



Secretaría de Estado de Industria
y Comercio (SEIC)

Colegio Dominicano de Ingenieros
Arquitectos y Agrimensores (CODIA)



Instituto de Desarrollo Comunitario
y Ambiental "La Esperanza, Inc."
(IDECAE)

Diplomado Práctico en Energías Alternativas

(Electricidad — Eficiencia Energética – Energía Solar – Energía Eólica – Biocombustibles)

Modulo de Biocombustibles.

ETANOL COMO COMBUSTIBLE.

Producción de etanol.
Hidrólisis de bagazo,
proceso organosolv.
Nuevos productos a
partir de la caña de
azúcar en Brasil



ETANOL COMO COMBUSTIBLE.

JOSE P. NUÑEZ LIZ

Ingeniero Químico. UASD
Especialista en Ingeniería Azucarera y Alcoholera,
COPERSUCAR, SP. Brasil
Encargado de Biocombustibles-Proyecto Etanol
Secretaría de Estado de Industria y Comercio (SEIC)
Santo Domingo.- República Dominicana
Fone (809) 685-5171, Ext. 343

e-mail: jose.nunez@seic.gov.do

ETANOL COMO COMBUSTIBLE.

Protocolo de Kyoto

Reducción de las emisiones de gases en un 5% por debajo del 1990 hasta 2008-2012, por los países industrializados.

- Reducción de sus emisiones en nivel doméstico.
- Reducción a través de "mecanismos flexibles" (Comercio de Emisiones, el Mecanismo de Desarrollo Limpio y la Implantación Conjunta).

El Protocolo de Kyoto no impone nuevos compromisos para los países en desarrollo más que aquellos establecidos en la Convención sobre el Clima de las Naciones Unidas, de 1992.



ETANOL COMO COMBUSTIBLE.

- Oportunidad para el Sector Sucroalcoholero se afirmar como productor de etanol, energía y otros productos a partir de materias primas agrícolas de origen renovable, operando dentro de un *ciclo verde*.
- Secuestro efectivo del CO₂ (Macedo et al).
- Balance entre energía utilizada en la agroindustria y la producida es netamente positivo (Macedo et al).

ETANOL COMO COMBUSTIBLE.

Secuestro de dióxido de carbono (según Macedo et al)

- Computando las emisiones efectuadas en el ciclo de producción de etanol a partir de la caña de azúcar y las evitadas a través del etanol carburante y el bagazo substitutivos de combustibles de origen fósil, se llega a un secuestro efectivo de CO₂.

Emisiones netas evitadas:

En la producción de AEAC: 0.221 Ton CO₂ equiv./ TC

En la producción de AEHC: 0.147 Ton CO₂ equiv./ TC

Etanol Anhidro (AEAC) 2,6 a 2,7 Ton CO₂ equiv./ m³
etanol

Etanol hidratado (AEHC) 1,8 a 1,9 Ton CO₂ equiv./ m³
etanol

ETANOL COMO COMBUSTIBLE.

	Consumida	Producida
Agricultura	201.80	
Industria	49.40	
Etanol producido		1921.30
Bagazo excedente		168.70 (MJoule/TC)
Totales	251.20	2090.00 (7300 MJ están disponibles en la caña cosechada)
Producción/Consumo		8.3

Balance energético (agricultura e industria)



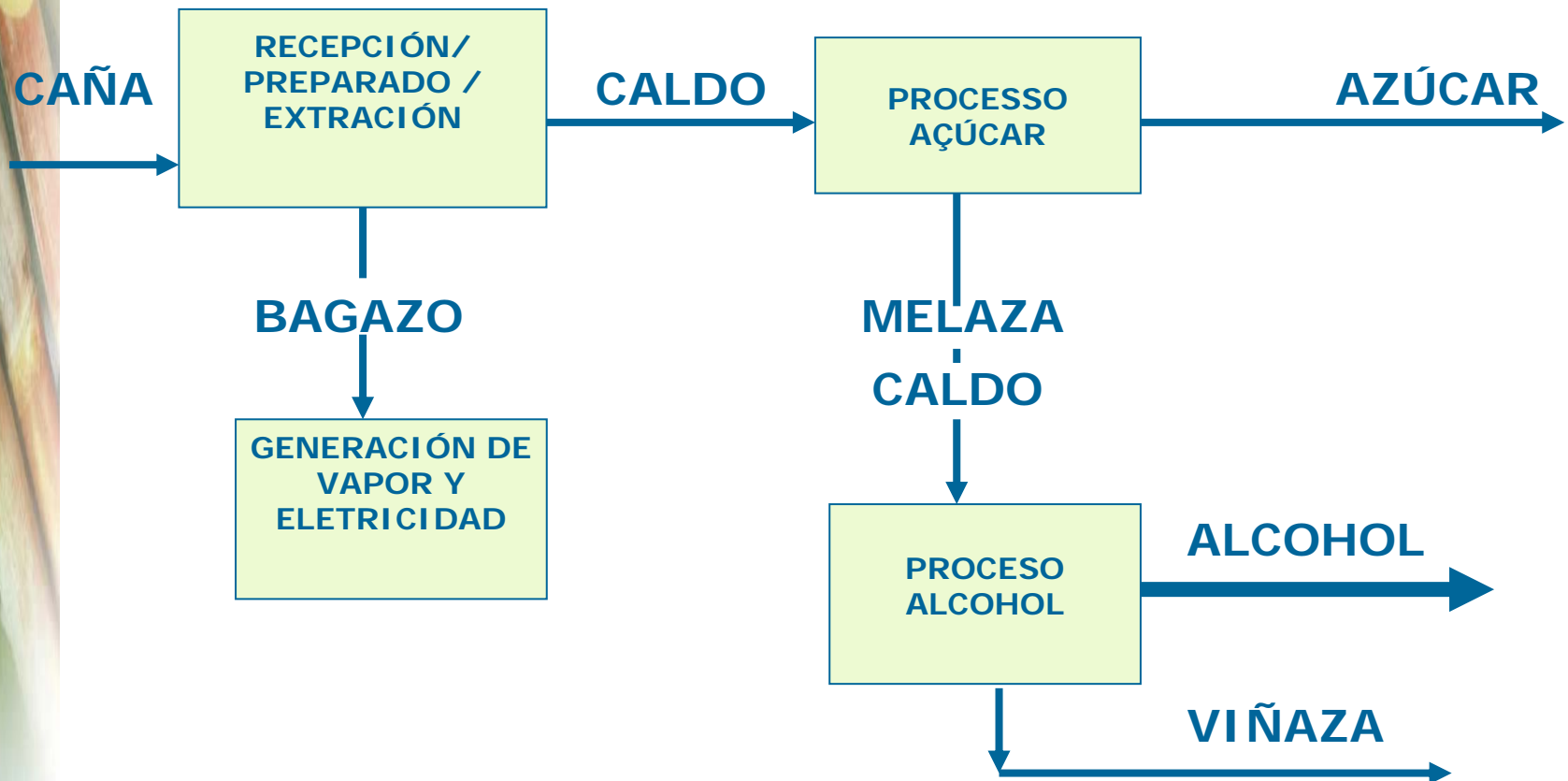
ETANOL COMO COMBUSTIBLE.

Expectativa de evolución

- Etapa actual: Usina con destilería anexa para producción de azúcar y etanol con autosuficiencia energética.
- Próxima etapa: Producción máxima de etanol, generación de excedentes de energía con aprovechamiento máximo do bagazo y residuos de caña;
- Etapa futura: Biorefinería que produce, azúcar, etanol, energía e nuevos productos a partir da caña

ETANOL COMO COMBUSTIBLE.

