



Biorrefinería de la Piña

Valorización integral de *Ananas comosus*: productos, subproductos, balances y economía de proceso

Esta presentación ofrece un análisis técnico exhaustivo del concepto de biorrefinería aplicado al procesamiento industrial de la piña. Se examinan los flujos de masa y energía, los productos de alto valor añadido, los costos de inversión (CAPEX) y operación (OPEX), casos de estudio reales y ejemplos de cálculo para ingenieros de proceso.

INGENIERÍA DE PROCESOS

BIORREFINERÍA

ANANAS COMOSUS

Agenda

Estructura de la presentación para una revisión sistemática del proceso de biorrefinería de piña:

01	02	03
Composición y materia prima	Productos y subproductos	Balances de masa y energía
Análisis proximal y caracterización de <i>Ananas comosus</i>	Mapa de valorización: bromelina, fibra, etanol, biogás, pectina y más	Diagramas de flujo, cálculos y ejemplos numéricos
04	05	
Análisis económico CAPEX / OPEX	Casos de estudio y bibliografía	
Estimación de inversión, costos operativos y rentabilidad	Plantas piloto y a escala industrial en América Latina y Asia	

Composición y Caracterización de la Materia Prima

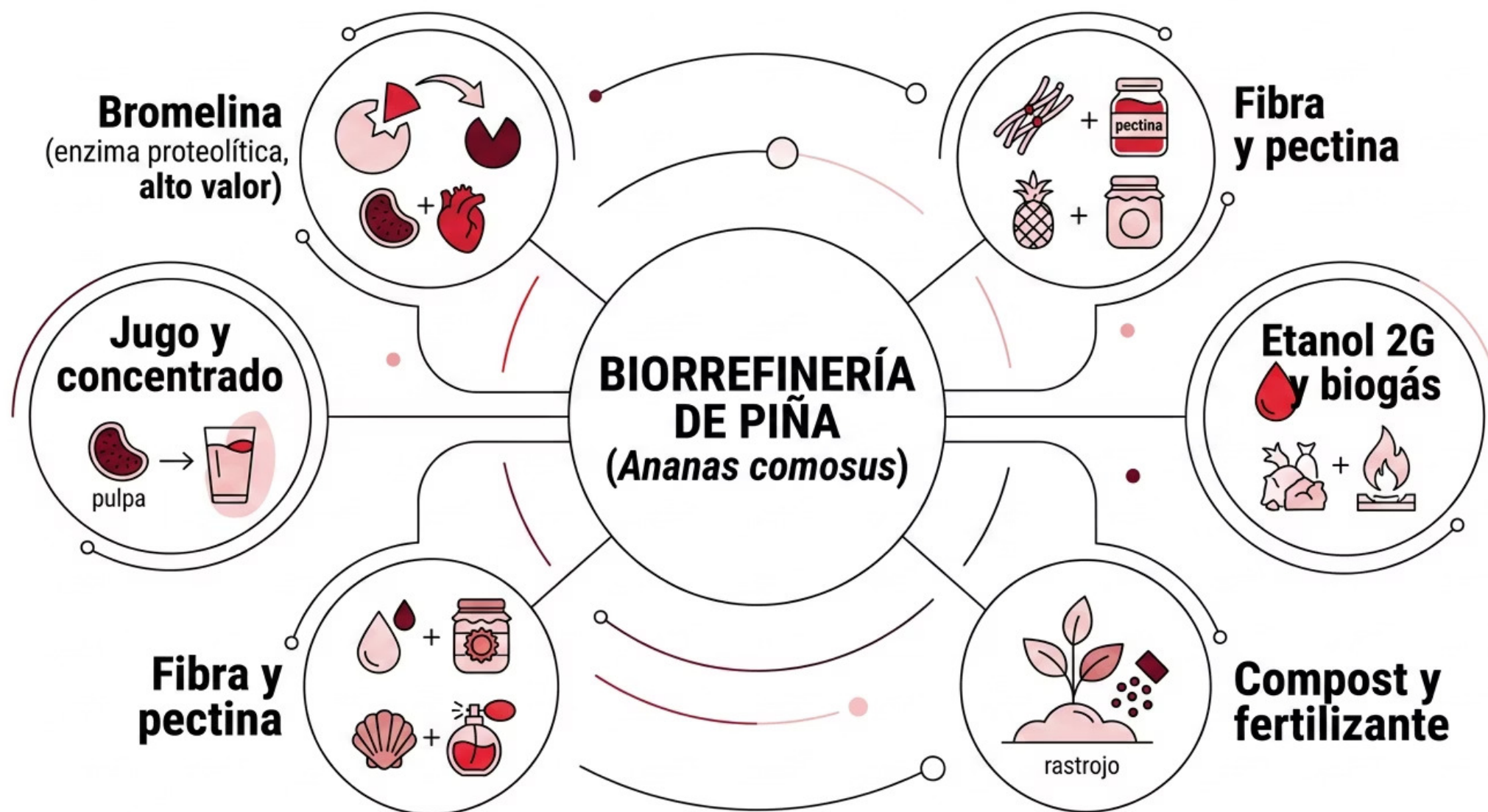
La piña (*Ananas comosus*) presenta una estructura compleja que permite la extracción de múltiples compuestos de valor. La composición varía según variedad, estado de madurez y región de cultivo. Las variedades más procesadas industrialmente son **MD-2 (Golden Extra Sweet)** y **Cayena Lisa**.

