

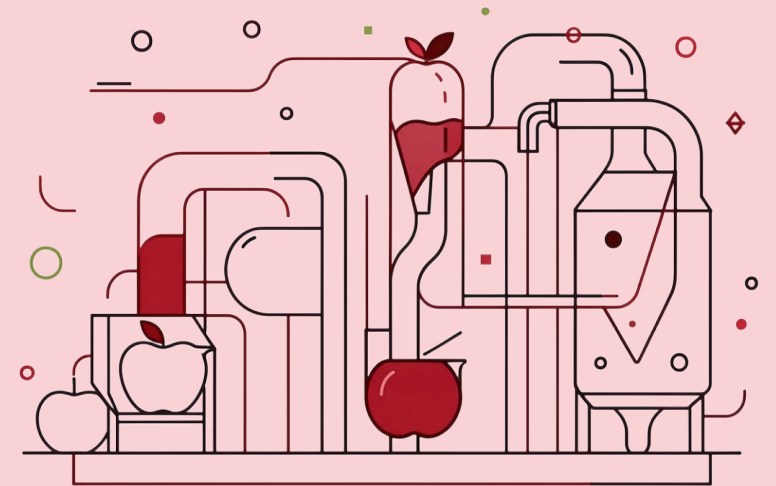
Biorrefinería de Manzana: Valorización Integral y Sostenibilidad Industrial

Análisis técnico-económico para ingenieros de procesos industriales —
productos, balances de masa y energía, CAPEX, OPEX y casos de estudio.



Introducción: El Potencial Oculto de la Manzana

La manzana es uno de los cultivos frutícolas más producidos globalmente, generando enormes volúmenes de residuos sólidos y líquidos durante su procesamiento industrial. La biorrefinería propone transformar estos flujos de descarte en productos de alto valor agregado, bajo un enfoque de economía circular. Este análisis evalúa la **viabilidad técnica y económica** de implementar una biorrefinería a escala industrial a partir de manzana y sus subproductos.



Materia Prima: La Manzana y sus Residuos



Composición Típica del Orujo de Manzana (base seca)

Componente	% en Orujo Seco
Humedad (base fresca)	70–80%
Fibra Dietética	15–25%
Polifenoles (Flavonoides, Ácido Clorogénico)	1–5%
Azúcares Reductores	5–10%
Lignina	10–20%

El orujo (piel, pulpa, semillas) es el subproducto sólido principal, rico en fibra, polifenoles y azúcares fermentables. Las aguas residuales de lavado y proceso representan la fracción líquida a tratar o valorizar.

Productos y Subproductos de Valor Agregado



Pectina

Agente gelificante para industria alimentaria y farmacéutica.
Rendimiento: 10–20% sobre sólidos secos.



Aceite Esencial / Aromáticos

Para perfumería, cosmética y alimentos. Extraído por arrastre de vapor o prensado en frío.



Fibra Dietética

Ingrediente funcional de alto valor para alimentos enriquecidos y suplementos nutricionales.



Bioetanol / Biogás

Fermentación de azúcares residuales para bioetanol;
digestión anaeróbica de aguas residuales para biogás.



Ácido Málico y Orgánicos

Usos en industria alimentaria (acidulante) y farmacéutica.
Recuperable de las fracciones líquidas del proceso.

Diagrama de Flujo de la Biorrefinería de Manzana



El flujo integra la corriente sólida (orujo) y líquida (aguas residuales) hacia distintas líneas de valorización. La integración de calor entre etapas de alta y baja temperatura es crítica para la eficiencia energética global del proceso.

Balance de Masa: Caso Base — 1,000 kg de Orujo Fresco

Corriente	Cantidad	Observaciones
Entrada: Orujo fresco	1,000 kg	75% humedad
Sólidos secos totales	250 kg	Base de cálculo
Agua evaporada (secado)	~750 kg	Requiere energía
→ Pectina (10% s.s.)	25 kg	Mínimo estimado
→ Pectina (20% s.s.)	50 kg	Máximo estimado
→ Aceite Esencial (1% s.s.)	2.5 kg	Destilación vapor
→ Fibra / Residuo sólido	~197 kg	Cogeneración/co mpost

Balance de Energía — Conceptual

- **Consumo:** Secado (~2,500 kJ/kg agua), calentamiento para extracción, destilación, bombeo.
- **Generación:** Biogás (digestión anaeróbica) y cogeneración a partir de lignina residual.
- **Integración térmica:** Calor residual de destilación → precalentamiento de flujos de extracción. Reduce OPEX energético hasta un 30%.