PRODUCCIÓN DE AZÚCAR Y ALCOHOL.





ETANOL COMO COMBUSTIBLE.

- **Azúcar: 12-18%**
- **Fibra: 12-14% (sin computar los residuos de la cosecha)**
- **Cera 0,1-0,3%**
- **Cenizas: 2-3%**

Composición de la Caña de Azúcar despues de la cosecha

ETANOL COMO COMBUSTIBLE.

Conversión de la sacarosa de la caña

Usina de azúcar

- Azúcar: 120 kg/TC
- Etanol do melaza: 7 l/TC

Azúcar / Etanol (50/50) (Usina con Destilería anexa)

- Azúcar: 67 kg/TC
- Etanol: 42 l/TC

Etanol (Destilería Autónoma)

- Etanol: 85 l/TC



Tecnología para producción de etanol

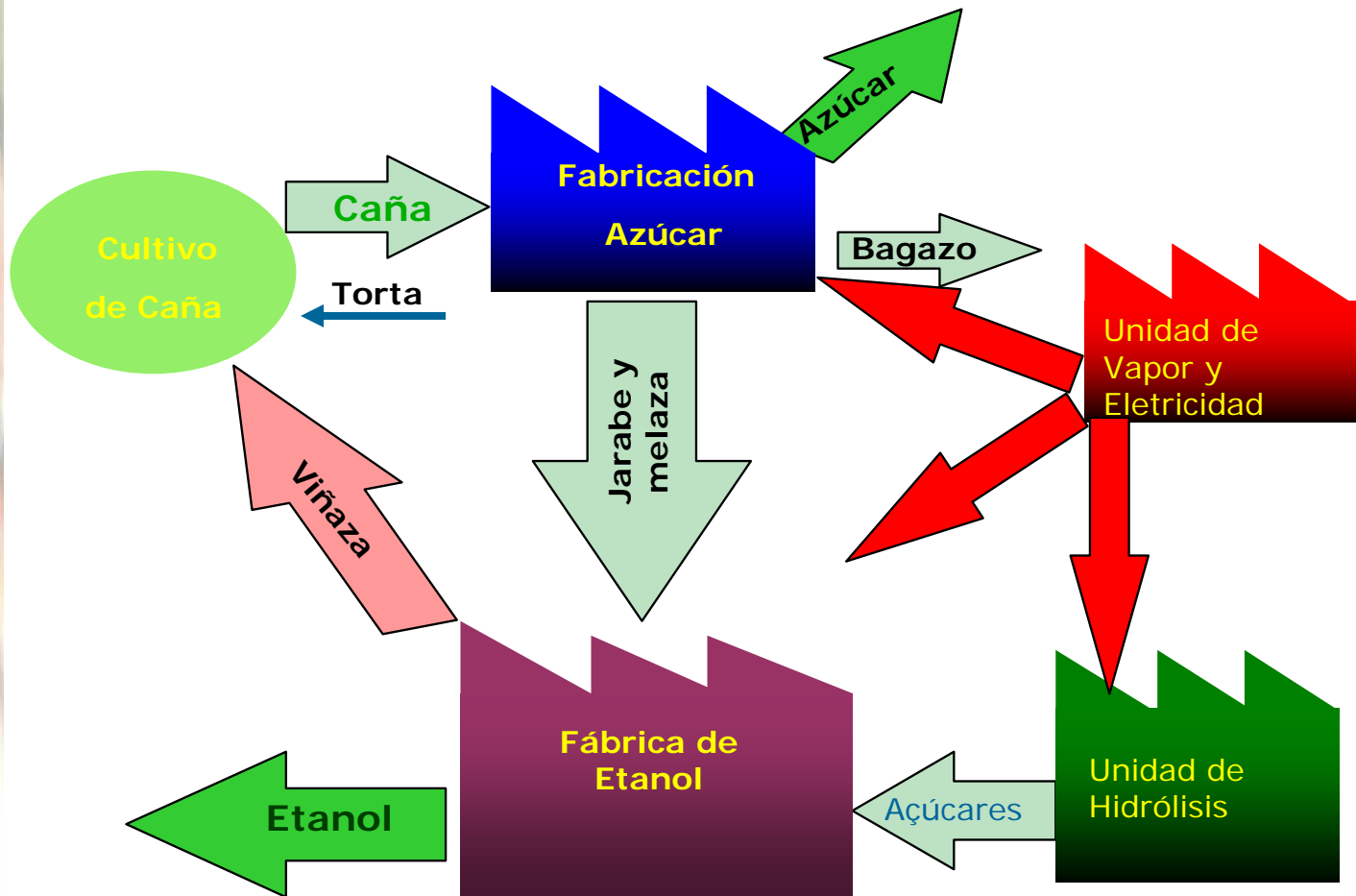
Fermentación alcohólica:

- ✓ Discontinua alimentada con reactivación y reciclaje del fermento (80% de la producción).
- ✓ Continua en etapas con reactivación y reciclaje del fermento (20% de la producción).

Parámetros característicos:

- ✓ Producción media de etanol : 400-500 m³/día;
- ✓ Tenor de etanol final: 8,-9,5 °GL;
- ✓ Concentración de fermento : 10-12% (v/v);
- ✓ Tiempo de fermentación: 8-11 horas;
- ✓ Rendimiento (estequiométrico): 89-91%;
- ✓ Temperatura de fermentación: 34-36°C;
- ✓ Productividad: 0,15-0,17 m³ etanol/m³/día

BI OREFINERÍA.





Hidrólisis de Bagazo

- Una alternativa para aumentar la producción de etanol, sin aumento del área plantada.
 - La tecnología convencional de producción de etanol está próxima de sus límites.
- Posibilidad de usar materias primas de costo bajo
- Integración con las instalaciones existentes en las destilerías.
 - Potencial para producir etanol con costo menor que el actual.
 - Aprovechamiento futuro de los residuos de la cosecha de caña.

Hidrólisis de Bagazo

LA HIDRÓLISIS PUEDE SER REALIZADA EMPLEANDO DIVERSOS MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS

EXIGENCIAS PARA LAS MATERIAS PRIMAS



DISPONIBILIDAD
BAJO COSTO

EN BRASIL LA MATERIA PRIMA MAS APROPIADA ES EL BAGAZO DE CAÑA (FUTURAMENTE SERÁ LA PAJA)



NO REQUIERE PREPARACIÓN
ESTA DISPONIBLE EN GRANDES VOLUMENES
SU CUSTO ES COMPARATIVAMENTE MENOR
ESTANDO DISPONIBLE EN EL LOCAL NO ENVUELVE COSTOS ADICIONALES DE TRANSPORTE

COMPOSICIÓN DEL
BAGAZO DE CAÑA



CELULOSA
HEMICELULOSA
LIGNINA

COMPOSICIÓN DEL BAGAZO

LIGNOCELULÓSICOS	45%
SÓLIDOS INSOLUBLES	2-3%
SÓLIDOS SOLUBLES	2-3%
HUMEDAD	50%

	BAGAZO INTEGRAL	FIBRA	MÉDULA
CELULOSA %	46,6	47,7	41,2
HEMICELULOSA %	25,2	25,0	26,0
LIGNINA %	20,7	19,5	21,7

RESIDUOS DE COSECHA.

