

# Biorrefinería de la Caña de Azúcar

Análisis integral de productos, subproductos, balances de masa y energía, y evaluación económica para ingenieros de procesos industriales

INGENIERÍA DE PROCESOS

BIORREFINERÍA

ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO



# Agenda

Esta presentación aborda de forma sistemática todos los aspectos clave de la biorrefinería de caña de azúcar, desde el concepto general hasta los detalles técnicos y económicos.

01

---

## Concepto de Biorrefinería

Definición, alcance y esquema general de procesamiento de caña de azúcar

02

---

## Productos y Subproductos

Azúcar, etanol, bagazo, melaza, cogeneración y bioproductos de alto valor

03

---

## Balances de Masa y Energía

Cálculos detallados y ejemplos numéricos por corriente de proceso

04

---

## Análisis Económico CAPEX/OPEX

Estructura de costes de inversión y operación con casos de estudio

05

---

## Casos de Estudio y Bibliografía

Ejemplos reales de Brasil, India y Colombia; referencias técnicas

# Concepto de Biorrefinería de Caña de Azúcar

Una **biorrefinería de caña de azúcar** integra múltiples procesos de conversión biológica, química y termoquímica para valorizar al máximo la biomasa disponible. A diferencia de un ingenio azucarero tradicional, el enfoque de biorrefinería busca la **valorización total de la materia prima**, minimizando residuos y maximizando el valor generado por tonelada de caña procesada.

La caña de azúcar es una de las materias primas más eficientes del planeta, con una productividad de **70–90 toneladas por hectárea y año** en condiciones tropicales óptimas, y una composición que permite múltiples vías de valorización.

 La biorrefinería de caña puede generar hasta **8–12 productos distintos** a partir de una sola materia prima, elevando el valor económico entre un 40–60% respecto al ingenio convencional.