Fracción	% en fruta fresca	Humedad (%)	Proteína (%bs)	Azúcares (%bs)
Pulpa / jugo	45–55	85–87	0.4–0.6	72–80
Cáscara (corona exterior)	12–18	82–86	3.5–5.0	45–55
Corazón (cilindro central)	8–12	78–82	1.0–2.0	60–68
Corona (hojas apicales)	10–15	70–75	5.0–8.0	20–30
Rastrojo (tallos y hojas)	10–20	65–72	4.0–6.0	18–28

Fuente: Elaboración propia a partir de Banerjee et al. (2018) y Roda et al. (2016). bs = base seca.

Mapa de Productos y Subproductos de la Biorrefinería

El concepto de biorrefinería integrada permite aprovechar **el 95–98% de la biomasa** total de la piña. A partir de cada fracción se generan productos de diferente grado de valor agregado:



i La bromelina es el producto de mayor valor comercial, con precios de mercado entre **\$8 – \$25 USD/g** según grado de pureza (alimentario, farmacéutico, industrial).

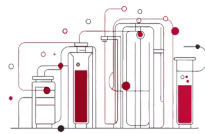
Productos Principales: Descripción Técnica y Valor de Mercado



Bromelina

Endoproteasa sistémica extraída del corazón y tallo. Actividad: 1.500–2.400 GDU/g.

Aplicaciones: farmacéutica, cosmética, industria alimentaria y cuero.



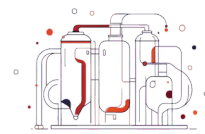
Jugo y Concentrado

Obtenido de la pulpa por prensado y filtración. Concentrado a 60–65 °Brix por evaporación al vacío. Rendimiento: 400–500 L por tonelada de fruta fresca.



Fibra Dietética y Pectina

Obtenidas de cáscara y corazón tras extracción acuosa ácida. Contenido de pectina: 3–5% bs en cáscara. Fibra total: 18–22% bs. Mercado: alimentos funcionales.