CELULOSA	45,1%
HEMICELULOSA	25,6%
LIGNINA	12,7%
OTRAS MATERIAS ORGÁNICAS	4,3%
CENIZAS	8,0%
HUMEDAD	9,7%

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS RESÍDUOS DE LA COSECHA DE
CAÑA (Paja)



Barreras a la Hidrólisis

Las reacciones de hidrólisis son heterogéneas, el tamaño de la partícula debe ser controlado.

La celulosa presenta una estructura fuertemente cristalina y está protegida por la lignina e hemicelulosa, dificultando la despolimerización.

Durante la hidrólisis ácida las condiciones para el desdoblamiento de la celulosa a glucosa son semejantes a las de la descomposición de la glucosa (reacciones consecutivas).

La hidrólisis ácida de la hemicelulosa transcurre rápidamente en condiciones más blandas que para la celulosa. Las reacciones de descomposición de las pentosas acontecen simultáneamente.

Etapas de la hidrólisis para obtención de etanol

HIDRÓLISIS
(SACARIFICACIÓN)

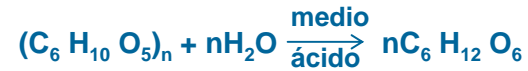
(+)

FERMENTACIÓN

(+)

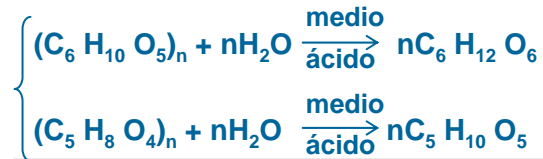
DESTILACIÓN

CELLULOSA



HEXOSA

HEMICELLULOSA



HEXOSA

PENTOSA

HEXOSAS



PENTOSAS

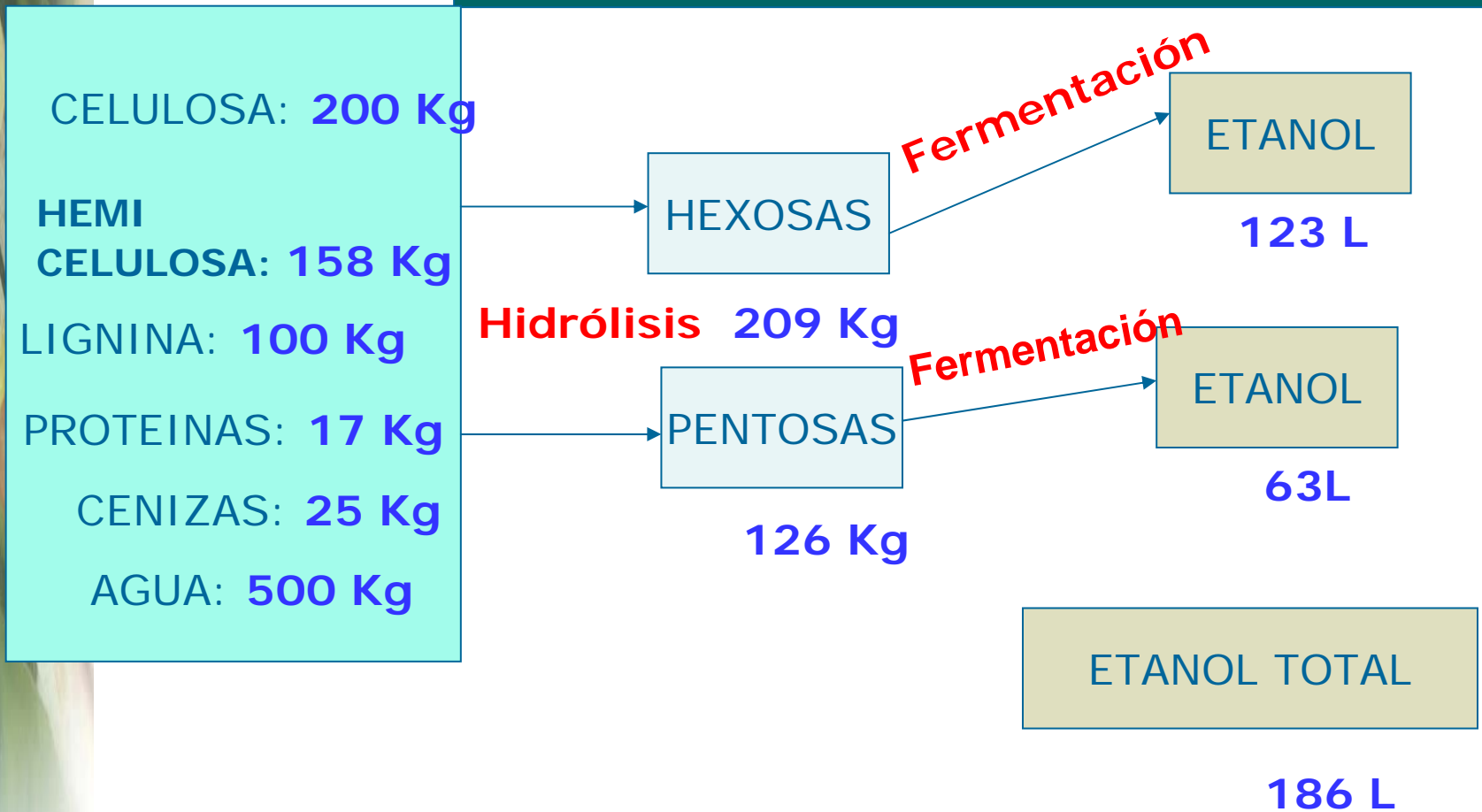


VINO

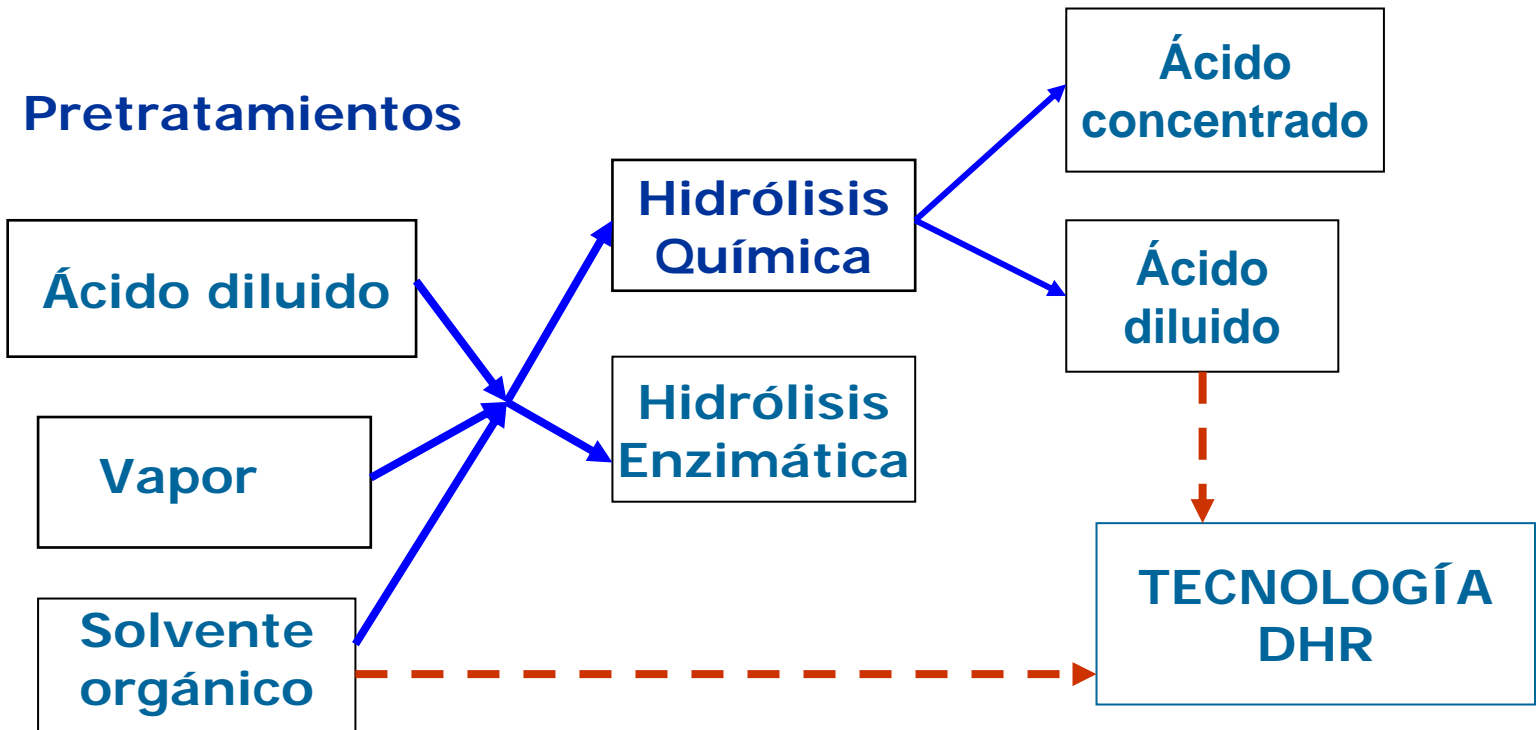
PROCESO
FÍSICO

$C_2 H_5 OH$
(+)
VIÑAZA

ESTEQUIOMETRÍA DE LA CONVERSIÓN DE 1 Ton BAGAZO A ETANOL



PROCESOS DE HIDRÓLISIS



Proceso DHR

- Proceso para hidrólisis de bagazo que combina pretratamiento organosolv e hidrólisis con ácidos diluidos;
