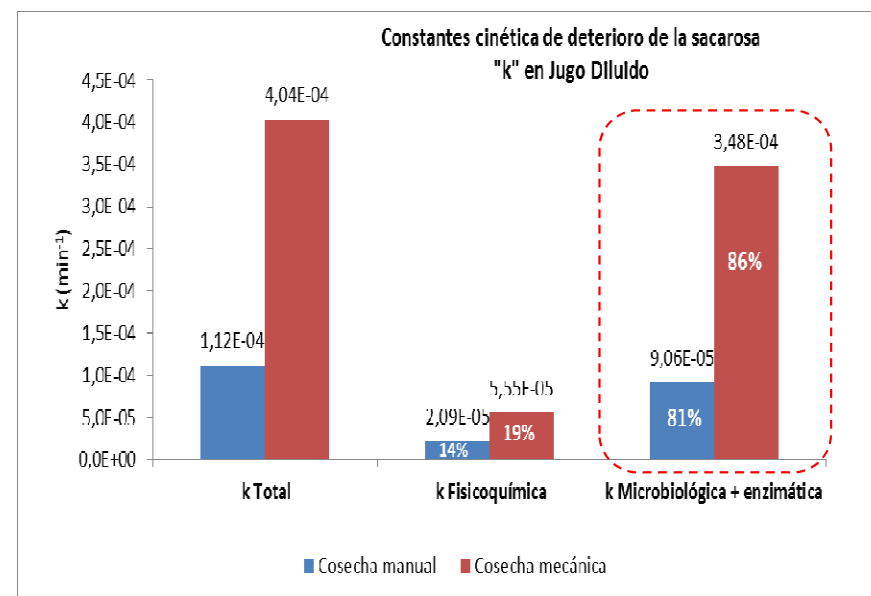
$$\log k = k_u + \log c_w - \frac{E_A}{RT} - pH$$

k: Constante de velocidad

$k_u = 16.91 \text{ min}^{-1}$ --> valor promedio reportado por Vukov

$c_w = \rho \cdot (100 - Bx) / 100$ --> Concentración de H₂O

$E_A = 47143 \text{ J/mol}$ --> promedio reportado por Vukov (temperatura de 20-130°C)



La inversión enzimática y microbiana, son responsables de más del 80% de las pérdidas de sacarosa en jugos de molienda

Fuente: S. Peredo, et al, Cenicaña, 2014

Centro de Investigación de la Caña de Azúcar



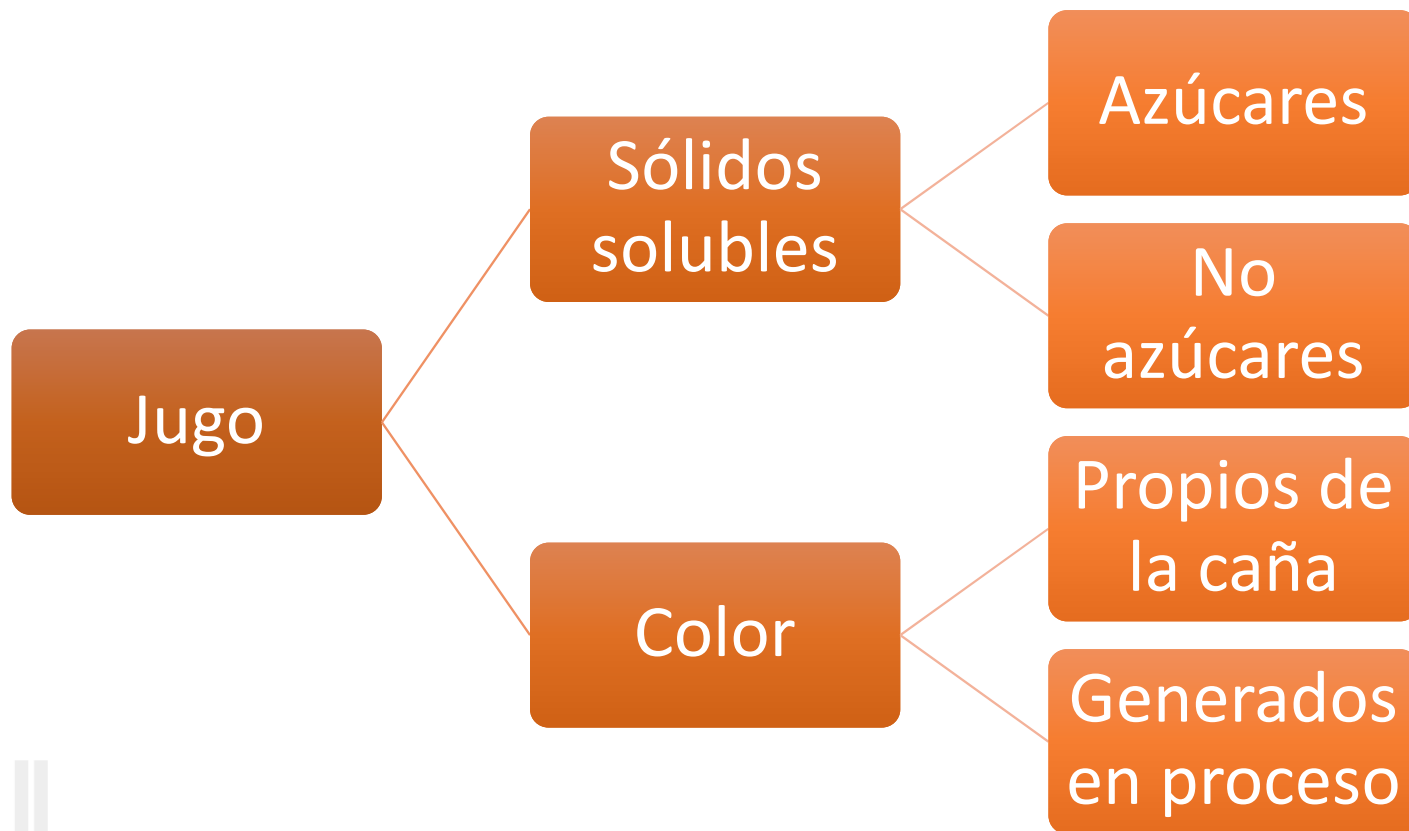
Control integral de pérdidas de sacarosa por acción microbiana en molinos