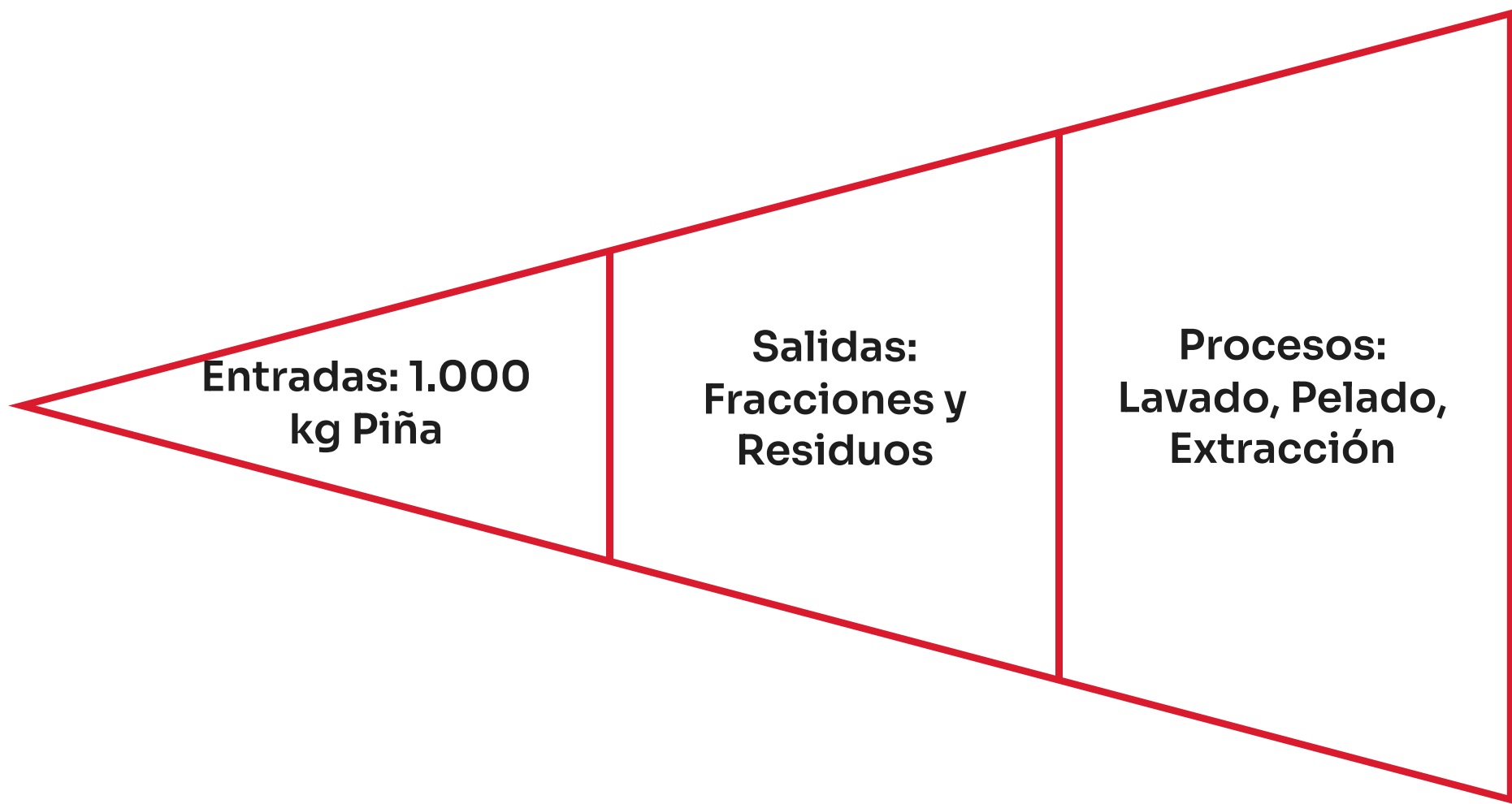


Biogás y Etanol 2G

Digestión anaerobia de efluentes y pulpa residual: 0.35–0.45 m³ CH₄/kg SV. Etanol lignocelulósico desde rastrojo: 180–220 L/ton bs tras pretratamiento.

Balance de Masa — Base de Cálculo: 1.000 kg de Piña Fresca

El siguiente balance de masa toma como base 1.000 kg de fruta fresca entera en entrada al proceso. Los valores son representativos para una planta de procesamiento estándar con recuperación de bromelina y jugo concentrado.



Corriente	Masa (kg)	% entrada	Producto principal	Destino
Jugo fresco	480	48.0	Jugo / concentrado	Evaporador de múltiple efecto
Cáscara	150	15.0	Fibra / pectina / aroma	Extractor sólido-líquido
Corazón	100	10.0	Bromelina	Precipitación / ultrafiltración
Rastrojo / corona	130	13.0	Etanol 2G / biogás	Digestor anaerobio / SSF
Bagazo húmedo	120	12.0	Compost / biofertilizante	Compostaje aerobio
Pérdidas (rechazo)	20	2.0	—	Vertido controlado

✓ Cierre del balance: **1.000 kg entrada = 1.000 kg distribuidos**. Rendimiento de valorización ≥ 98%.

Balance de Energía — Ejemplo de Cálculo Detallado

Análisis energético para una planta que procesa **10 ton/h de piña fresca**. Se consideran los consumos de las operaciones unitarias más intensivas en energía.