- Características: disolución total del bagazo, reacción rápida en un único reactor a presión de 20-25 Bar e 180-200 °C;
- Etapa actual: testado en laboratorio y bancada por varios años, actualmente en teste en una unidad piloto y de demostración que trata 1 tonelada de biomasa seca por hora para producción de 5000 litros por día de etanol;
- En la etapa actual el proceso está previsto para aprovechar únicamente las hexosas y operar anexo a destilería, realizando la fermentación alcohólica en un mosto formulado con caldo, jarabe o melaza y licor hidrolítico proveniente del DHR.
- Ventajas: licor hidrolítico comparativamente más concentrado, alta tasa de conversión del celulósico, formación de inhibidores controlada, flexibilidad para integración con tecnologías futuras (hidrólisis enzimática)

Bases del proceso DHR

- Empleando un solvente fuerte a elevada temperatura para extracción de la lignina del complejo lignocelulósico, se consigue realizar el ataque químico de la celulosa y hemicelulosa.
- Se alcanza una alta tasa de formación de azúcares (tiempo de reacción del orden de minutos), elevando los rendimientos de conversión.
- En un medio de reacción con solvente aquo-orgánico la reacción de hidrólisis progresa con un mínimo de ácido mineral catalizador.
- El licor hidrolítico es retirado inmediatamente del reactor y enfriado para detener las reacciones de degradación de los azúcares.

Proceso Organosolv DHR

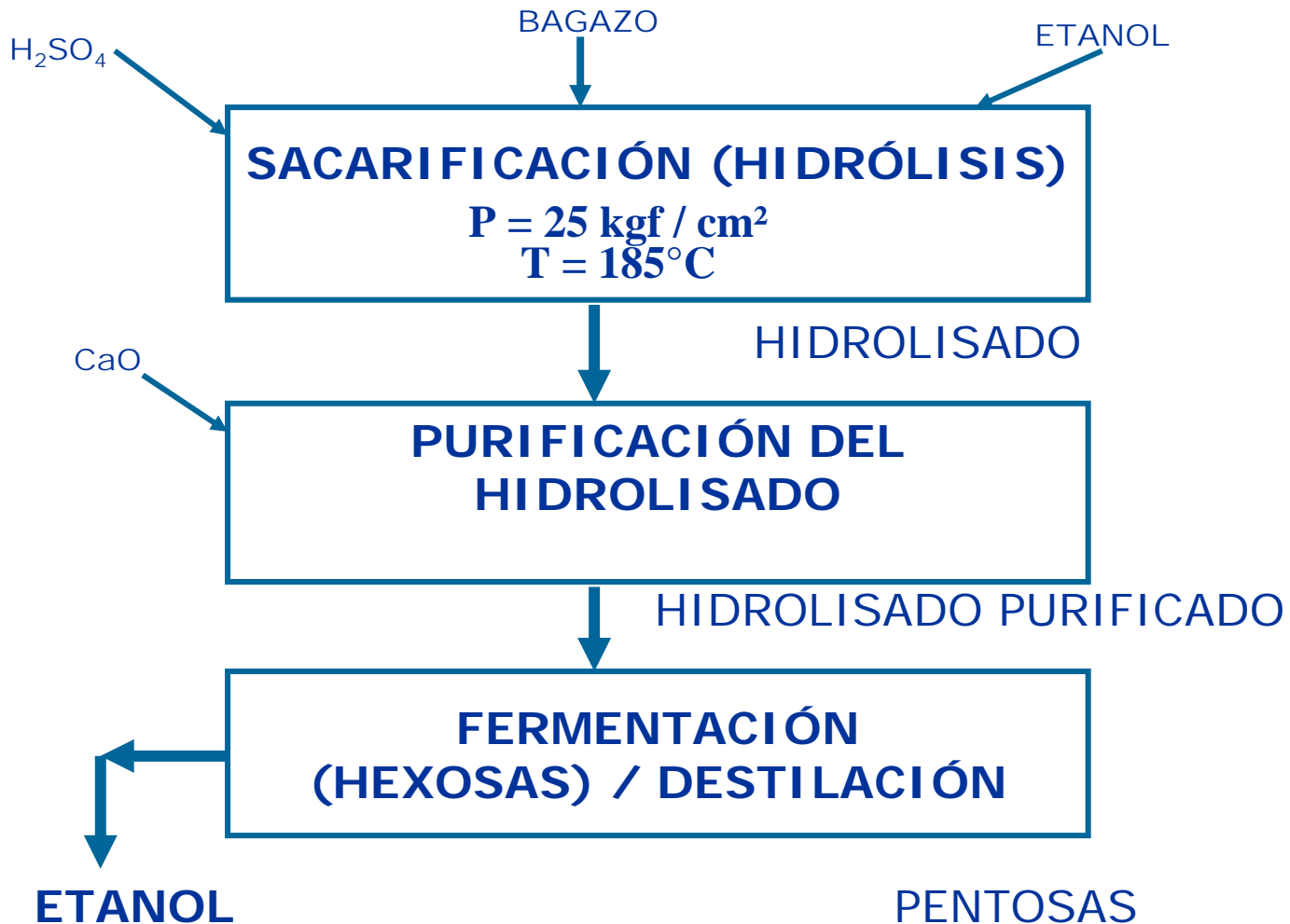
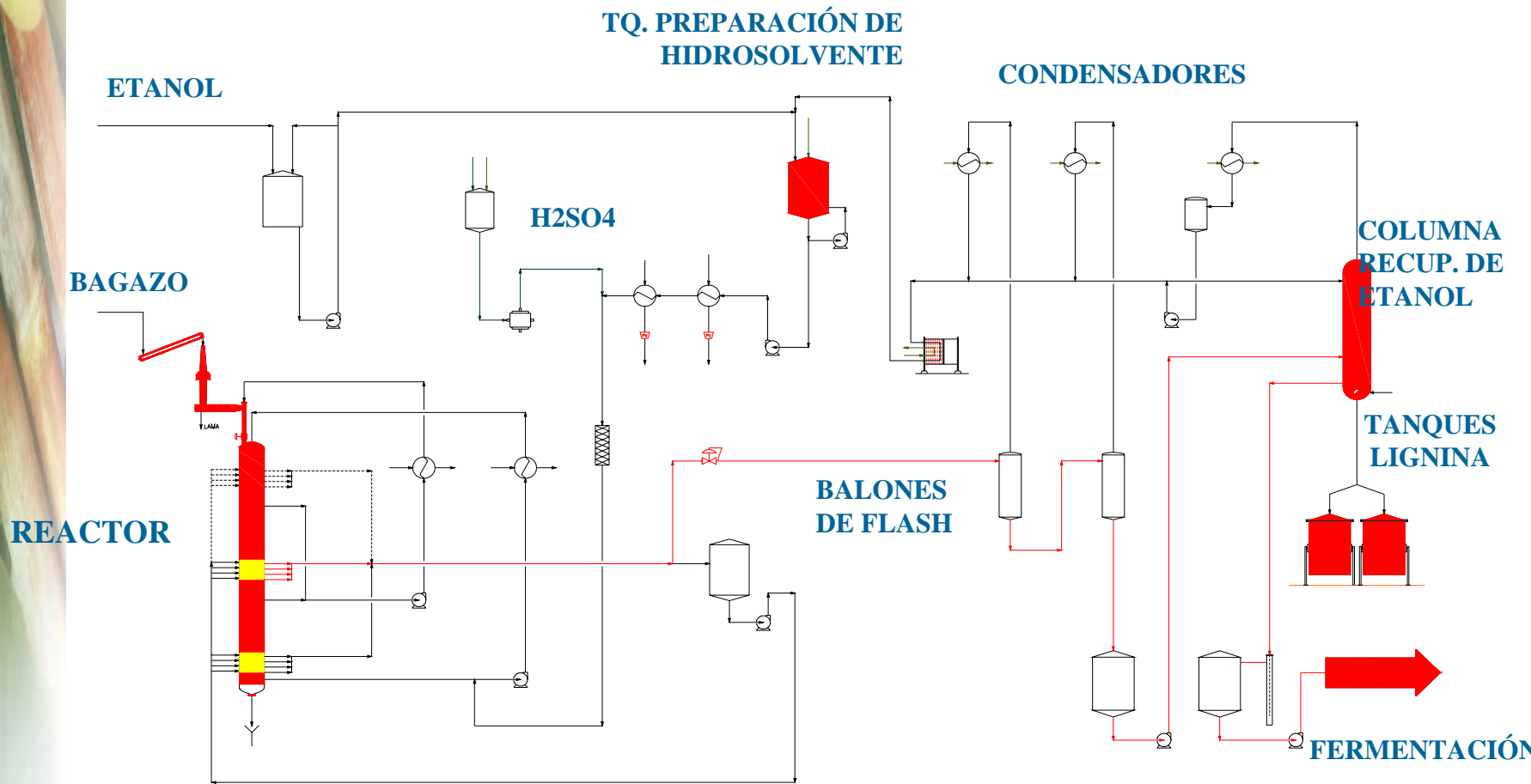