Calidad del jugo



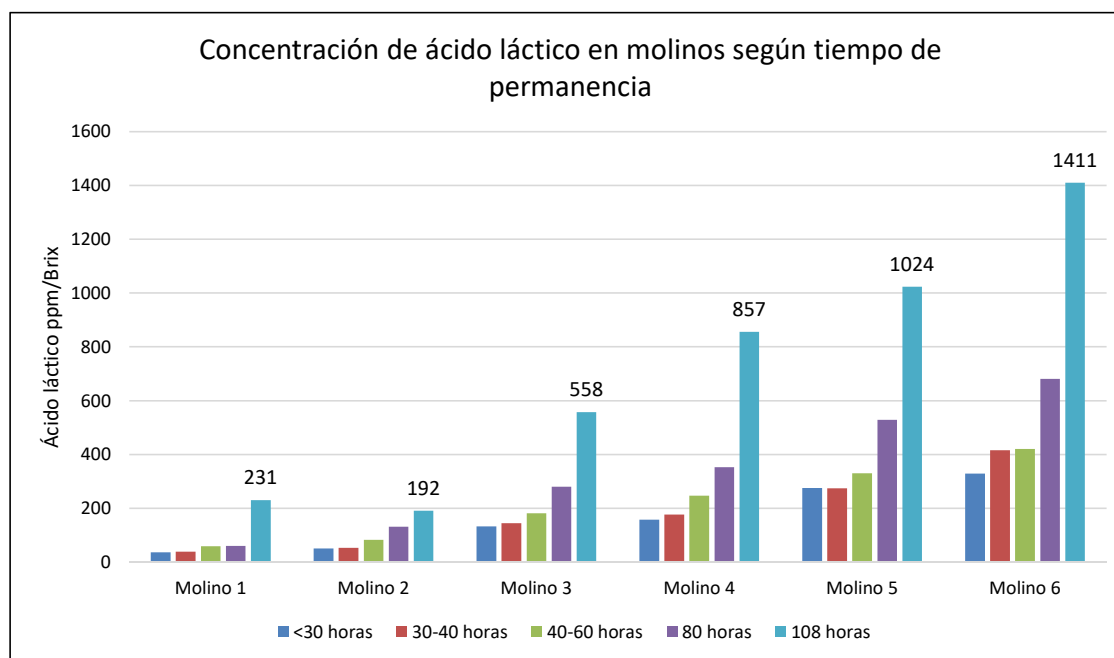


Principales No azúcares en jugos de primera extracción

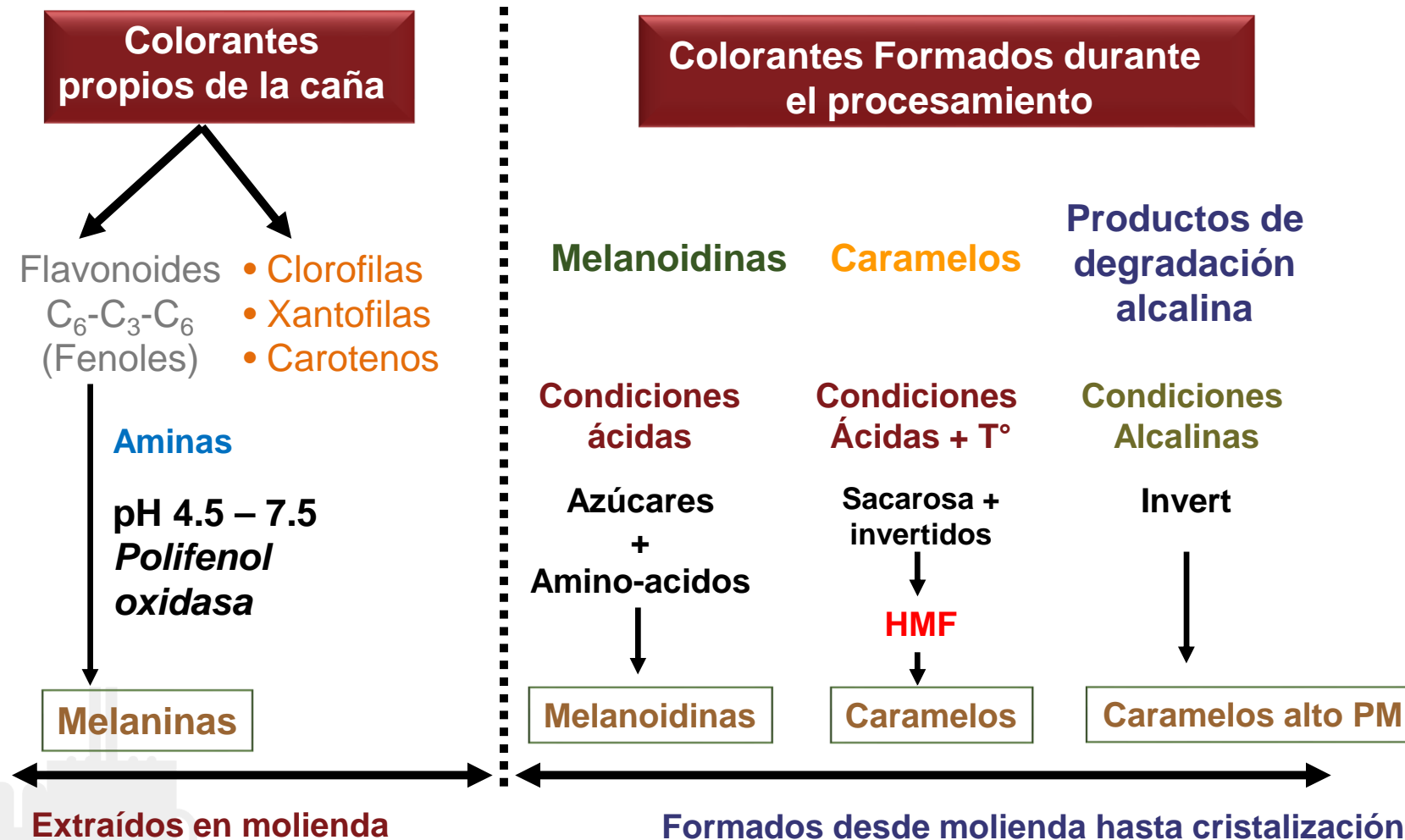


		Concentración ppm/Brix
Ácidos propios de la caña	Ácido trans aconítico	1180 - 9200
	Ácido cítrico	200 - 1500
	Ácido cis aconítico	15 - 1150
Ácidos producto de acción microbiana	Ácido láctico	30 - 5681
	Ácido acético	600 - 8000

Efecto del tiempo de permanencia sobre la concentración de metabolitos microbianos



Colorantes en fábrica de azúcar



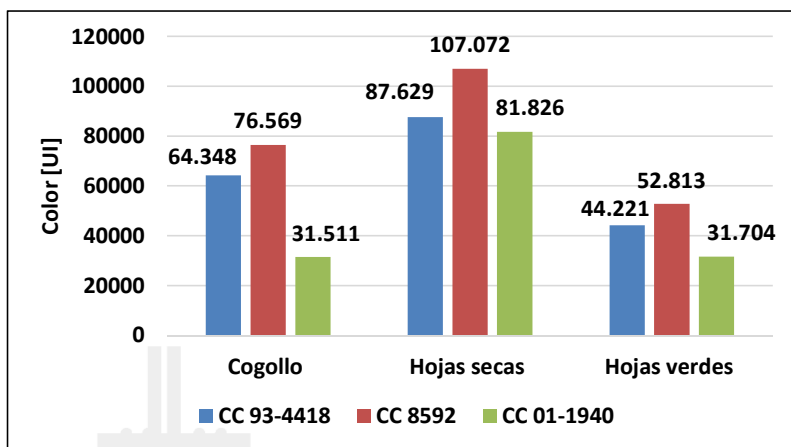
Color en jugos



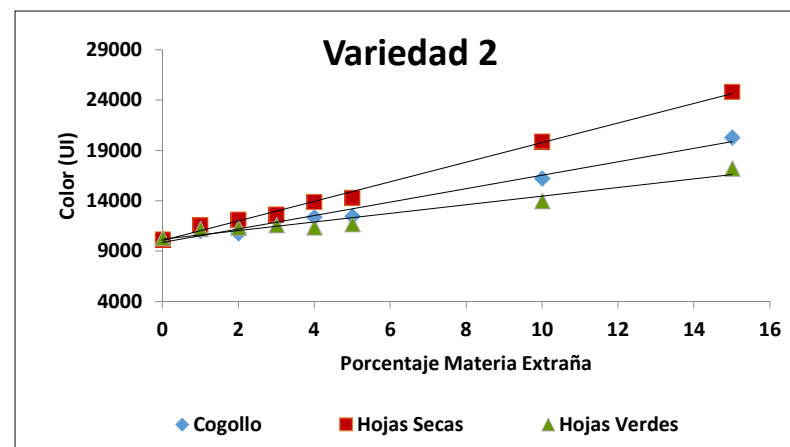
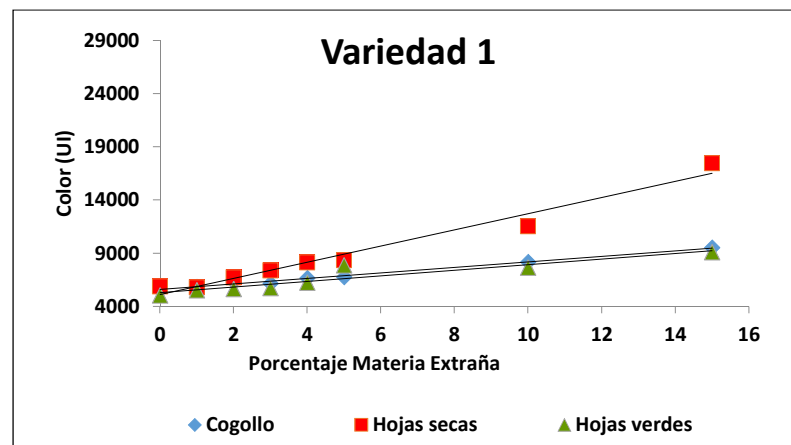
Factores que influyen en el color de los jugos