Cálculo de Ejemplo: Producción de Pectina

Parámetros de Diseño

Parámetro	Valor
Orujo fresco procesado	1,000 kg/lote
Sólidos secos	250 kg
Rendimiento pectina (rango)	10–20% s.s.
Producción estimada	25–50 kg/lote
Precio mercado pectina	\$15–\$30 USD/kg
Ingreso por lote (mín.)	\$375 USD
Ingreso por lote (máx.)	\$1,500 USD

Proyección Anual (300 lotes/año)

7,500

kg pectina/año

Escenario mínimo (10% rendimiento)

\$225K

ingreso mínimo

Solo por pectina a \$30/kg

\$450K

ingreso máximo

Con 20% rendimiento a \$30/kg

 La combinación pectina + aceite esencial + fibra puede duplicar el ingreso bruto por tonelada de orujo procesado versus una sola línea de producto.

CAPEX y OPEX: Estimación para Planta Mediana

CAPEX — Inversión Inicial

Concepto	Rango (USD)
Equipos (extractores, secadores, destiladores, filtros)	\$500,000–\$2,000,000
Infraestructura (edificios, servicios)	\$200,000–\$800,000
Control y automatización	\$100,000–\$300,000
Total CAPEX Estimado	\$800,000–\$3,100,000

OPEX — Costos Operativos Anuales

Concepto	Rango (USD/año)
Energía (electricidad, vapor)	\$50,000–\$200,000
Mano de obra	\$100,000–\$300,000
Mantenimiento y consumibles	\$30,000–\$100,000
Tratamiento de residuos	Variable
Total OPEX Estimado	\$180,000–\$600,000

Casos de Estudio Comparativos

1

Biorrefinería de Naranja — Muñoz-Briones et al. (2021)

Productos: aceite esencial (8.7 t/año) y pectina (44.4 t/año).

Recuperación de inversión: 5–6 años. Impacto positivo económico, ambiental y social demostrado en estudio de pre-factibilidad.

2

Biorrefinería de Plátano — Cardona Alzate et al.

Productos: furfural, xilitol, ácido láctico y bioetanol. **Márgenes positivos** para furfural, xilitol y ácido láctico. La cogeneración de vapor y electricidad mejora significativamente la rentabilidad del proyecto.

3

Biorrefinería de Caña de Azúcar — Galiano Morell et al. (2022)

Producción de biodiésel con coproductos. **VAN: \$345 M USD | TIR: 74.10% | Recuperación: 2 años.** La integración de procesos (González Cortés et al.) es el factor determinante de viabilidad.

Composición del Orujo y Potencial de Productos

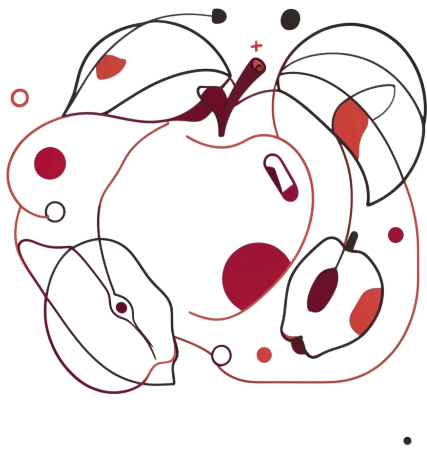


Tabla Resumen: Orujo de Manzana (Base Seca)

Componente	% Orujo Seco	Producto Potencial
Fibra Dietética	15–25%	Ingrediente Funcional
Polifenoles	1–5%	Antioxidantes, Aceites
Azúcares Reductores	5–10%	Bioetanol, Ácidos Orgánicos
Lignina	10–20%	Energía (Cogeneración)
Pectina	10–20%	Gelificante Alimentario

✓ La valorización simultánea de todos los componentes maximiza el ingreso por tonelada de residuo y reduce el costo de disposición final.