DIAGRAMA DEL PROCESO DHR





Fermentación del licor de hidrólisis

Principales inhibidores: furfural, hidroximetilfurfural, fenólicos solubles, ácidos orgánicos

Control de los inhibidores presentes en el licor

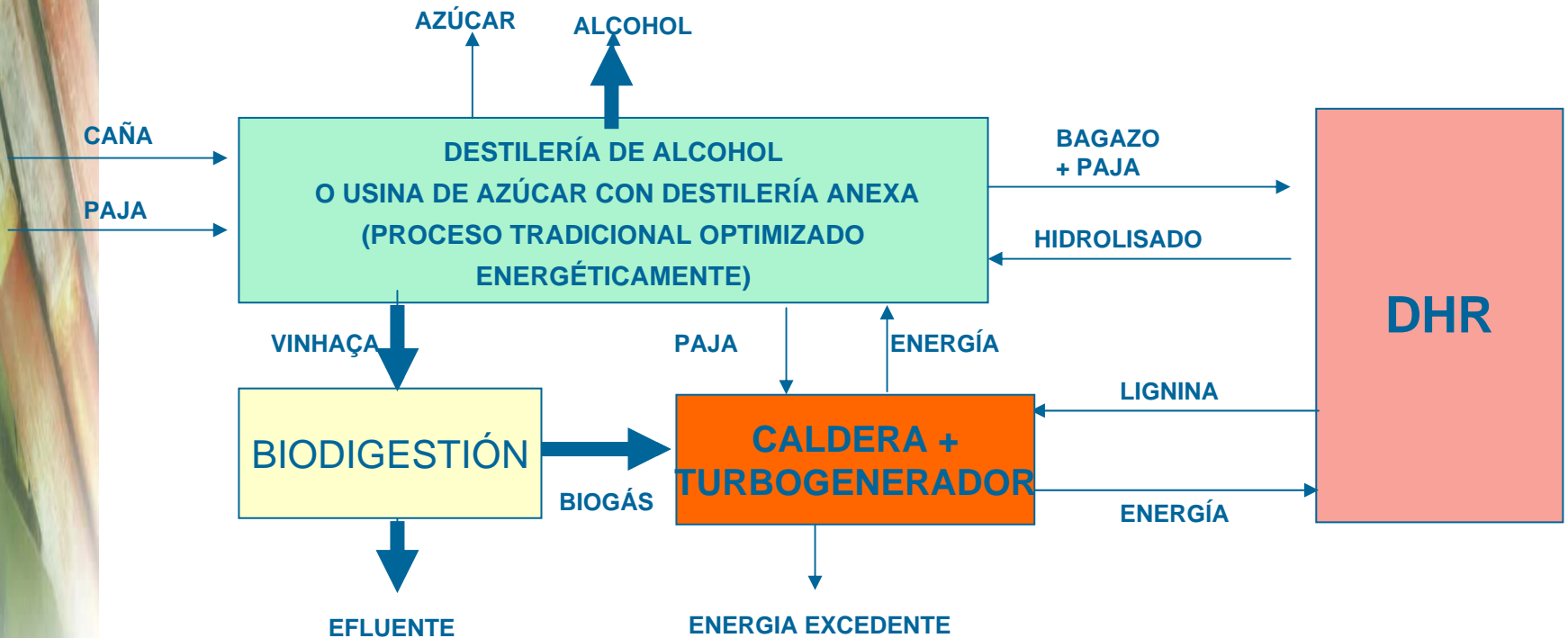
De inmediato:

Fermentación combinada de los mostos de caldo de caña y melaza y el licor hidrolítico, para diluir o impacto dos inhibidores.