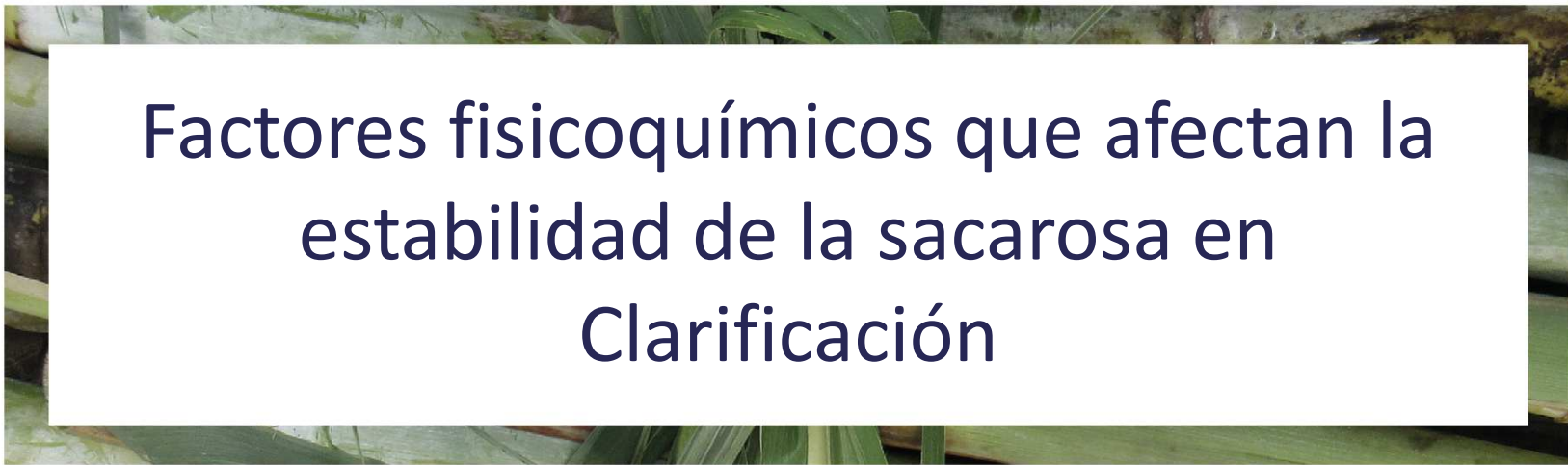
Varietal

Distribución de la MEV



Pie de fotos en Calibri (cuerpo) tamaño 11





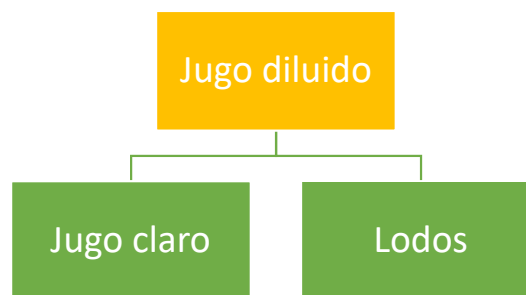
Factores fisicoquímicos que afectan la estabilidad de la sacarosa en Clarificación



Clarificación de jugo



OBJETIVO: remover la mayor cantidad de impurezas solubles e insolubles a través de la sedimentación con la mínima pérdida de sacarosa.



¿Cómo sé qué tan buena fue la clarificación?

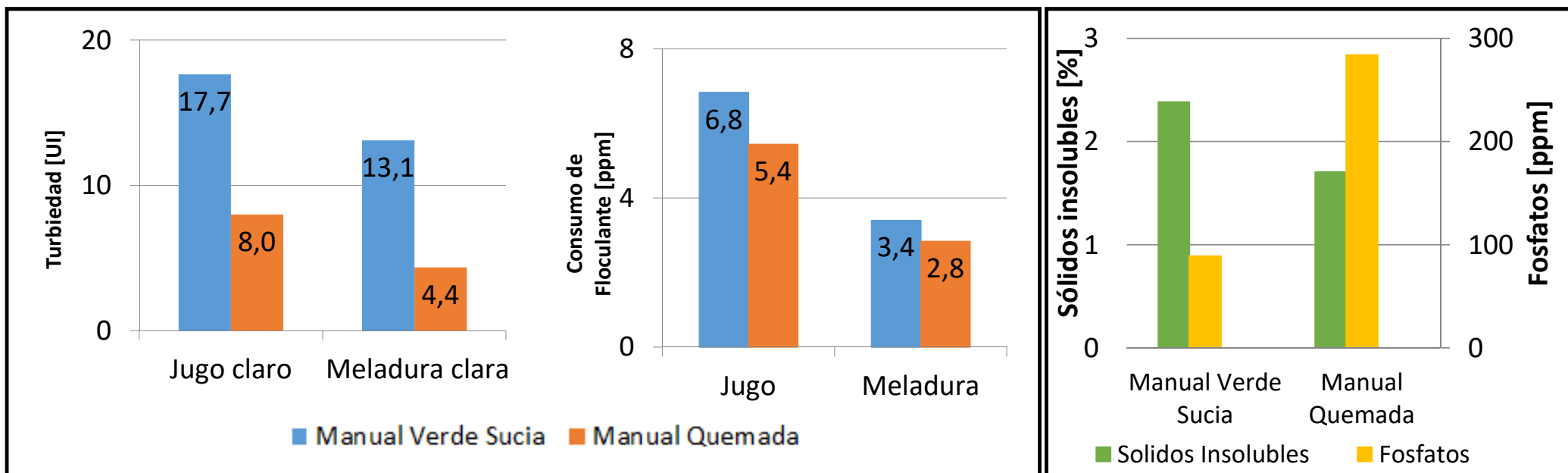
- ✓ Turbiedad en jugo claro < 10 UI
- ✓ Remoción de turbiedad > 95%
- ✓ Fosfatos en jugo claro < 30 ppm

Tiempo de residencia = 45-150 min

Principales componentes de la caña que influyen en la clarificación

Componentes	Efecto en la clarificación
Polisacáridos: Gomas, Dextrana, almidones y trisacáridos	Reducción de filtrabilidad de jugos, aumentando tiempos de residencia
Proteínas Compuesto aminonitrogenados	Las proteínas se desnaturalizan con el calentamiento y el encalado y se precipitan. Los amino ácidos a pH altos reaccionan con los AR
Ácidos orgánicos: Aconítico, málico, cítrico, $PO_4^{3=}$, SO_4^{2-}	Algunas se precipitan con la adición de cal: Aconitato de calcio, $PO_4^{3=}$, SO_4^{2-}
Sales de ácidos inorgánicos: KCL, $CaSO_4$, Fosfatos	Iones inorgánicos K^+ , Na^+ , Cl^- no sufren cambios importantes. Por ello el Cl^- es utilizado como marcador en la cuantificación de pérdidas de sacarosa.
Material insoluble: Bagacillo, grasas, ceras, suelo, arcilla, arena	Se precipitan

Impacto de la materia extraña en la clarificación de jugo



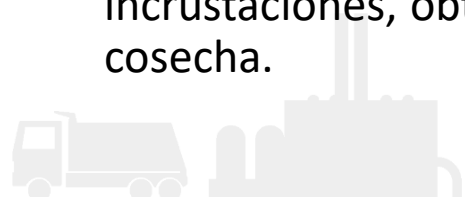
El factor de mayor importancia durante el proceso de clarificación es la turbiedad de los materiales, la cual está directamente relacionada con el contenido de impurezas que ingresan a la fábrica y se incrementó para el escenario con mayor contenido de materia extraña.