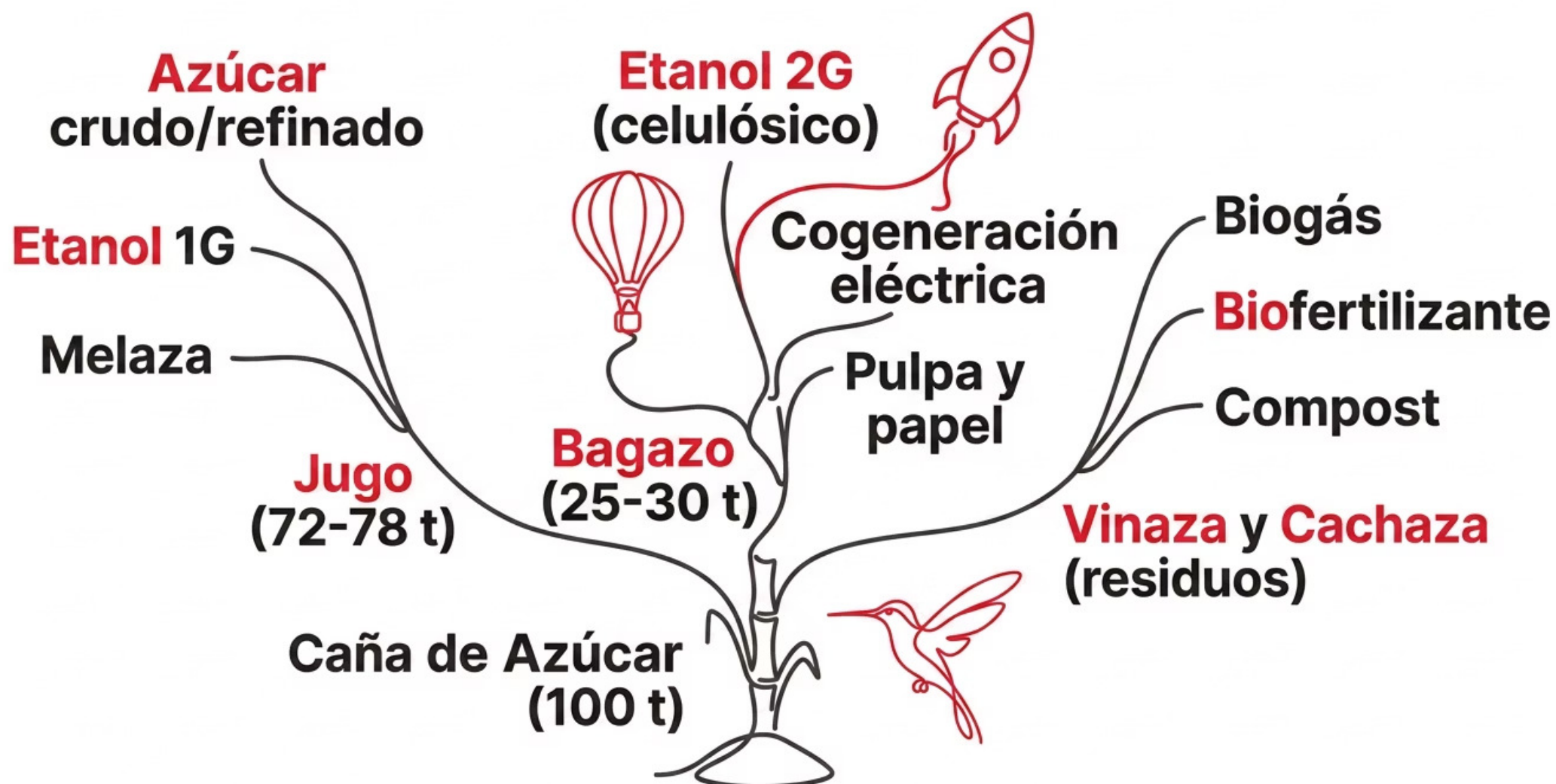
## Composición típica de la caña

| Componente          | % en peso fresco |
|---------------------|------------------|
| Agua                | 65–75%           |
| Sacarosa            | 12–16%           |
| Fibra (bagazo)      | 10–16%           |
| Azúcares reductores | 0,5–2%           |
| Cenizas y otros     | 0,5–1,5%         |

Valores típicos para variedades comerciales en condiciones tropicales. Fuente: FAO, 2022.

# Mapa de Productos y Subproductos

La caña de azúcar genera una cadena de valor compleja. A continuación se presenta el árbol de productos principales clasificados por corriente de proceso:



✓ **Productos primarios:** Azúcar blanco, azúcar crudo, etanol anhidro, etanol hidratado, energía eléctrica excedente

❑ **Subproductos valorizables:** Melaza, cachaza, vinaza concentrada, biogás, CO<sub>2</sub> fermentativo, levaduras de proceso

# Balance de Masa: Base de Cálculo 100 t de Caña

El siguiente balance de masa ilustra las corrientes principales para una biorrefinería integrada azúcar-etanol con cogeneración, con base en 100 toneladas métricas de caña fresca procesada.

## Corrientes de entrada y salida — Resumen

| Corriente               | Cantidad (t) | % caña                |
|-------------------------|--------------|-----------------------|
| Caña entrada            | 100,0        | 100%                  |
| Jugo mezclado           | 72,5         | 72,5%                 |
| Bagazo (50% humedad)    | 27,0         | 27,0%                 |
| Cachaza (torta)         | 3,2          | 3,2%                  |
| Azúcar producido        | 11,5         | 11,5%                 |
| Etanol 1G (hidratado)   | 4,8          | 4,8%                  |
| Melaza residual         | 2,6          | 2,6%                  |
| Vinaza (efluente)       | 38,4         | 38,4%                 |
| Vapor generado (bagazo) | —            | equiv. 280 kWh/t caña |

## Ejemplo de cálculo: Etanol 1G

**Dato:** Jugo con 14° Brix, extracción 96%, rendimiento fermentativo 88% de lo teórico.

Sacarosa en jugo =  $100 \times 0,725 \times 0,14$   
= 10,15 t sacarosa

Sacarosa fermentable =  $10,15 \times 0,96$   
= 9,74 t

Etanol teórico (Gay-Lussac):  
1 mol sacarosa → 4 mol etanol  
 $342 \text{ g} \rightarrow 4 \times 46 \text{ g} = 184 \text{ g}$   
 $\eta = 184/342 = 0,538 \text{ kg EtOH/kg sac.}$

Etanol teórico =  $9,74 \times 0,538 = 5,24 \text{ t}$   
Etanol real =  $5,24 \times 0,88 = 4,61 \text{ t}$   
Rendimiento =  $4,61 \text{ t} / 100 \text{ t caña}$   
 $\approx 46,1 \text{ L/t caña (a } 0,789 \text{ kg/L)}$

**i** Este rendimiento es consistente con valores industriales reportados de **42–50 L de etanol/t caña** (UNICA, 2023).

# Balance de Energía: Cogeneración con Bagazo

La cogeneración mediante combustión de bagazo es uno de los ejes más importantes de la biorrefinería, permitiendo la autosuficiencia energética y la exportación de excedentes a la red eléctrica.