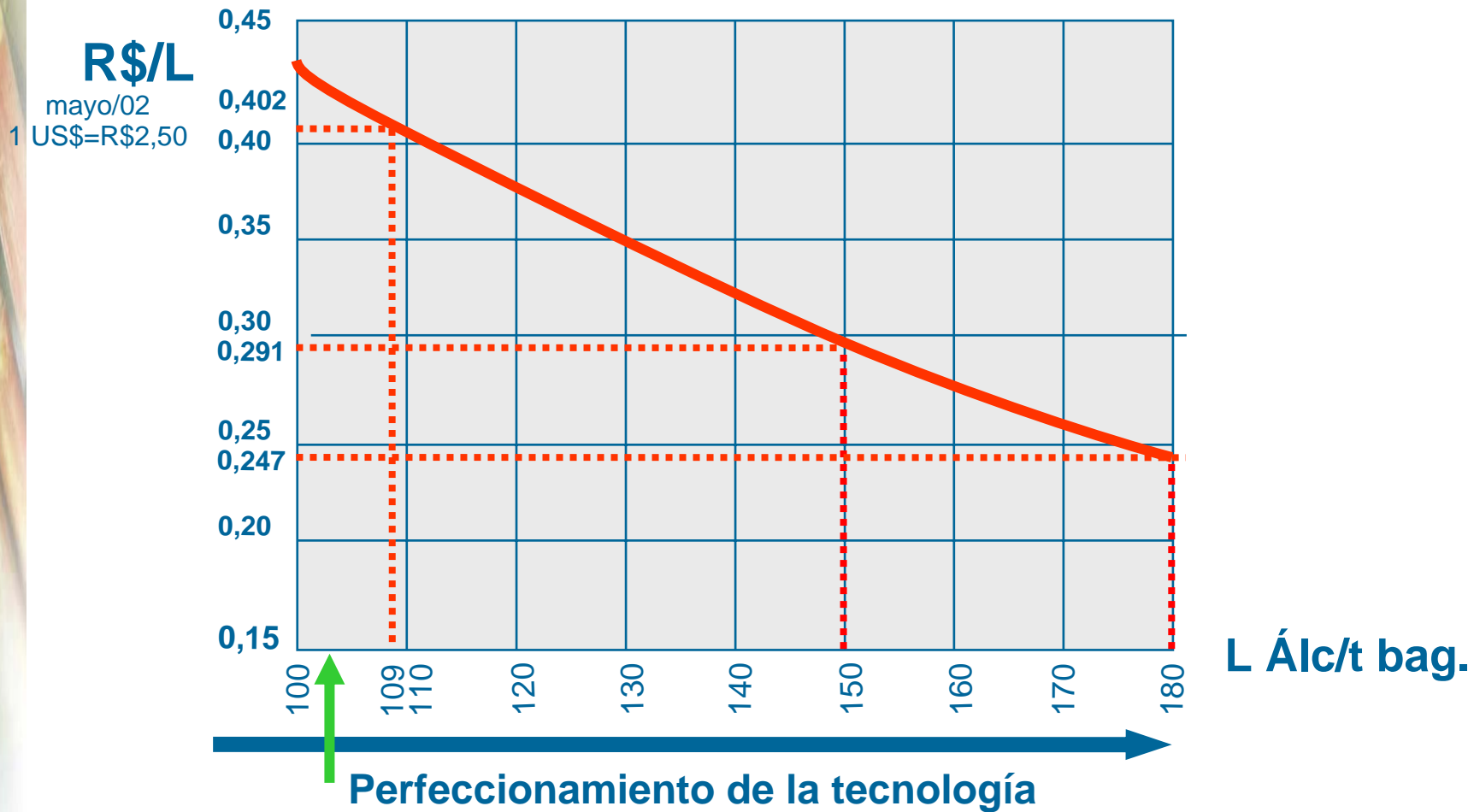
A medio plazo:

Retirada de los inhibidores: precipitación, extracción con solvente, adsorción con carbón activo, resinas iónicas.

INTEGRACIÓN DHR CON UNA USINA DE AZÚCAR O DESTILERÍA



COSTO HIDRÓLISIS DHR VERSUS TECNOLOGÍA



Impacto de la hidrólisis de bagazo en la producción de etanol

	litros de etanol por TC	litros de etanol/ha
2005- Situación actual. Producción de etanol solamente de azúcares extraídos de la caña.	85	6800
2006-2010- Introducción de la hidrólisis.	88,1	7050

Impacto de la hidrólisis de bagazo en la producción de etanol

I 2010-2015. Se emplea el bagazo excedente (15%) y se inicia la recuperación de los residuos de la cosecha(10%).	91,1	7290
II 2015-2020. Se emplea el bagazo excedente (30%) y residuos de la cosecha (20%).	97,3	7780
III 2020. Se emplea el bagazo excedente (50%) y residuos de la cosecha (50%).	104,1	8330



Expectativas de la Hidrólisis

- Un aumento expresivo de la producción de etanol sin aumentar el área de plantío;
- La hidrólisis de lignocelulósicos no alcanzó todavía viabilidad técnica y económica;
- El suceso para alcanzar un proceso comercial está vinculado a mejorar: pretratamientos, optimizar la reacción de hidrólisis ácida o enzimática.
- Desarrollar complejos enzimáticos eficientes e de bajo costo.
- Los procesos deben ser rigurosos en lo que respecta a agresión al medio ambiente.



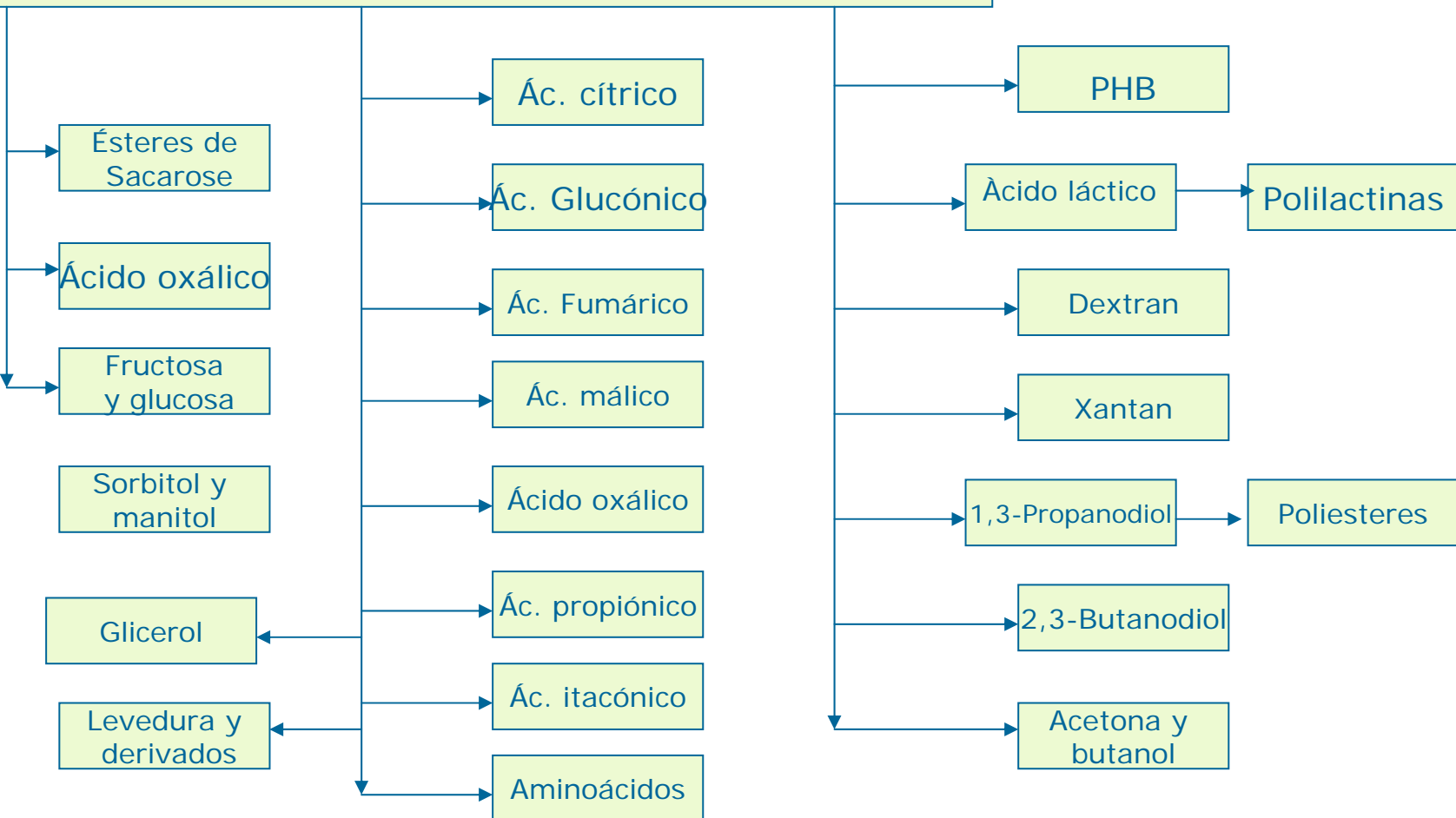
Otros Productos a partir de la caña de azúcar