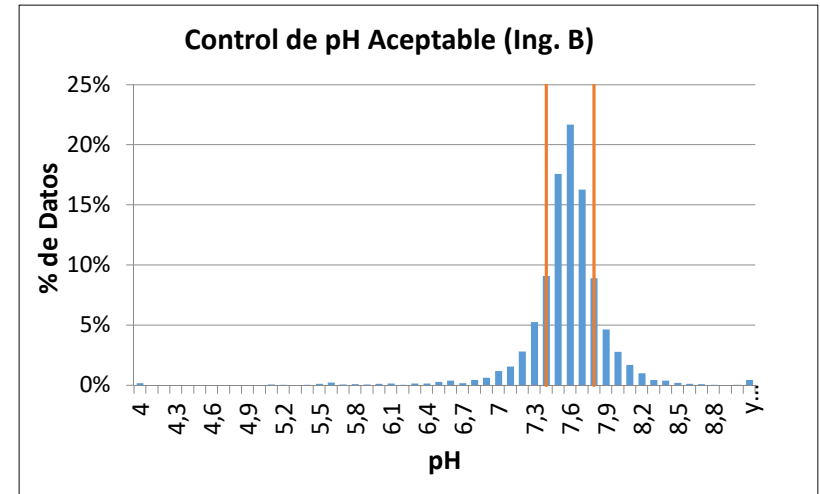
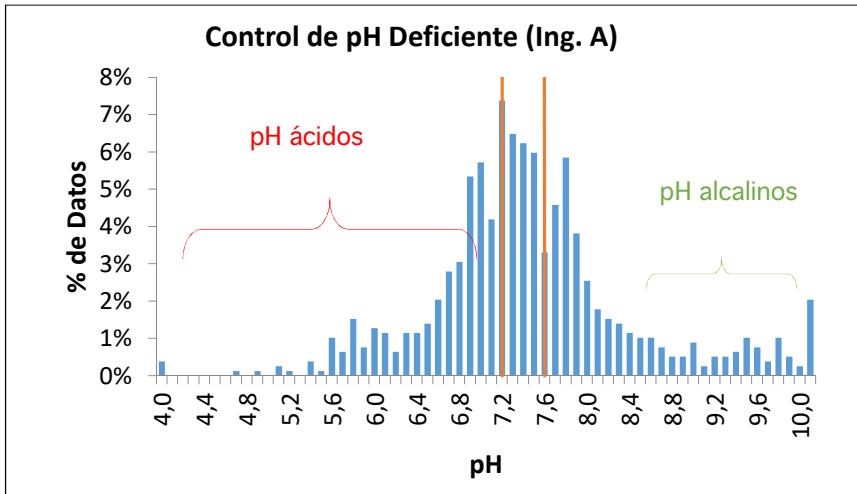
Impacto sobre el pH y el contenido de metales y minerales

VARIABLE \ ESCENARIO	Manual verde sucio	Manual quemada
pH en jugo diluido	6.2	5.5
Calcio en jugo diluido [ppm]	2775	944
Consumo de cal en clarificación de jugo [ppm]	545	622

En cuanto al **contenido de minerales y metales** como el magnesio, potasio, hierro, cobre, manganeso y zinc **aumentó entre 2 y 24 veces con el contenido de materia extraña**. Sin embargo, la mayoría fueron removidos por clarificación o contribuyeron en la formación de incrustaciones, obteniendo valores similares en meladura clarificada en todos los escenarios de cosecha.



Impacto del bajo control del pH en Clarificación



Pérdida de sacarosa por inversión ácida

Ingenio	Tiempo de residencia del clarificador (min)	Pérdidas sacarosa día (g/ton caña)
Ingenio A	130	275
Ingenio B	45	42
Diferencias	85	233

Potencial de recuperación del ingenio A, con un buen control de pH

*Un ingenio con una molienda de 10.000 ton caña día

Fuente: J. D. Tascón, et al, Cenicaña, 2016

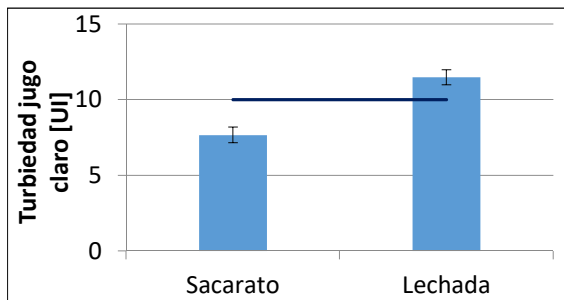
Centro de Investigación de la Caña de Azúcar

cenicaña
Fuente: S. Peredo, Cenicaña, 2015

Estrategias para incrementar eficiencia en clarificación de jugo

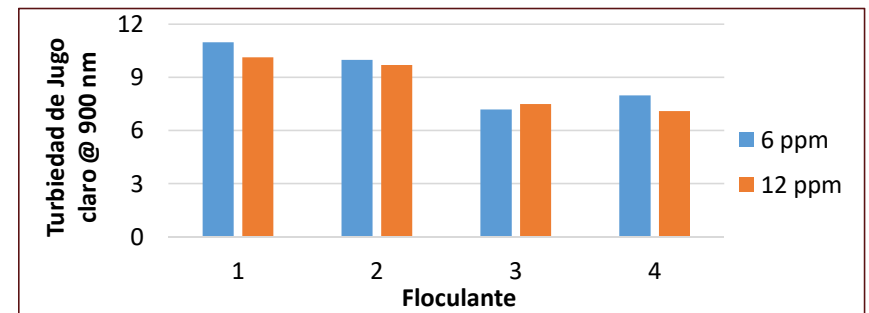
Encalado de jugo

- Medio de encalado (sacarato)
- Ubicación e instalación del sensor de pH
- Control de pH.
 - Rangos de operación del actuador
 - Estrategia de control *feedforward*

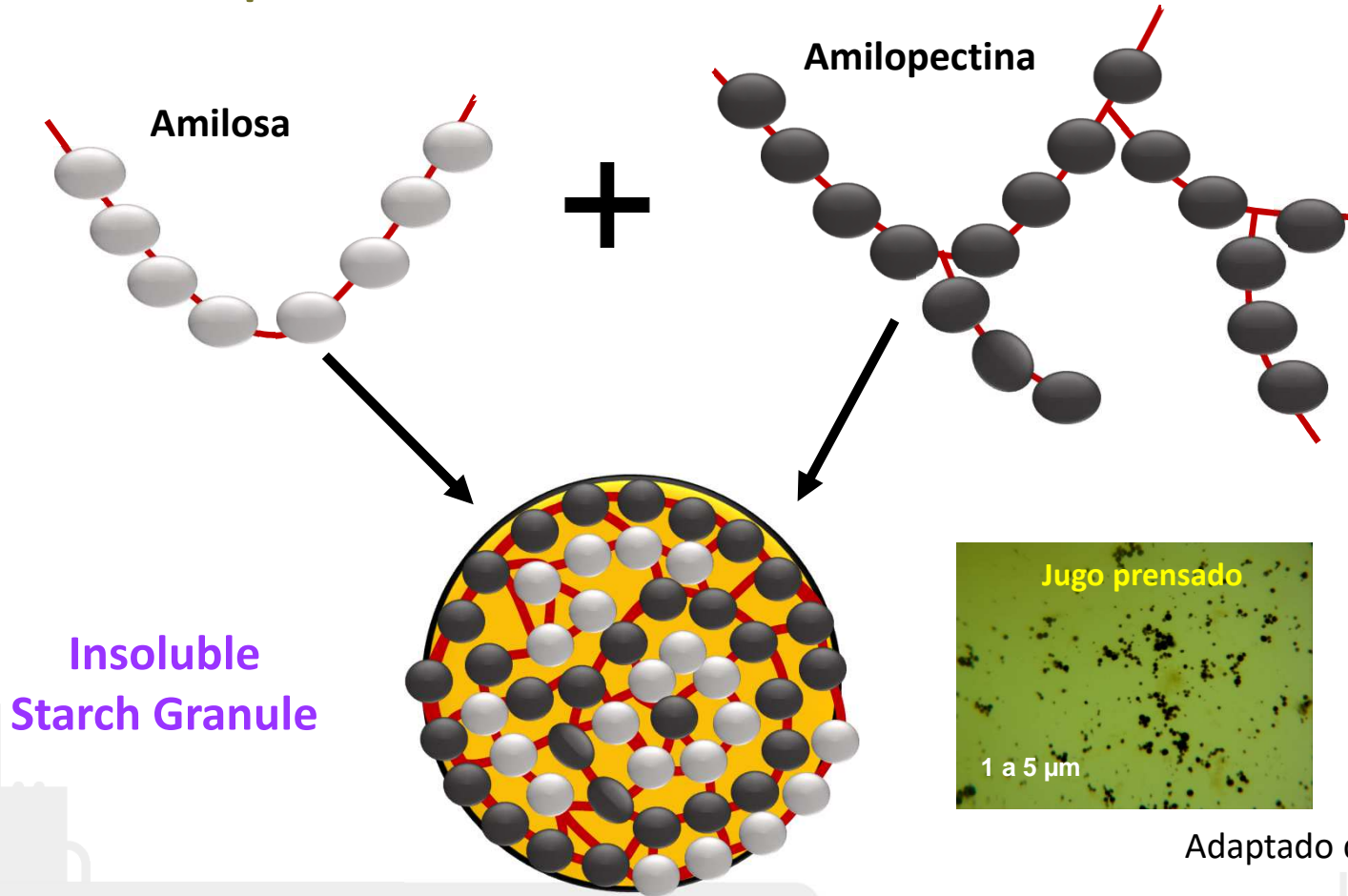


Selección de floculantes

- Pruebas de clarificación (laboratorio)
 - Selección de floculante: Se acompaña con la caracterización de floculantes con metodologías adaptadas en Cenicaña para cuantificar el Grado de hidrólisis y la viscosidad.
 - Dosis de floculante