## Ejemplo de cálculo energético

Base: 100 t caña → 27 t bagazo

Humedad bagazo = 50% → MS = 13,5 t

PCI bagazo seco ≈ 18,5 GJ/t MS

Energía bruta disponible:

$= 13,5 \times 18,5 = 249,75 \text{ GJ}$

Eficiencia caldera (presión alta):

$\eta_{\text{caldera}} = 85\%$

Vapor generado:

$= 249,75 \times 0,85 = 212,3 \text{ GJ}$

$\rightarrow \approx 75 \text{ t vapor a } 65 \text{ bar} / 480^{\circ}\text{C}$

Energía eléctrica (turbina condensación):

Ciclo Rankine  $\eta_{\text{ciclo}} \approx 28\%$

$E_{\text{elec}} = 212,3 \times 0,28 = 59,4 \text{ GJ}$

$= 16,5 \text{ MWh} / 100 \text{ t caña}$

$= 165 \text{ kWh/t caña}$

Consumo propio fábrica ≈ 70–80 kWh/t

Excedente exportable ≈ 85–95 kWh/t

## Indicadores energéticos por tonelada de caña

249 GJ

Energía bruta bagazo

Base 100 t caña procesada

165 kWh

Electricidad generada

Por tonelada de caña

85 kWh

Excedente exportable

Por tonelada a la red

8,5

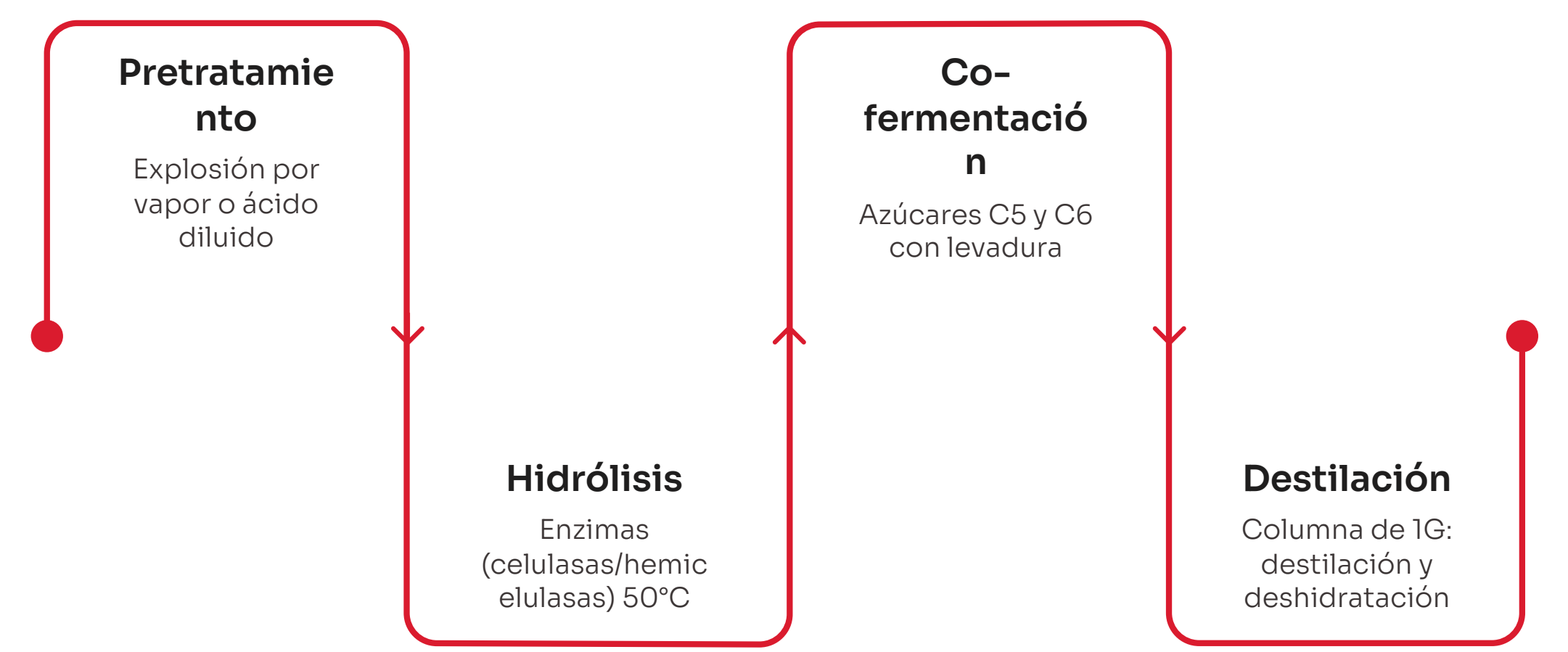
Ratio energético

Energía salida / energía fósil entrada

✔ Con calderas de alta presión (80–120 bar), plantas modernas en Brasil alcanzan **120–140 kWh de excedente** por tonelada de caña procesada (BNDES/CGEE, 2021).