La Usina de azúcar como complejo industrial para producción de nuevos productos

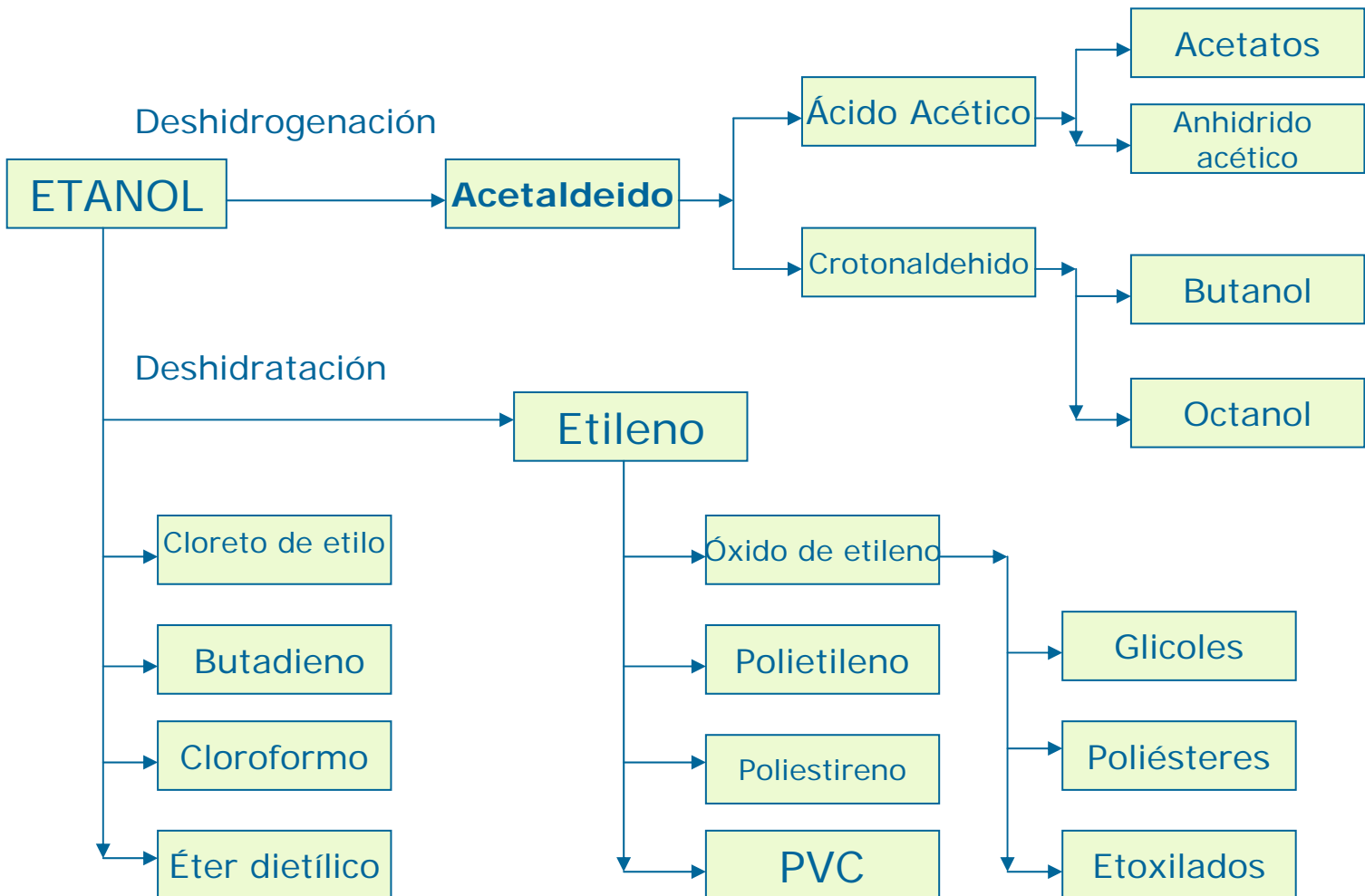
- Materias primas para la producción de nuevos productos : azúcar, alcohol, jarabe, melaza, bagazo, levadura seca, aceite de fusel, torta de filtro, dióxido de carbono, viñaza;
- Energía térmica: vapor de baja presión (1,5-1,7 Kg/cm²) y alta presión (20, 40, 60 Kg/cm²);
- Energía eléctrica e mecánica proveniente de vapor de alta presión (20, 40, 60 Kg/cm²);