Impacto sobre el contenido de almidón en materiales de proceso



Adaptado de Eggleston 2015

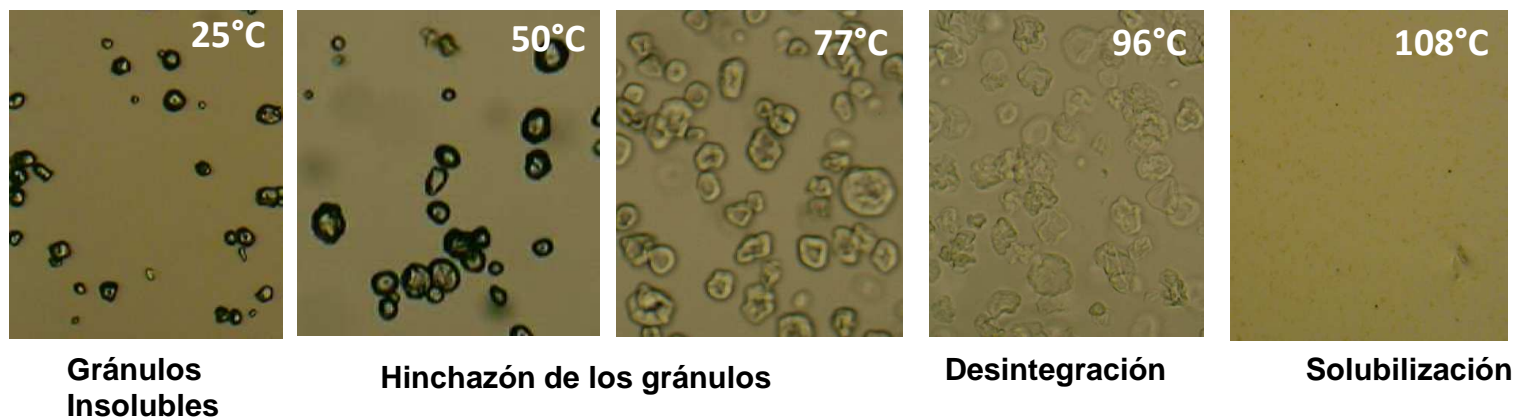
Centro de Investigación de la Caña de Azúcar



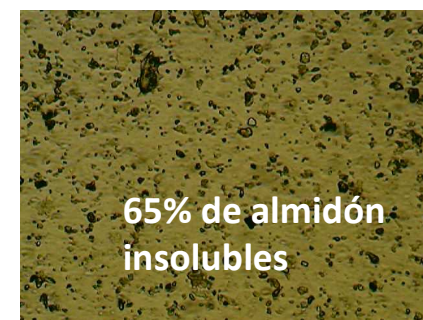
Impacto sobre el contenido de almidón en materiales de proceso

Hidrólisis de almidón de maíz

Modelo para muestras de jugo de caña



Meladura concentrada



Temperatura y agua

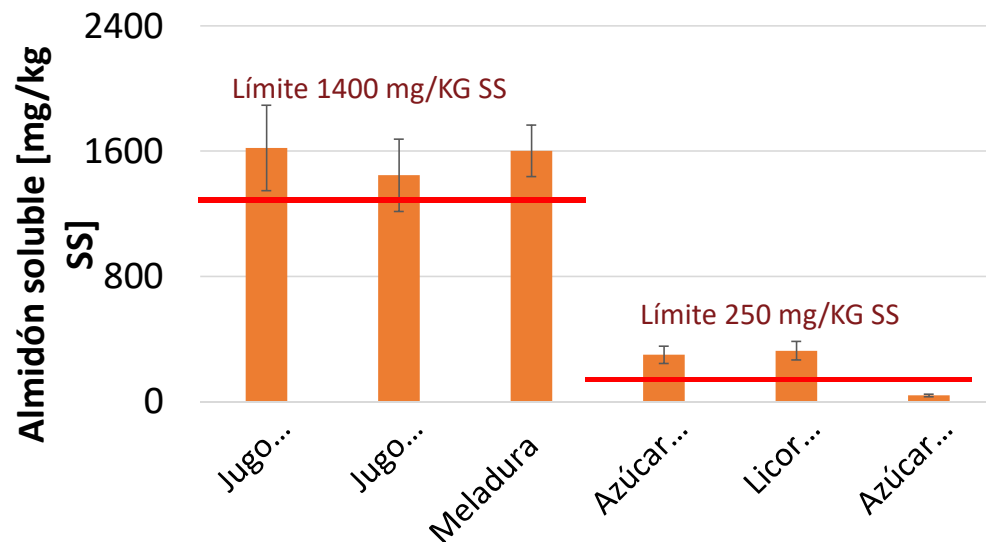
Adaptado de: Eggleston, 2015

Centro de Investigación de la Caña de Azúcar



Impacto sobre el contenido de almidón en materiales de proceso

En ingenios con **materia extraña vegetal alrededor del 10%** el contenido de almidón en meladura fue de 1602 mg/Kg SS y con niveles de materia extraña vegetal bajos (<6%), el contenido se redujo a 912 mg/Kg SS.



18% del almidón de los materiales puede ocluirse en el cristal de azúcar



Contenido de almidón en azúcar crudo de 298 mg/kg SS



Necesidad de aplicación de α amilasas

Remoción de almidón y dextranas

Dextranasa	Amilasa
Temperatura óptima: 50 - 60°C	Temperatura óptima: 80 – 110°C
pH: 4 – 7	pH:5-6
Temperatura de inactivación: >65°C	Temperatura de inactivación:
Dosis: 2 – 10 ppm/caña	Dosis: Basada en el contenido de almidón 0,04 – 1 % almidón.
Actúa en enlaces glucosídicos $\alpha(1-6)$ de dextranas de alto peso molecular >1000 Kda.	Actúa en enlaces glucosídicos $\alpha(1-4)$.
Punto de aplicación: 4 molino: mayor tiempo de retención previo al calentamiento ¹ .	Punto de aplicación: Jugo clarificado (Termoestables) o en evaporadores 1 o 2 efecto (>70°C). No efectiva en jugos de molino: Almidón se encuentra en forma de gránulos insoluble.
Producto de reacción: Dextranas de medio (100 – 1000 Kda) y bajo (45-100 kda) peso molecular y oligosacáridos (2 a 10 grados de polimerización). Raramente en una fábrica el producto final es glucosa ² .	Producto de reacción: Oligosacáridos.






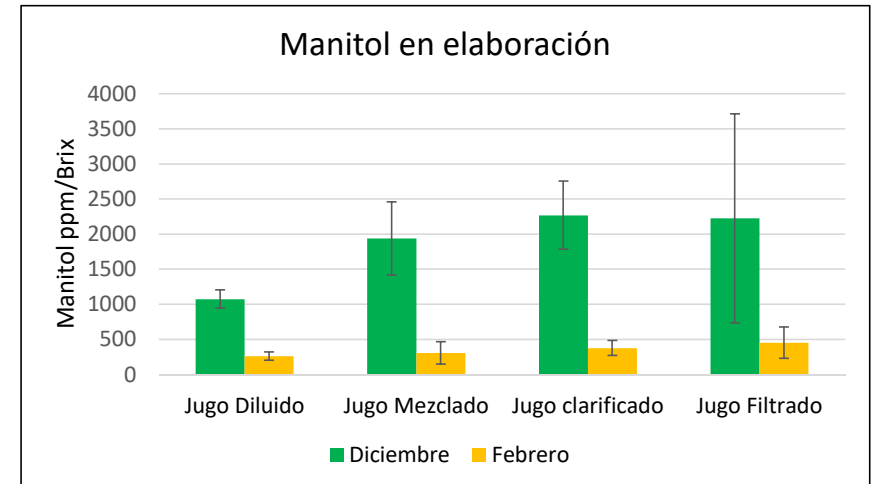
Impacto del tiempo de permanencia sobre la calidad de materiales en fábrica

Presencia de metabolitos conlleva a:


- Mayor actividad microbiana en la fábrica
- Disminución en la recuperación de sacarosa
- Formación de grano aguja

Acciones tomadas por la fábrica para mitigar el impacto de los metabolitos

- Control de acción microbiana en molinos 
- Manejo de retornos: reducción y prácticas para su recirculación 
- Aplicación de enzimas 



Todas las prácticas son necesarias para mitigar el problema asociado a la calidad de los jugos.