# Etanol de Segunda Generación (2G): Hidrólisis de Bagazo

La incorporación de etanol celulósico (2G) mediante la hidrólisis enzimática del bagazo representa la frontera tecnológica de la biorrefinería de caña. Incrementa el rendimiento en etanol hasta un **30–40% adicional** sin aumentar el área cultivada.



## Balance másico 2G (base 27 t bagazo)

| Fracción      | % en bagazo | t disponible |
|---------------|-------------|--------------|
| Celulosa      | 38–42%      | 10,5         |
| Hemicelulosa  | 28–32%      | 8,1          |
| Lignina       | 20–24%      | 5,9          |
| Cenizas/otros | 4–6%        | 1,5          |

Etanol 2G potencial: **~80–100 L/t bagazo seco**, es decir, ~9–11 L adicionales por tonelada de caña.

**⚠ Reto técnico clave:** La fracción de lignina no es fermentable y debe valorizarse por combustión (energía) o como precursor de materiales avanzados (lignina técnica, resinas). La integración 1G+2G requiere un balance energético cuidadoso.

**📍 Planta de referencia:** GranBio (Alagoas, Brasil, 2014) — primera planta 2G comercial de América Latina: 82 ML/año de capacidad diseñada, procesando 270 t/día de bagazo y paja de caña.

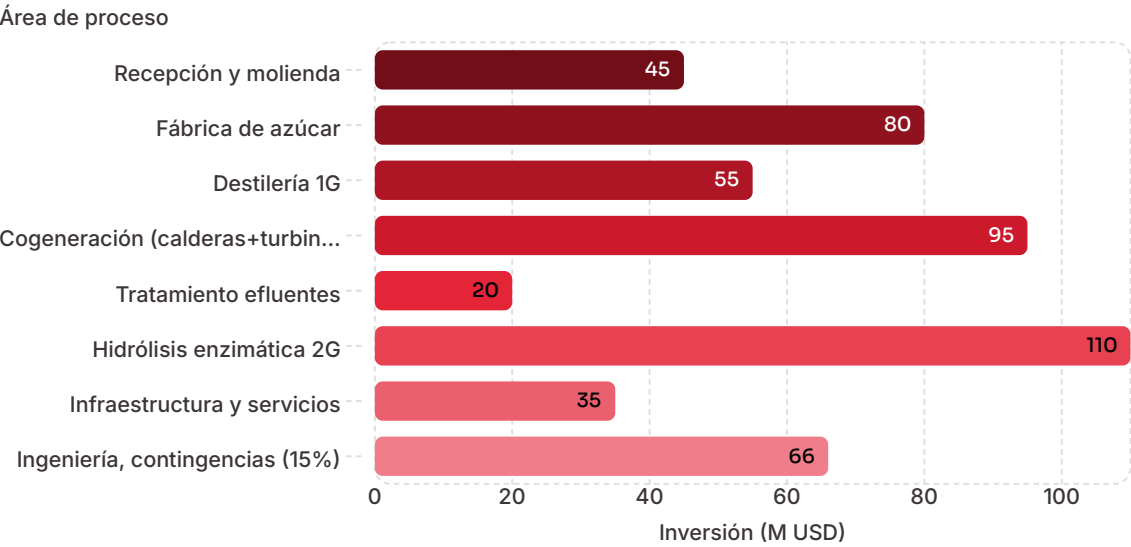
# Análisis Económico: CAPEX y OPEX

## EVALUACIÓN ECONÓMICA

La estructura de costes de una biorrefinería de caña varía significativamente según la configuración (solo azúcar, azúcar+etanol, integrada 1G+2G+cogeneración). Los valores siguientes corresponden a una planta integrada de referencia con capacidad de **2 millones de toneladas de caña por año**.