Operación Unitaria	Consumo (kW)	Calor (kW)	Total (kWh/ton)
Lavado y clasificación	45	0	4.5
Pelado y trozado	75	0	7.5
Extracción de jugo (prensa)	110	0	11.0
Evaporación al vacío (jugo)	30	850	88.0
Ultrafiltración (bromelina)	95	0	9.5
Secado por atomización	40	420	46.0
Digestión anaerobia	55	120	17.5
TOTAL	450	1.390	184.0

Recuperación energética: El biogás generado ($\approx 350 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$) suministra $\sim 1.750 \text{ kW}$ térmicos, cubriendo el **126%** de la demanda térmica del proceso.

Ejemplo de Cálculo: Evaporación

Para concentrar 4.800 kg/h de jugo (85% agua) de 12 a 65 °Brix:

Agua a evaporar:

$$W = 4.800 \times (1 - 12/65) = 3.911 \text{ kg/h}$$

Calor requerido ($\lambda = 2.260 \text{ kJ/kg}$):

$$Q = 3.911 \times 2.260 = 8.839 \text{ MJ/h} = \mathbf{2.455 \text{ kW}}$$

Con evaporador de triple efecto ($\eta = 35\%$):

$$Q_{\text{real}} = 2.455 / 3 = \mathbf{818 \text{ kW}} \checkmark \text{ (coherente con tabla)}$$

Extracción y Purificación de Bromelina — Proceso Detallado

La bromelina es el producto de mayor margen económico en la biorrefinería. El proceso requiere control estricto de temperatura ($\leq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) y pH (4.5–5.5) para preservar la actividad enzimática.



Rendimientos Típicos

Etapas	Recuperación (%)	Actividad (GDU/g)
Jugo crudo	100	250–400
Post-centrifugación	85–90	300–480
Post-precipitación (NH ₄) ₂ SO ₄	70–80	800–1.200
Post-UF (10 kDa)	65–72	1.200–1.800
Producto final (liofilizado)	60–68	1.500–2.400

Cálculo de Rendimiento Másico

Base: 1.000 kg corazón fresco con 0.8% proteína soluble:

- Proteína total disponible: 8 kg
- Jugo extraído (75% extracción): 750 kg
- Bromelina cruda en jugo: ~6 kg
- Tras UF y secado (65% recuperación): **3.9 kg de producto seco**
- Actividad final: ~1.800 GDU/g
- Valor de mercado (industrial): \$8/g → **\$31.200 USD/ton corazón**

Producción de Etanol 2G desde Rastrojo de Piña

El rastrojo (hojas, tallos, restos de campo) representa el **40–60% de la biomasa total** generada en la cosecha y procesamiento de piña. Su composición lignocelulósica lo convierte en un sustrato adecuado para la producción de etanol de segunda generación.

Composición del Rastrojo (% bs)

Componente	Contenido (% bs)
Celulosa	28–35
Hemicelulosa	16–22
Lignina	8–12
Extractivos	5–10
Cenizas	2–5
Humedad (bs)	65–72

❏ Pretratamiento recomendado: **explosión de vapor** a 200–220 °C, 15 min, factores de severidad $R_0 = 3.6\text{--}4.0$.
Aumenta digestibilidad enzimática de 32% a 78–85%.

Cálculo de Potencial Etanólico

Base: 1 ton bs de rastrojo

- Celulosa disponible: 320 kg
- Hidrólisis enzimática (80% conv.): 256 kg glucosa
- Fermentación SSF ($\eta = 90\%$ rendim. teórico):
 $\text{Etanol} = 256 \times 0.511 \times 0.90 = \mathbf{117.7\text{ kg} = 148.7\text{ L}}$
- Hemicelulosa (pentosas, 60% conv.):
Etanol adicional $\approx 38\text{ L}$

→ **Total: ~187 L etanol/ton bs rastrojo**

→ Precio etanol combustible: \$0.65/L → **\$121.5 USD/ton bs**

Análisis Económico — CAPEX

Estimación de inversión de capital para una planta de biorrefinería de piña con capacidad de procesamiento de **50 ton/h de fruta fresca** (operación: 8.000 h/año, ~400.000 ton/año). Costos en dólares USD, año base 2023, factor de localización para América Latina = 1.15.