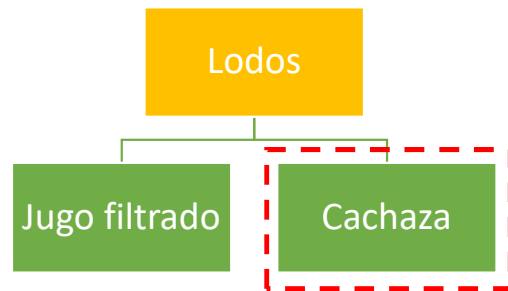


Factores fisicoquímicos que afectan la estabilidad de la sacarosa en filtración



Filtración de cachaza

OBJETIVO: Recuperar la sacarosa presente en el jugo que fue arrastrado en los lodos en el proceso de clarificación



Adición de bagacillo

Ajuste de pH

Adición de floculante

Filtración al vacío

¿Cómo sé qué tan buena fue la filtración?

- ✓ Sacarosa en cachaza < 1.5%
- ✓ Diferencia en pureza entre jugo filtrado y jugo claro < 2.0
- ✓ Concentración más baja posible de metabolitos microbianos

Tiempo de residencia = 45-150 min

Tipos de filtros de lodos



Filtros rotatorios al vacío

- Pol en cachaza= 0,7-2,5%
- Humedad en cachaza=65-75%
- Retención = 70-80%



Filtros banda

- Pol en cachaza= 1,25-1,5%
- Humedad en cachaza=60-65%
- Retención = 96-98%

Estrategias para reducir la pérdida de sacarosa en cachaza en filtros rotatorios al vacío

Estado de mallas filtrantes

Mantener las perforaciones de la malla limpias (minimizar taponamiento y pérdidas de capacidad de filtración)

Boquillas rociadoras de agua

Mantener las boquillas rociadoras de agua en buen estado para asegurar que toda la torta se lave adecuadamente

Área de filtración

El área total de filtración debería ser aproximadamente 100 m² por cada 1 t/h de sólidos insolubles en lodos

Bagacillo

La aplicación de bagacillo debería ser entre 0.5-0.7 ton fibra seca/100 ton caña.

Características del bagacillo

Debe ser muy fino, menor que 0.85 mm en diámetro y debe provenir preferiblemente de filamentos de fibra cortos y de la médula.

Consistencia de lodos

El nivel de lodos en clarificadores rápidos debe mantenerse entre 30-35% para asegurar la compactación del lodo y disminuir el flujo de lodos hacia filtros



Estrategias para reducir la pérdida de sacarosa en cachaza en filtros rotatorios al vacío

Vacío

El vacío de adhesión (bajo vacío) debería mantenerse en 50 kPa y vacío de lavado (alto vacío) en 30 kPa

Evacuación de lodos

Por gravedad o bombas con baja turbulencia (desplazamiento positivo de pistón o de diafragma)

Características del agua de lavado

La temperatura debería estar entre 80-90°C y la cantidad de agua aplicada está entre 1 a 2 kg/kg torta, ó 6.5 a 13 kg/kg sólidos de lodo en cachaza.

Velocidad de filtros

Aproximadamente 1 rotación en 2-4 minutos asegurando un espesor de la torta entre 0.6-1.3 cm.

Encalado de lodos (opcional)

Controlar el pH del filtrado en el rango 7.5-8.5 ha logrado incrementar la retención y reducir las pérdidas de pol

Floculante (opcional)

Las dosis de aplicación en el rango de 0.2 a 0.8 mg/kg caña mejora la porosidad de la torta y controla su espesor



Estrategias para reducir la pérdida de sacarosa en cachaza en filtros banda

Floculante

Excesos de floculante podrían disminuir la filtrabilidad de la lona.

Estado de lonas

Asegurar el correcto funcionamiento del sistema de lavado de las lonas

Flujo de lodos

Se debe asegurar un flujo constante de lodos al filtro para evitar pérdidas del vacío y aumento de la pol en cachaza

Boquillas rociadoras de agua

Mantener las boquillas rociadoras de agua en buen estado para asegurar que toda la torta se lave adecuadamente

Consistencia de lodos

El nivel de lodos en clarificadores rápidos debe mantenerse entre 30-35% para asegurar la compactación del lodo y disminuir el flujo de lodos hacia filtros





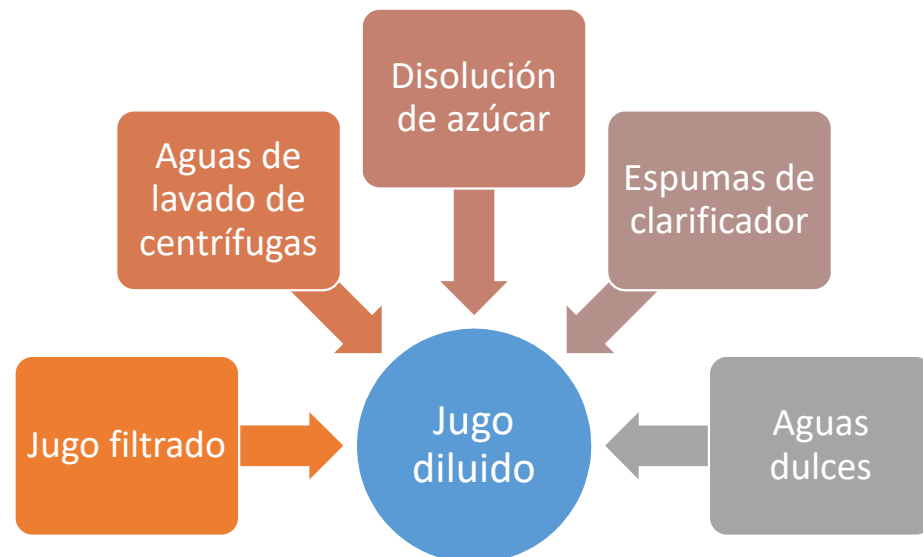
Prácticas para el manejo de retornos

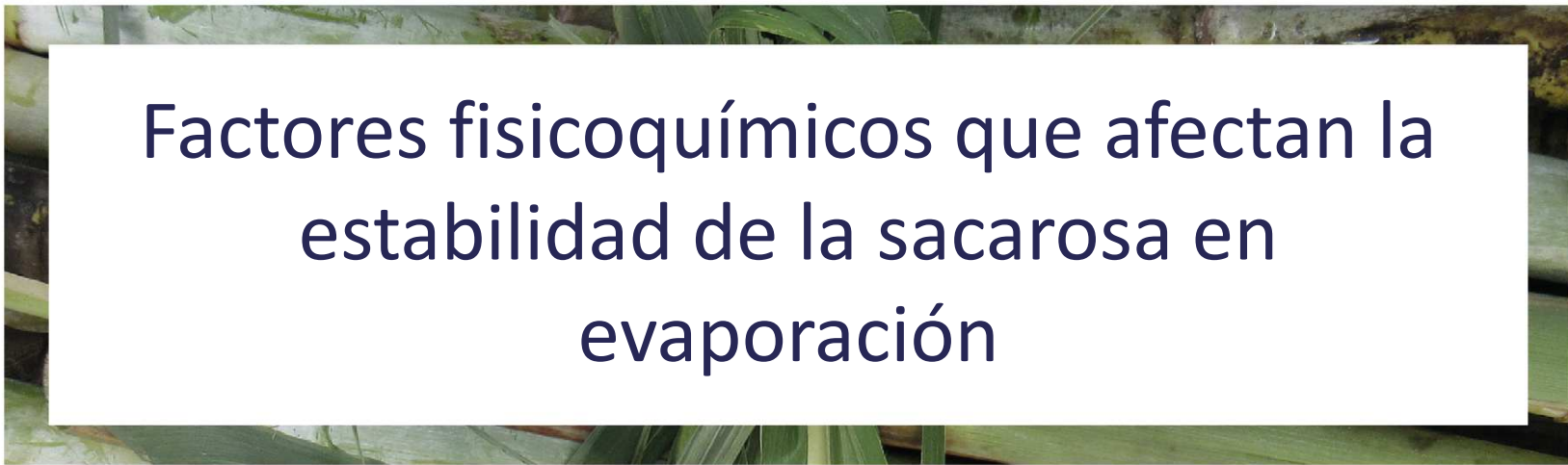


Retornos en fábrica de azúcar

- El jugo filtrado en una proporción promedio de 25% caña, aporta más del 50% del ácido láctico presente en el jugo mezclado.
- Las aguas dulces recuperadas, son una corriente de baja proporción, sin embargo aportan más del 40% del ácido láctico y de la acidez volátil presente en el jugo mezclado.