# Estructura de CAPEX — Desglose por Área



## Indicadores CAPEX de referencia

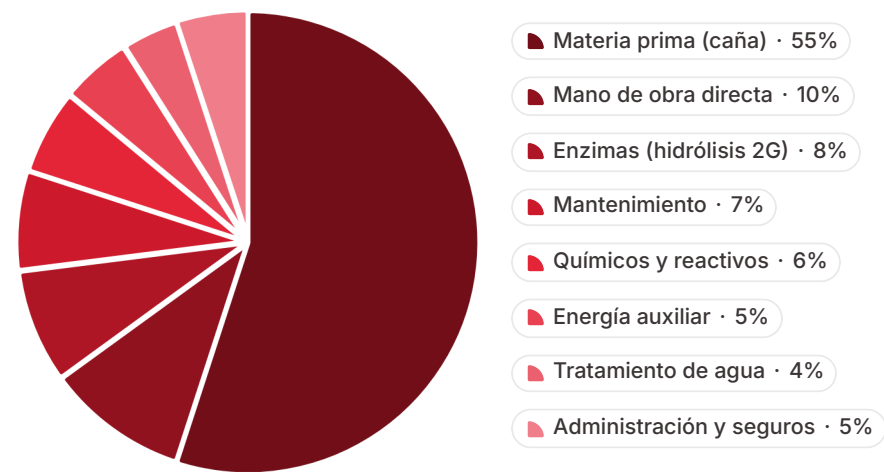
| Indicador                          | Valor        |
|------------------------------------|--------------|
| CAPEX total planta integrada       | ~506 M USD   |
| CAPEX unitario (USD/t caña-año)    | 250-280      |
| CAPEX destilería 1G sola           | 80-120 M USD |
| CAPEX cogeneración (USD/kW)        | 1.400-1.800  |
| Coste específico 2G (USD/L etanol) | 0,80-1,20    |
| Factor de contingencia típico      | 12-18%       |

Fuentes: BNDES (2022), IEA Bioenergy (2021), S&P Global Commodity Insights (2023). Valores en USD 2023, Latam trópico.

⚠ El módulo 2G (hidrólisis enzimática) representa el **22-25% del CAPEX total** y es el principal factor de incertidumbre económica.

# Estructura de OPEX — Costes de Operación

Desglose de OPEX — Planta 2 Mt caña/año



Coste de producción — Análisis comparativo

| Producto            | Coste prod. (USD/unidad) | Precio mercado ref. |
|---------------------|--------------------------|---------------------|
| Azúcar crudo        | 180–220 USD/t            | 380–420 USD/t       |
| Etanol 1G hidratado | 0,30–0,40 USD/L          | 0,55–0,70 USD/L     |
| Etanol 2G           | 0,65–0,90 USD/L          | 0,70–1,00 USD/L     |
| Energía eléctrica   | 35–45 USD/MWh            | 60–80 USD/MWh       |
| Biogás (vinaza)     | 3–5 USD/GJ               | 6–9 USD/GJ          |

✓ El **margen bruto de operación** de una planta integrada bien gestionada oscila entre el **28–38% sobre ingresos**, con TIR estimada del 14–22% en escenarios de precios favorables (análisis Monte Carlo, variación ±20% en precios).

Parámetro crítico: el **coste enzimático en 2G** (USD 4–8/GJ de etanol) es el principal obstáculo para la paridad de costes con 1G. Las tendencias apuntan a una reducción del 50% para 2030.

# Caso de Estudio 1: Brasil — Usina São Martinho

## Ficha técnica

- **Localización:** Pradópolis, São Paulo, Brasil
- **Capacidad:** 22 Mt caña/año (una de las mayores del mundo)
- **Modelo:** Integrado azúcar + etanol 1G + cogeneración
- **Superficie cosechada:** ~250.000 ha
- **Empleo directo:** ~6.500 personas
- **Certificaciones:** Bonsucro, RenovaBio (CBIO)

## Resultados operativos destacados (zafra 2022/23)

| Indicador               | Valor            |
|-------------------------|------------------|
| Producción azúcar       | ~1,8 Mt/año      |
| Producción etanol 1G    | ~680 ML/año      |
| Energía exportada a red | ~950 GWh/año     |
| Rendimiento etanol      | 87,5 L/t caña    |
| Ingresos brutos         | ~1.200 M USD/año |
| EBITDA                  | ~32%             |

São Martinho ha implementado un programa de **precision agriculture** con sensores IoT y drones, logrando reducir el coste de cosecha en un 12% y mejorando el contenido de sacarosa (+0,8° Brix) mediante cosecha optimizada por madurez.