Sucroquímica

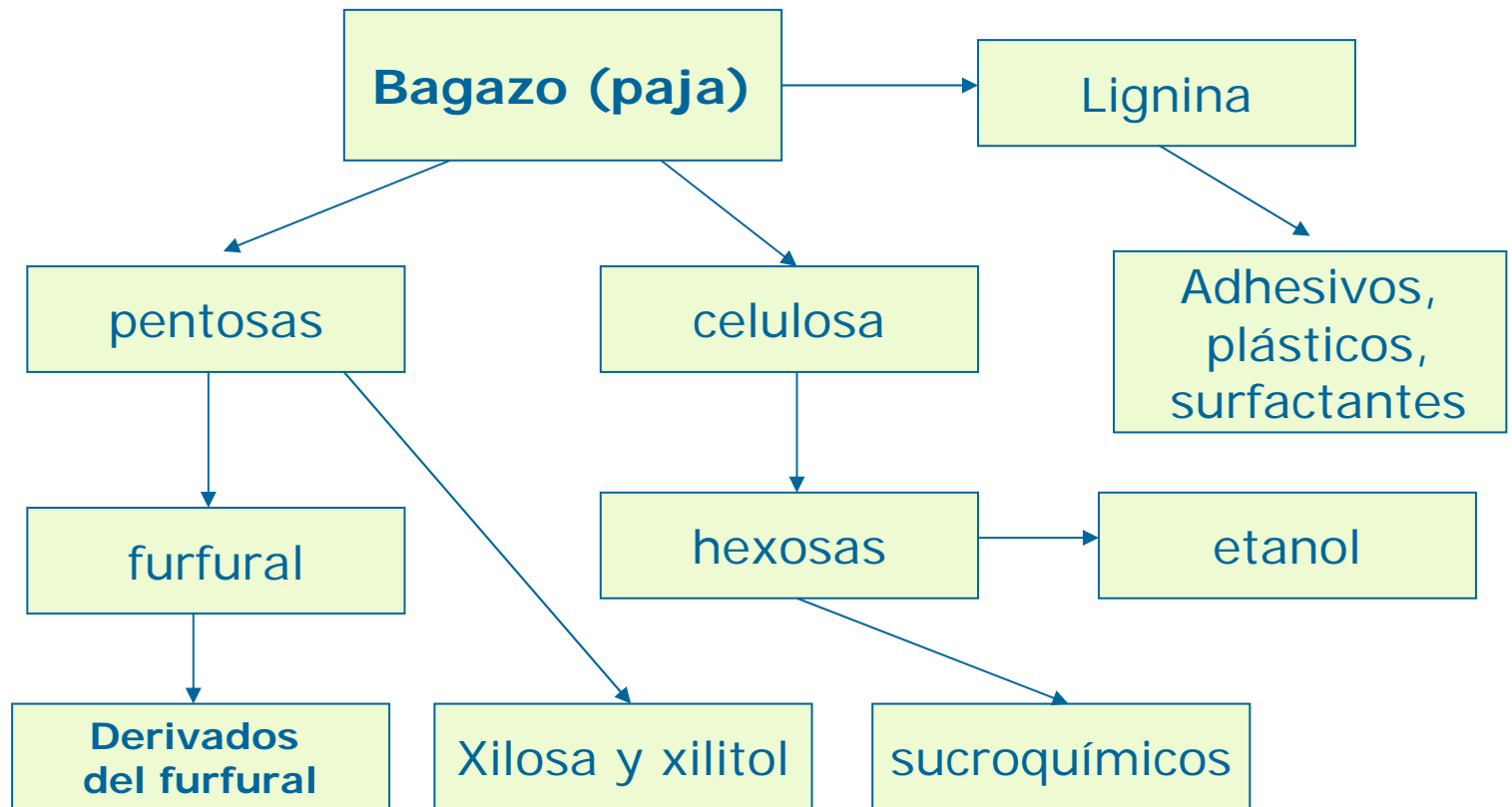
Azúcar, jarabe, melaza, (hexosas de bagaso)



ALCOHOLQUÍMICA



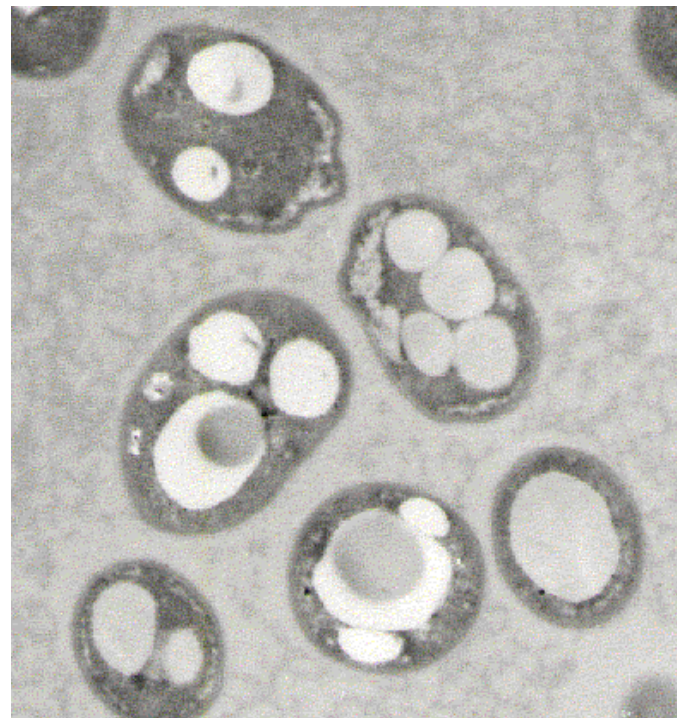
Química del bagazo



Obtención de PHB

Azúcar:	3,0 kg/kg of PHB
Biomasa rendimiento (base seca):	150kg/m³ de vino de fermentación
Fracción de PHB en biomasa	75%
Tiempo fermentación	de 60 horas
Rendimiento extracción	de Aprox. 95%
Consumo energía:	de 3,6 KWh/kg PHB (proveniente del bagazo)
Consumo vapor:	de 35 kg/kg de PHB (proveniente del bagazo)
Inversión:	U\$S 4000-6000 por ton de PHB/año

Fermentación de *Ralstonia Eutropha* paraproducción de PHB





Reducción de los impactos negativos al medio ambiente

- **Viñaza y torta de filtro:** son reciclados a la plantación para atender parte de las necesidades de fertilizantes;
- **Consumo de agua:** reducido a 3 m³/TC e con una meta futura de menos de 1 m³/TC;
- **Quema de cana** : Cronograma de reducción gradual hasta la eliminación de esta práctica;
- **Pesticidas** : substituidos por el control biológico de las plagas;
- **Herbicidas:** reducción del empleo de químicos por la cobertura con una camada de paja



Rutas para tratamiento de la viñaza

- **Recirculación en la fermentación: Biostil y otros (dificultades operacionales)**
- **Concentración por membranas (costo elevado)**
- **Concentración térmica (incrustaciones, consumo energético elevado)**
- **Biodigestión (tasa de conversión baja, inhibición por el sulfato)**
- **Precipitación de sales (generación de residuos sólidos)**
- **Combustión de la viñaza concentrada (costo elevado, fusión de las sales)**



CONCLUSIONES

- La agroindustria de la caña secuestra CO₂, contribuyendo para disminuir el aumento de la temperatura global.
- La resultante entre la energía empleada en la agroindustria y la recuperada en la producción de etanol y biomasa es positiva;
- El sector contribuye expresivamente con la oferta de combustible líquido de origen renovable.
- La optimización del empleo del bagazo como energético en la producción de etanol irá a generar excedentes de biomasa lignocelulósica con potencial para a producción de etanol e otros productos.
- La recuperación de los residuos de la cosecha irá a aumentar la disponibilidad de biomasa.
- Del aprovechamiento de la sacarosa contenida en la caña e el bagazo como energético se avanza en dirección a un aprovechamiento integral de la caña de azúcar.

CONCLUSIONES

- La hidrólisis de bagazo se torna una meta estratégica para aumentar la oferta de etanol por hectárea cultivada.
- Los procesos hidrolíticos no han alcanzado todavía viabilidad técnica y económica, siendo necesario perfeccionarlos.
- Los residuos de la Agroindustria irán a constituir una fuente importante de materias primas para la industria química, por tratarse de recursos renovables de origen agrícola que no aumentan la emisión de CO₂.
- El sector que está siendo impulsado para altas tasas de crecimiento de la producción, deberá continuar procurando prácticas operacionales que eviten impactos ambientales negativos.
- Deberá atender las metas previstas de abolición de la quema de caña.
- Deberán ser implantados procesos para reducción del volumen y tratamiento de la viñaza generada.