- 🔄 Reducción
- 🔄 Caracterización y cuantificación
- 🔄 Diseño de equipos y prácticas operativas conducentes a reducir el tiempo de retención



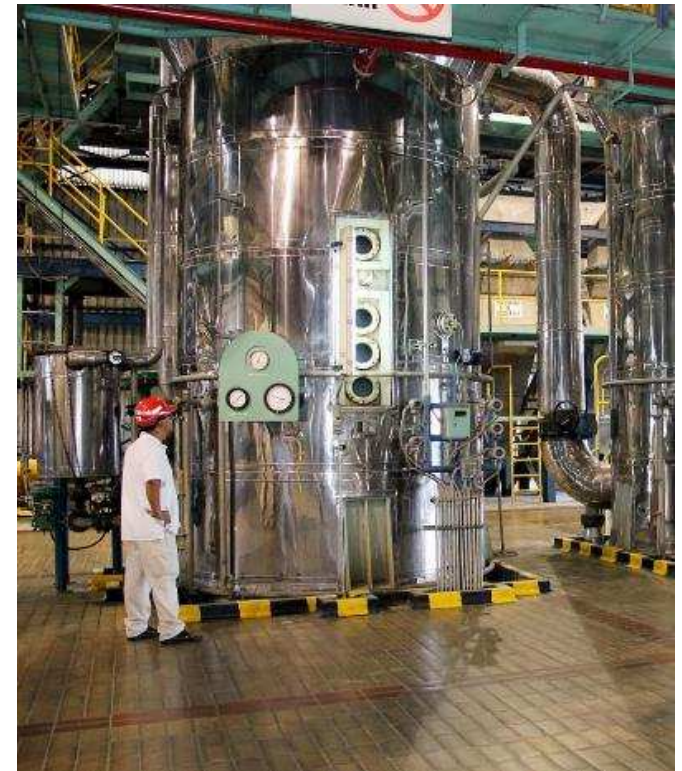
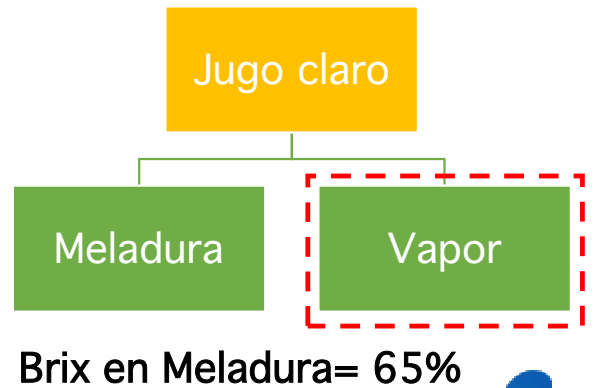


Factores fisicoquímicos que afectan la estabilidad de la sacarosa en evaporación



Evaporación de jugo

OBJETIVO: Remover agua para concentrar el jugo, aprovechando el vapor generado en otras operaciones de calentamiento.



Tiempo de residencia = 10-20 min

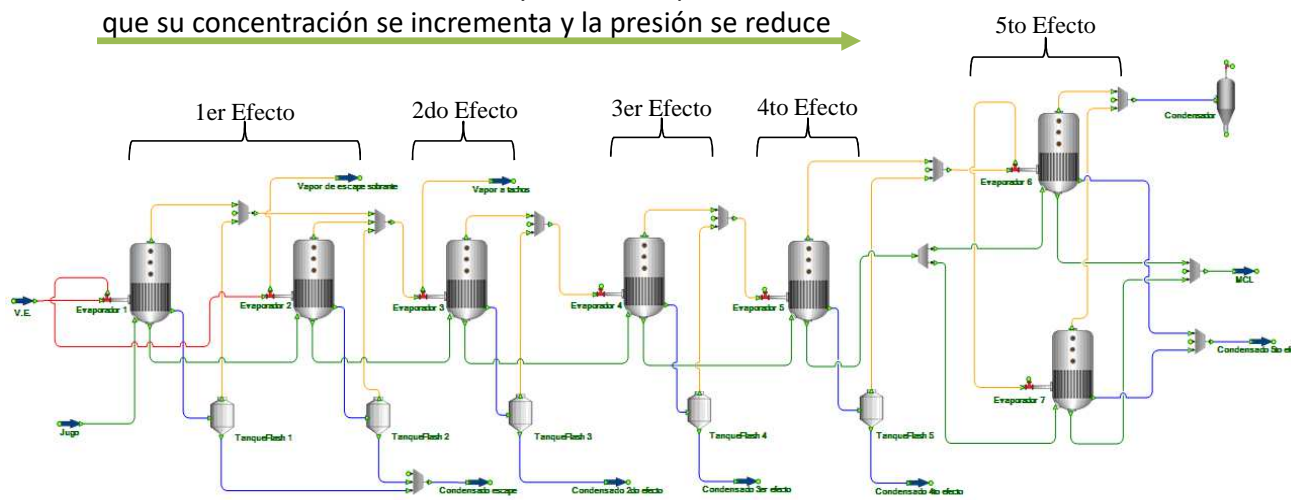


Condiciones NO deseadas en evaporación que favorecen la pérdida de sacarosa

Rutas de descomposición de la sacarosa:

- ✓ Inversión ácida (hasta pH 8.3)
- ✓ Azúcares reductores
- ✓ Ácidos orgánicos
- ✓ Sales
- ✓ Térmica

Condensados ácidos: ác. Acético y fórmico se presenta a medida que su concentración se incrementa y la presión se reduce



Pérdidas De Sacarosa

pH meladura ≥ 6.0
minimiza las pérdidas en tachos

Caídas de pH > 1
Temperatura $> 110 \pm 5^\circ\text{C}$
Relación S/G > 1
Tiempos de residencia altos

Variación del nivel nominal
Variación del flujo de vapor escape
Variación en la temperatura del evaporador
Falta de área de intercambio de calor

Estrategias para reducir las pérdidas de sacarosa por arrastres

Salpicaduras del líquido en ebullición

Asegurando espacio suficiente por encima del nivel del líquido (por lo menos el doble de la altura de los tubos de la calandria)

Arrastres debidos a la formación de espumas, frecuentemente asociadas con los arranques o paradas o condiciones de operación inestables.

Problemas operacionales, incluyendo cambios súbitos de presión, niveles del líquido demasiado elevados o demasiado bajos, bloqueo de las tuberías de retorno de arrastres recolectados, o remoción errática de condensado que causa fluctuaciones en la tasa de evaporación.