 Fuente: São Martinho S.A. Relatório Anual 2023; UNICA — Anuário da Cana 2023.

# Caso de Estudio 2: India — Praj Industries / ISGEC

## Contexto del sector azucarero indio

India es el segundo productor mundial de azúcar (~35 Mt/año) y el mayor productor de etanol de caña fuera de Brasil, con un ambicioso programa de mezcla de etanol (**E20 para 2025**) impulsado por el Ministerio de Petróleo.

## Praj Matrix™ — Biorrefinería modular

Praj Industries ha desarrollado la plataforma **Matrix™**, que permite la conversión de ingenios existentes en biorrefinerías integradas mediante módulos añadibles:

### Módulo 1G+

Etanol de jugo + melaza con destilería molecular

### Módulo 2G

Hidrólisis enzimática de bagazo y paja (350 KLPD)

### Módulo Biogás

Digestión anaerobia de vinaza (CBG comprimido)

## Resultados Praj 2G — Planta piloto Pune

| Parámetro                | Resultado            |
|--------------------------|----------------------|
| Capacidad 2G             | 20 ML/año            |
| Conversión celulosa      | 89%                  |
| Coste enzimas            | USD 0,08/L           |
| Rendimiento 2G           | 92 L/t bagasse seco  |
| CO <sub>2</sub> ahorrado | 60 kg/GJ vs gasolina |

✓ India ha alcanzado **E12 en 2023**, adelantándose a sus propias previsiones, gracias en gran parte a la expansión de destilerías asociadas a ingenios.

i Fuente: Praj Industries Annual Report FY2023; Ministry of Petroleum & Natural Gas, India, 2023.

# Caso de Estudio 3: Colombia — Incauca y el Clúster del Valle del Cauca

## Contexto regional

El Valle del Cauca concentra el **97% de la producción azucarera colombiana**, con 13 ingenios que procesan colectivamente ~23 Mt de caña/año. La cooperación entre ingenios y el programa de cogeneración ha convertido al sector en exportador neto de electricidad al Sistema Interconectado Nacional (SIN).

## Incauca — Ingenio líder

- Capacidad: 2,2 Mt caña/año
- Producción etanol: 100 ML/año (mezcla E10)
- Cogeneración: 35 MW exportados a la red
- Certificación Bonsucro desde 2015

## Retos y oportunidades específicos

### Cosecha verde

Reducción quema caña: 92% cosecha mecánica en verde, generando abundante paja disponible para 2G y cogeneración adicional (~2 t paja/t caña).

### Vinaza y biofertilización

100% de la vinaza es biodigerida o fertirrigada, reduciendo el impacto hídrico y cerrando el ciclo de nutrientes (K, N, P).

### Política E10-E20

El mandato E10 de Colombia (Ley 693/2001) garantiza demanda base; la expansión a E20 abriría ~400 ML/año de mercado adicional.

 Fuente: Asocaña — Informe Anual 2022-2023; CENICAÑA, 2022.

# Valorización de Subproductos: Vinaza y Cachaza

La gestión adecuada de los subproductos es determinante para la viabilidad ambiental y económica de la biorrefinería. La vinaza y la cachaza representan las mayores corrientes residuales en volumen.



## Vinaza — Digestión Anaerobia

La vinaza (pH 3,5–4,5; DQO 30–80 g/L;  $K^+$  2.000–4.000 mg/L) se produce a razón de **8–15 L por litro de etanol**. La digestión anaerobia genera biogás (60–65%  $CH_4$ ) con un rendimiento de **0,25–0,35 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQO**. El digestato concentrado se aplica como biofertilizante potásico, sustituyendo hasta un 60% del KCl mineral.



## Cachaza — Compostaje y Biofertilización

La torta de filtrado o cachaza (70–75% humedad; 1,5% N; 1,8%  $P_2O_5$ ; 0,8%  $K_2O$ ) se genera a **30–35 kg/t caña**. Compostada con vinaza concentrada durante 45–60 días, produce un enmienda orgánica con valor de mercado de **USD 40–80/t**. Algunas plantas comercializan cachaza deshidratada como sustrato para hongos comestibles (*Pleurotus* spp.).