Conclusiones y Próximos Pasos

→ Factibilidad Técnica Confirmada

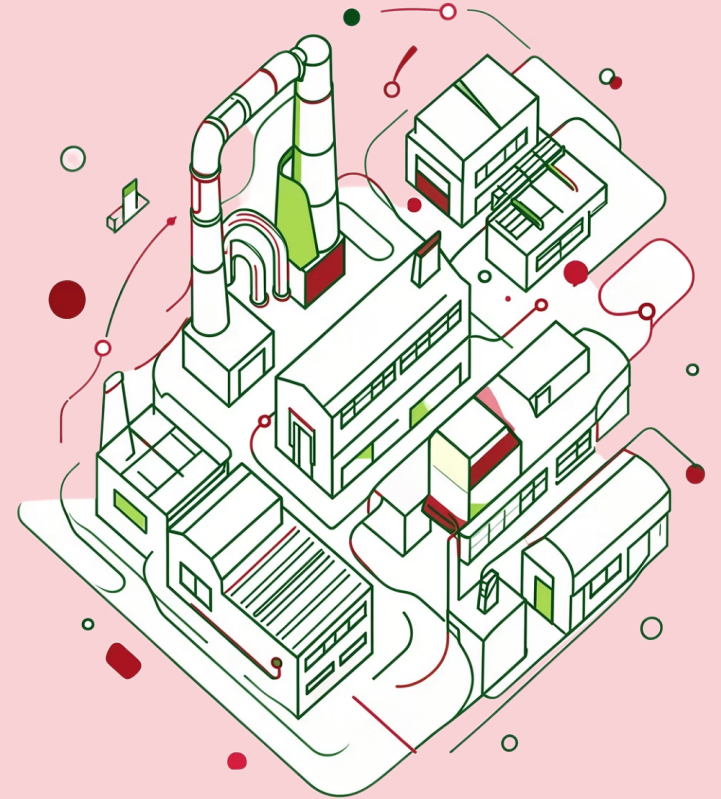
Las tecnologías de extracción de pectina, aceites esenciales y fermentación están maduras y disponibles a escala industrial.

→ Viabilidad Económica Prometedora

Ingresos de \$225K–\$450K USD/año solo por pectina. La integración de múltiples productos y la cogeneración son palancas clave de rentabilidad.

→ Próximos Pasos Recomendados

Estudio de pre-factibilidad específico → selección de tecnologías → análisis de mercado → evaluación financiera completa (VAN, TIR, punto de equilibrio).



Bibliografía

Muñoz-Briones, P. A., Almeida-Streitwieser, D., Fonseca-Ashton, J. D., & Alvarez-Barreto, J. F. (2021). Estudio de pre-factibilidad técnica y económica de la implementación de una biorrefinería para la conversión de residuos de cáscara de naranja. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 13(2).

Cardona Alzate, C. A., Castro Galiano, E., Hernández Piedrahita, V., & Daza Serna, L. V. Análisis tecno-económico de una biorefinería a partir de residuos del plátano. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*.

Galiano Morell, D. D. A., Córdova López, J. A., Oquendo Ferrer, H., & Ramos-Sánchez, L. B. (2022). Evaluación económica de la producción de biodiésel con un enfoque de biorrefinería. *Universidad y Sociedad*, 14(S5), 352–361.

González Cortés, M., Castellanos Gallo, L., Albernas Carvajal, Y., & González Suárez, E. (2014). La integración de procesos en el esquema de una biorrefinería. *Afinidad. Journal of Chemical Engineering*, 71(568).

Clauser, N. M., Felissia, F. E., Area, M. C., & Vallejos, M. E. (2023). Process Design for Value-Added Products in a Biorefinery Platform from Agro and Forest Industrial Byproducts. *Polymers*, 15(2), 274.