Área de proceso	Equipo principal (\$M USD)	Instalación (\$M USD)	Instrumentación (\$M USD)	Subtotal (\$M USD)
Recepción, lavado y clasificación	1.2	0.8	0.3	2.3
Pelado, trozado y extracción de jugo	2.8	1.5	0.6	4.9
Evaporación al vacío (jugo)	4.5	2.1	0.9	7.5
Extracción y purificación bromelina	5.2	2.8	1.4	9.4
Digestión anaerobia y biogás	3.1	1.9	0.7	5.7
Planta etanol 2G (pretratamiento+SSF)	7.8	4.2	1.6	13.6
Servicios industriales (utilities)	2.4	1.3	0.5	4.2
Edificios e infraestructura civil	3.5	—	—	3.5
TOTAL CAPEX (sin contingencia)	30.5	14.6	6.0	51.1

\$51.1M

CAPEX Total

USD estimado (sin contingencia), base 2023

\$58.8M

CAPEX con Contingencia

+15% contingencia de ingeniería y construcción

\$0.15

CAPEX Específico

USD por kg de fruta procesada (\$/kg fruta)

Análisis Económico — OPEX

Costos operativos anuales estimados para la planta de referencia (400.000 ton/año de fruta fresca). Los costos variables dominan, representando ~68% del OPEX total.

Rubro	Costo (\$M USD/año)	% OPEX
Materia prima (piña)	24.0	38.5
Energía eléctrica	4.8	7.7
Combustible / vapor	3.2	5.1
Agua de proceso y tratamiento	1.4	2.2
Reactivos y químicos	3.8	6.1
Enzimas (hidrólisis)	2.6	4.2
Mano de obra directa e indirecta	8.5	13.6
Mantenimiento (3% CAPEX/año)	1.8	2.9
Seguros y administración	2.2	3.5
Tratamiento de efluentes y residuos	1.0	1.6
Depreciación (15 años, lineal)	3.9	6.3
Otros costos fijos	5.2	8.3
TOTAL OPEX	62.4	100

Ingresos Proyectados (USD/año)

Producto	Ingreso (\$M USD/año)
Bromelina (grado industrial)	38.5
Concentrado de jugo (65 °Brix)	18.2
Fibra dietética y pectina	7.4
Etanol 2G (combustible)	9.6
Biogás / bioenergía (autoconsumo)	4.1
Biofertilizante (compost)	2.8
TOTAL INGRESOS	80.6

✔ **EBITDA estimado:** \$80.6M – \$62.4M = **\$18.2M USD/año**
Margen EBITDA: **22.6%** | Retorno sobre inversión (ROI): **~31% anual** | Período de recuperación: **3.2 años**

Casos de Estudio

Se presentan tres casos de referencia a escala industrial y piloto que ilustran la viabilidad técnico-económica de la biorrefinería de piña en diferentes contextos geográficos y de escala:

1

Caso 1 — Costa Rica: Del Monte Fresh Produce

Escala: 120.000 ton/año fruta procesada.

Productos: jugo concentrado, piña en conserva y bromelina grado alimentario.

Innovación: integración energética total mediante biogás del digestor anaerobio (cubre 85% de la demanda térmica).

CAPEX real: ~\$28M USD. **ROI reportado:** 27–32% en 5 años de operación. *Fuente: Del Monte Annual Report (2021); Bartholomew & Paull (2003).*

2

Caso 2 — Filipinas: DOST-FPRDI Biorefinery Pilot

Escala: 500 kg/h (planta piloto).

Productos: bromelina grado farmacéutico, fibra de hoja (PALF) para textiles y biometano. **Innovación:** extracción simultánea de fibra PALF de alta tenacidad (>1 GPa módulo elástico) y bromelina en una sola línea integrada.

CAPEX: \$2.1M USD. **TIR:** 34% a 10 años. *Fuente: DOST-FPRDI Tech Reports (2019–2022).*

3

Caso 3 — Brasil: EMBRAPA / UFRPE Planta Demostrativa

Escala: 2 ton/h. **Productos:** etanol 2G desde rastrojo, pectina y bioabono.

Logro: rendimiento de 182 L etanol/ton bs rastrojo usando pretratamiento hidrotérmico + SSF con *S. cerevisiae* recombinante. **Reducción OPEX enzimas:** 38% vs. proceso convencional. *Fuente: Rodrigues et al. (2020), Bioresource Technology.*

Indicadores de Sostenibilidad y Huella de Carbono

La biorrefinería de piña integrada no solo es económicamente rentable, sino que reduce significativamente el impacto ambiental respecto al procesamiento convencional con disposición de residuos a vertedero.