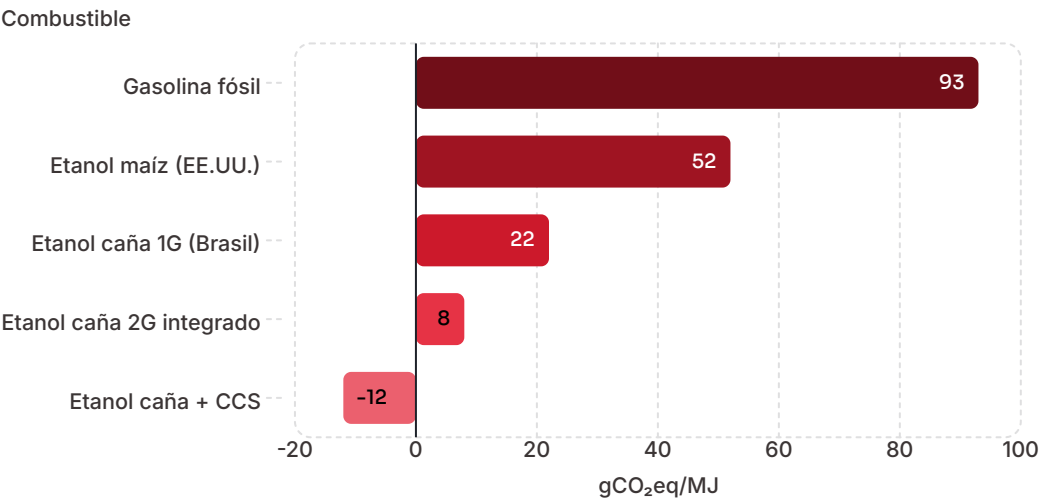


## CO<sub>2</sub> Fermentativo — Captura y Venta

La fermentación alcohólica libera **0,48 kg CO<sub>2</sub>/kg etanol producido** en forma pura ( $\geq 99\%$ ). Una planta de 150 ML/año genera ~90.000 t CO<sub>2</sub>/año capturables. Este CO<sub>2</sub> industrial tiene mercado en bebidas carbonatadas, industria alimentaria, invernaderos y, en horizonte 2G, puede ser metanizado (Power-to-Gas) con H<sub>2</sub> verde.

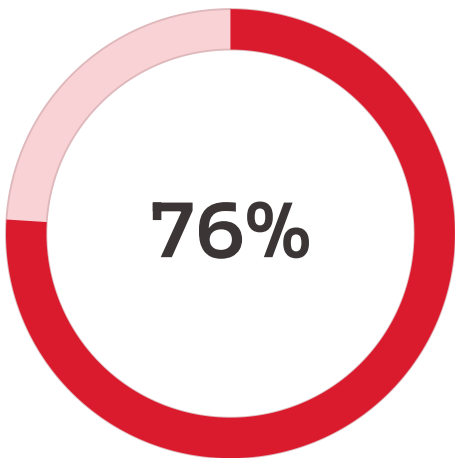
# Indicadores de Sostenibilidad y Huella de Carbono

## Intensidad de carbono — Comparativa de combustibles



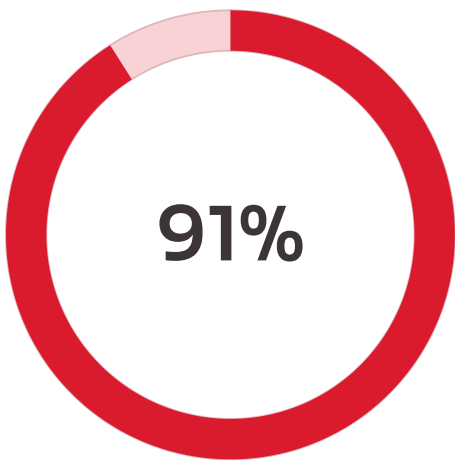
Valores de análisis de ciclo de vida (ACV) de pozo a rueda (WTW).  
Fuentes: IPCC AR6, JRC EU, Embrapa 2022.