Asegurar operación estable (flujo de jugo y presión de vapor de escape principalmente)



Estrategias para reducir las pérdidas de sacarosa por arrastres

Arrastre de pequeñas gotas (diámetro entre 1 y 100 μm) cuya velocidad terminal se encuentra por debajo de la velocidad de la corriente de vapor producida



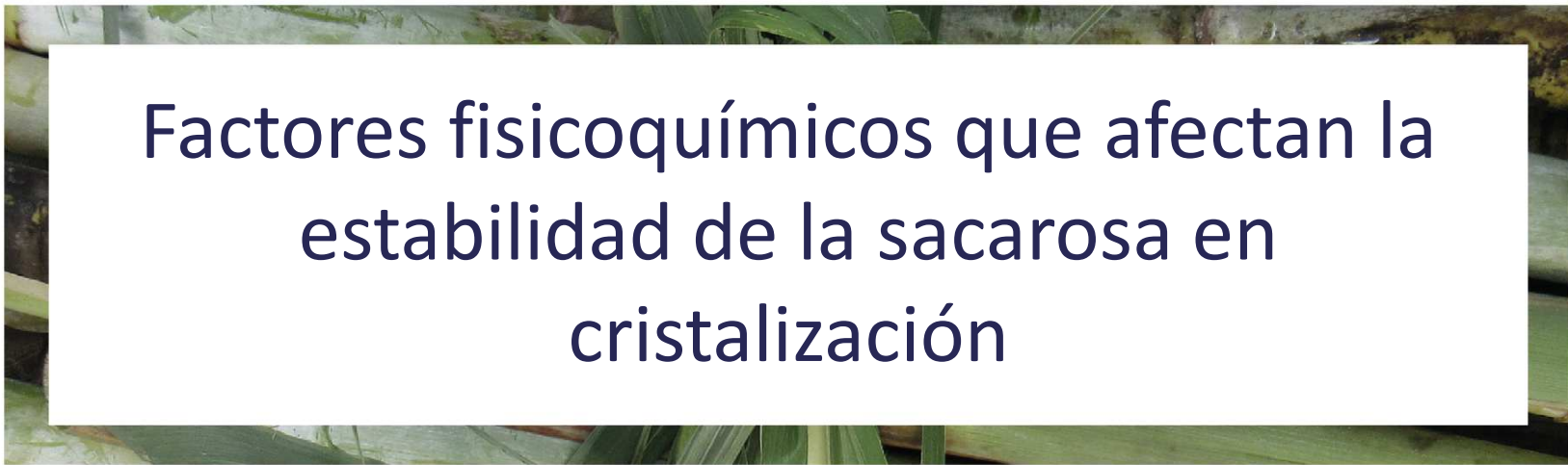
Instalación de separadores de arrastres.

Revisar y limpiar separadores de arrastre cada vez que haya paro para limpieza de evaporadores

Evitar la operación de evaporadores por encima de su capacidad límite de operación (30 $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$ para Kestner en primer efecto y 25 $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$ para Roberts)

Evitar velocidad de jugo en los tubos de los evaporadores por encima de 2 cm/s





Factores fisicoquímicos que afectan la estabilidad de la sacarosa en cristalización



Cocimientos

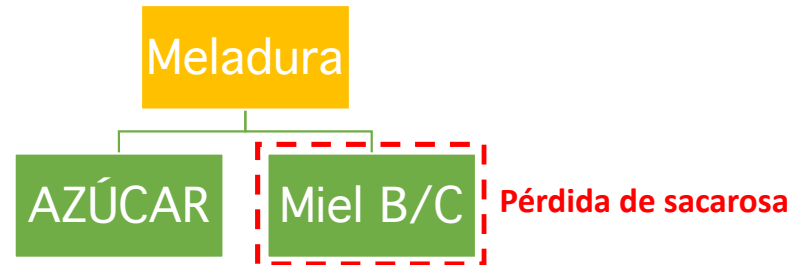
OBJETIVO: Recuperar la mayor cantidad de sacarosa en forma de cristales (azúcar) con la calidad requerida.

Pureza Azúcar > 99.8%
Color Azúcar = requerido por cliente
Pureza Miel final < 30%



Tiempo de residencia

- **Tachos A** = 2h30min - 3h30min
- **Tachos B** = 3h30min - 4h30min
- **Tacho C** = 4h30min - 6h



Estrategias para reducir pérdidas de sacarosa en miel final

Minimizar la aparición de grano fino

Sistemas de preparación de mieles.

Condiciones de operación estables (vacío)

Control de brix durante cocimiento

Regulación de la presión de vapor en calandria

Buena circulación de la masa en el tacho (circuladores mecánicos en tachos batch especialmente).



Estrategias para reducir pérdidas de sacarosa en miel final

Reducir el CV del tamaño de los cristales



Contar con un sistema adecuado de preparación de semilla

Asegurar la estabilidad del vacío y de la presión de vapor en calandria

Asegurar el desendulce completo del tacho después de descargar la templa



Estrategias para reducir pérdidas de sacarosa en miel final

Aseguramiento del purgado de las masas (centrifugas)



Verificar el buen estado de las mallas de las centrifugas

Ajustar tiempos de lavado para reducir la dilución de cristales

Verificar el buen estado de la cuchilla y el recorrido del raspador

Asegurar que la temperatura de la masa C esté alrededor de 55°C (Reheater)



Estrategias para reducir pérdidas de sacarosa en miel final

Prácticas operativas en cocimientos



Apropiada pureza y alimentación de la semilla

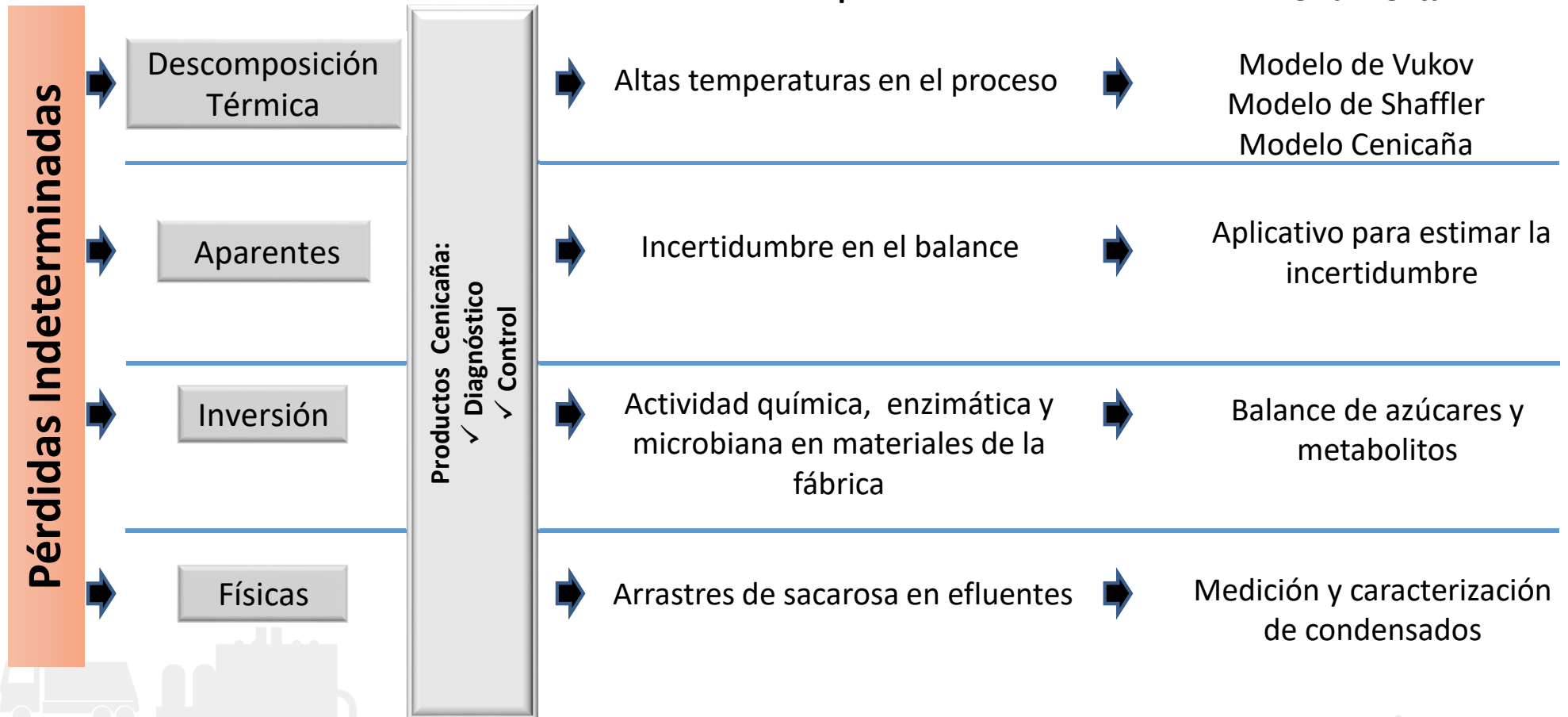
CV apropiado (30%) de la semilla

Tanques de preparación de mieles

Templas trabajadas con alimentación controlada para disminuir la variación de Brix



Herramientas diagnósticas para cuantificación de Pérdidas Indeterminadas



GRACIAS

“Haciendo ciencia para el progreso y la sostenibilidad”