94%

Valorización de Biomasa

Porcentaje de biomasa total convertida en producto útil vs. 45–60% en planta convencional

-68%

Reducción GEI

Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero vs. proceso lineal con vertido

126%

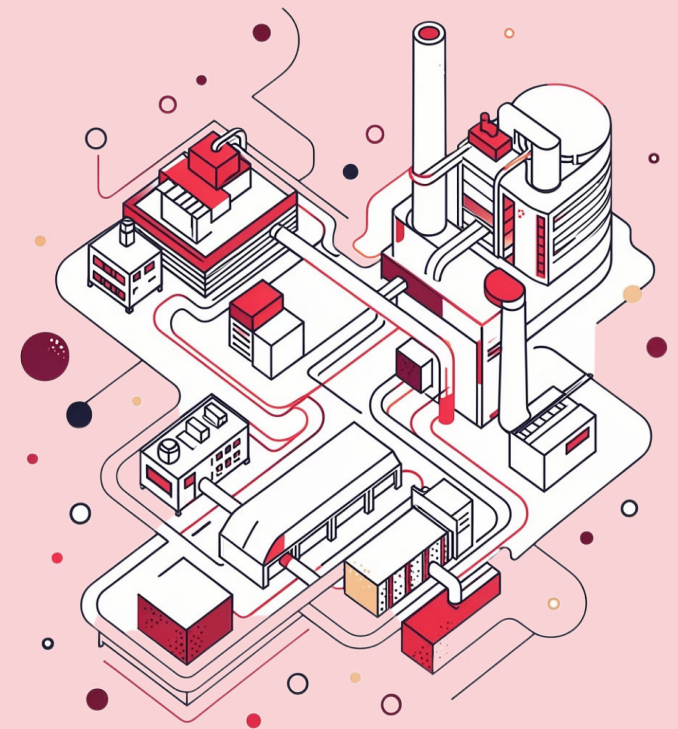
Autosuficiencia Energética

La bioenergía generada cubre el 126% de la demanda térmica total del proceso

\$0

Costo Neto de Residuos

Todos los residuos sólidos y líquidos tienen destino productivo valorizado



Bibliografía de Referencia

Las siguientes fuentes científicas y técnicas sustentan los datos, parámetros y casos de estudio presentados en esta sesión:

Composición y caracterización de materia prima

Banerjee, J. et al. (2018). *Pineapple (Ananas comosus) — Functional Properties and Industrial Applications*. Food Research International, 109, 44–63. | Roda, A. et al. (2016). *Compositional and textural characterization of by-products from pineapple processing*. LWT – Food Science and Technology, 65, 260–267.

Bromelina: extracción y purificación

Bartholomew, D.P. & Paull, R.E. (2003). *The Pineapple: Botany, Production and Uses*. CABI Publishing, Wallingford, UK. | Arulpandi, I. & Sangeetha, R. (2012). *Bacterial lipases and their industrial applications: a short review*. Current Biochem. Eng., 1, 50–62. | Hossain, M.A. et al. (2021). *Purification and characterization of bromelain from pineapple core*. J. Food Biochemistry, 45(3), e13637.

Bioenergía y etanol lignocelulósico

Rodrigues, T.H.S. et al. (2020). *Ethanol production from pineapple agroindustrial waste by Kluyveromyces marxianus*. Bioresource Technology, 302, 122886. | Sun, Y. & Cheng, J. (2002). *Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production*. Bioresource Technology, 83(1), 1–11.

Economía de proceso y análisis CAPEX/OPEX

Turton, R. et al. (2018). *Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes* (5ª ed.). Prentice Hall. | Peters, M.S. et al. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers* (5ª ed.). McGraw-Hill. | DOST-FPRDI Technical Reports (2019–2022). *Pineapple Biorefinery Pilot Plant — Philippines*. Department of Science and Technology, Manila.

Sostenibilidad y análisis de ciclo de vida

Mohan, S.V. et al. (2016). *Waste Biorefinery: Potential and Perspectives*. Elsevier. | Del Monte Fresh Produce Annual Report (2021). Sustainability and Operations Review. | EMBRAPA Agroindústria Tropical. (2020). *Valorização de resíduos do processamento de abacaxi*. Documento Técnico 42, Fortaleza, Brasil.

❏ Todos los precios de mercado, parámetros de proceso y proyecciones económicas citados en esta presentación corresponden al período 2021–2023. Se recomienda actualizar los precios de materias primas y productos con cotizaciones de mercado vigentes al momento de la evaluación de proyecto.