## Métricas de sostenibilidad por tonelada de caña



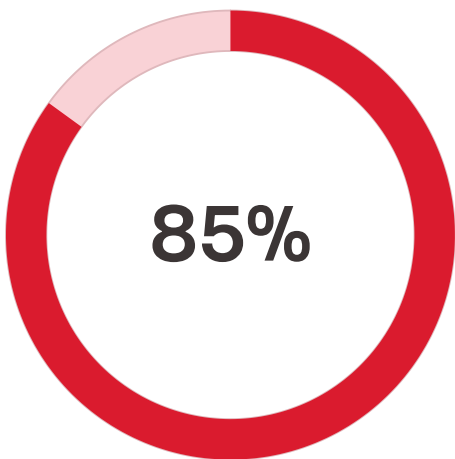
### Reducción GEI

Etanol 1G caña vs. gasolina, base ACV



### Reducción GEI 2G

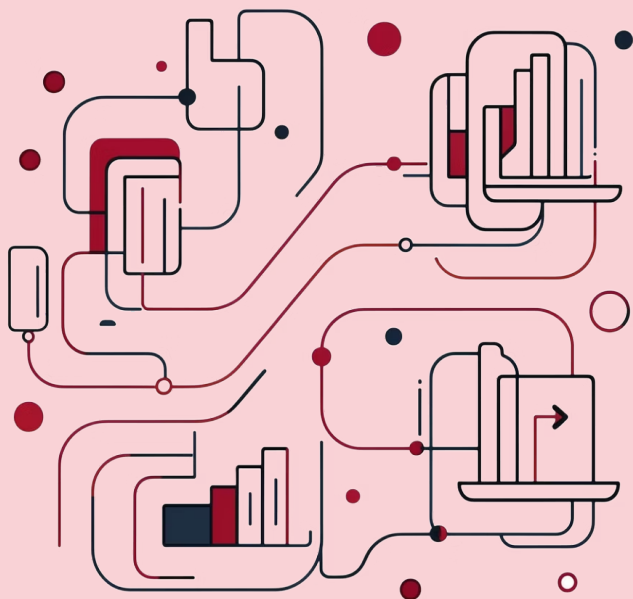
Etanol celulósico integrado con cogeneración



### Autosuficiencia energética

Energía térmica cubierta con bagazo

El etanol de caña brasileño cumple ampliamente con los umbrales de reducción de GEI exigidos por la **Directiva RED II** de la UE (65% mínimo para instalaciones nuevas) y por el **RFS2** de EE.UU. (50% para etanol avanzado).



# Hoja de Ruta Tecnológica y Tendencias 2025–2035

1

**2024–2026**

Consolidación 2G: Reducción coste enzimas a <USD 0,05/L; integración digital (gemelo digital de planta); expansión E2O en Brasil e India.

2

**2026–2028**

Bioplásticos: PLA y PHA a partir de ácido láctico/3-HPA de fermentación de melaza. Lignina técnica como material estructural de alto valor (>USD 500/t).

3

**2028–2031**

BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage): captura de CO<sub>2</sub> fermentativo y de combustión; etanol neto negativo en carbono. Primeras plantas comerciales.

4

**2031–2035**

Biorrefinería 4.0: IA para optimización de zafra y proceso en tiempo real; producción de SAF (Sustainable Aviation Fuel) vía ruta alcohol-to-jet (AtJ) desde etanol de caña.

# Bibliografía y Referencias Técnicas

## Publicaciones científicas y técnicas

- Dias, M.O.S. et al.** (2013). "Improving bioethanol production from sugarcane: evaluation of distillation, thermal integration and cogeneration systems." *Energy*, 45(1), 196–202. DOI: 10.1016/j.energy.2012.03.020
- Humbird, D. et al.** (2011). "Process Design and Economics for Biochemical Conversion of Lignocellulosic Biomass to Ethanol." NREL/TP-5100-47764. National Renewable Energy Laboratory, USA.
- Seabra, J.E.A. et al.** (2010). "A techno-economic evaluation of the effects of centralized cellulosic ethanol and co-products refinery options with sugarcane mill clustering." *Biomass and Bioenergy*, 34(8), 1065–1078.
- Macedo, I.C., Seabra, J.E.A., Silva, J.E.A.R.** (2008). "Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil." *Biomass and Bioenergy*, 32(7), 582–595.

## Informes institucionales y organismos

- UNICA** (2023). *Anuário da Indústria Canavieira 2022/23*. União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia, São Paulo, Brasil.
- IEA Bioenergy** (2021). *Task 39 — Advanced Biofuels: Status and Prospects*. International Energy Agency, Paris.
- BNDES/CGEE** (2021). *Bioetanol de cana-de-açúcar: Energia para o desenvolvimento sustentável*. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, Rio de Janeiro.
- Asocaña** (2023). *Informe Anual 2022–2023: Sector Azucarero Colombiano*. Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia, Cali.
- FAO** (2022). *FAOSTAT — Sugar crops production data*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponible en: [fao.org/faostat](https://fao.org/faostat).

❏ Todos los datos de costes y rendimientos citados en esta presentación están referenciados a fuentes primarias. Para aplicaciones de ingeniería se recomienda actualizar los valores CAPEX/OPEX con cotizaciones de proveedores de equipos específicos del mercado objetivo.