



Biorrefinería de la Almendra

Valorización Integral de un Residuo Agrícola — Enfoque para Ingenieros de Procesos

INGENIERÍA DE PROCESOS

ECONOMÍA CIRCULAR

BIOMASA LIGNOCELULÓSICA

La Almendra como Materia Prima Estratégica

La almendra es uno de los frutos secos con mayor producción global. Sin embargo, **más del 60% de la masa del fruto** corresponde a subproductos —cáscara, hueso y tegumento— que permanecen infrautilizados.

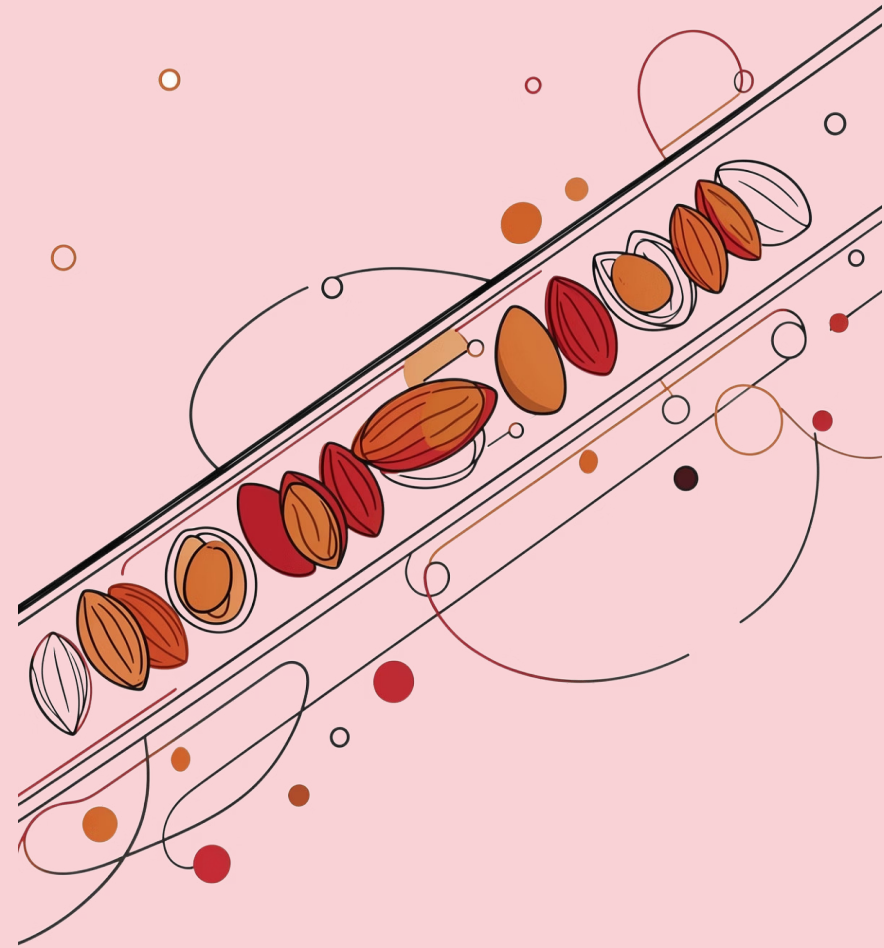
El concepto de **biorrefinería** permite maximizar el valor de cada fracción, transformando residuos en productos de alto valor añadido bajo un enfoque de economía circular.

Objetivo

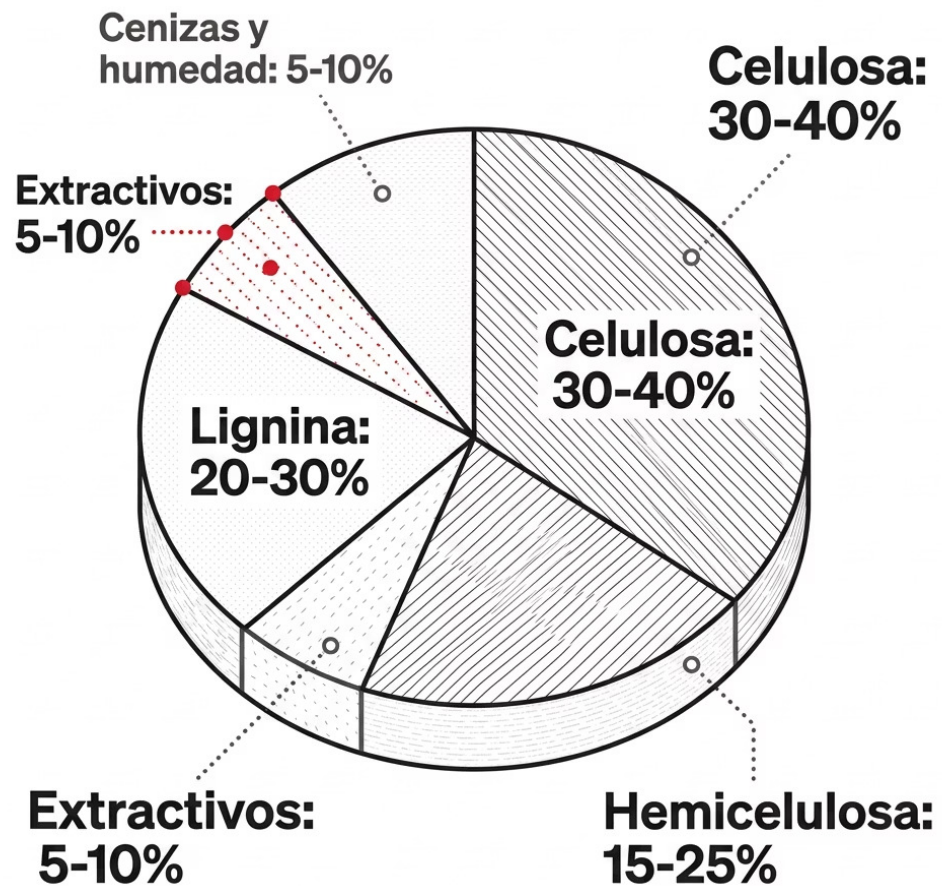
Modelo integral de biorrefinería: productos, subproductos, balances y viabilidad económica

Alcance

Pretratamiento, conversión, valorización energética, CAPEX/OPEX y casos de estudio



Composición y Pretratamiento de la Cáscara de Almendra



Procesos de Pretratamiento Clave

Autohidrólisis

Extracción hemicelulósica a 170–200°C. Obtención de licor rico en XOS: hasta **22.12 g/L** [Morales et al., 2020]

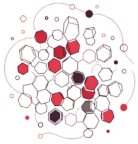
Delignificación Alcalina

NaOH o Ca(OH)₂. Pureza de lignina obtenida: **~90%**. Preferible en ACV frente a organosolv.

Organosolv

Solventes orgánicos (etanol/agua). Lignina de alta calidad; mayor costo operativo y ambiental.

Productos de Alto Valor Añadido



Celulosa Nanocristalina (CNC)

Fracción celulósica del sólido deslignificado. Aplicaciones: refuerzos en polímeros, recubrimientos y biomedicina.



Glucosa

Hidrólisis enzimática de la celulosa. Fermentable a etanol (biocombustible) o ácido láctico (bioplásticos).



Lignina de Alta Pureza (~90%)

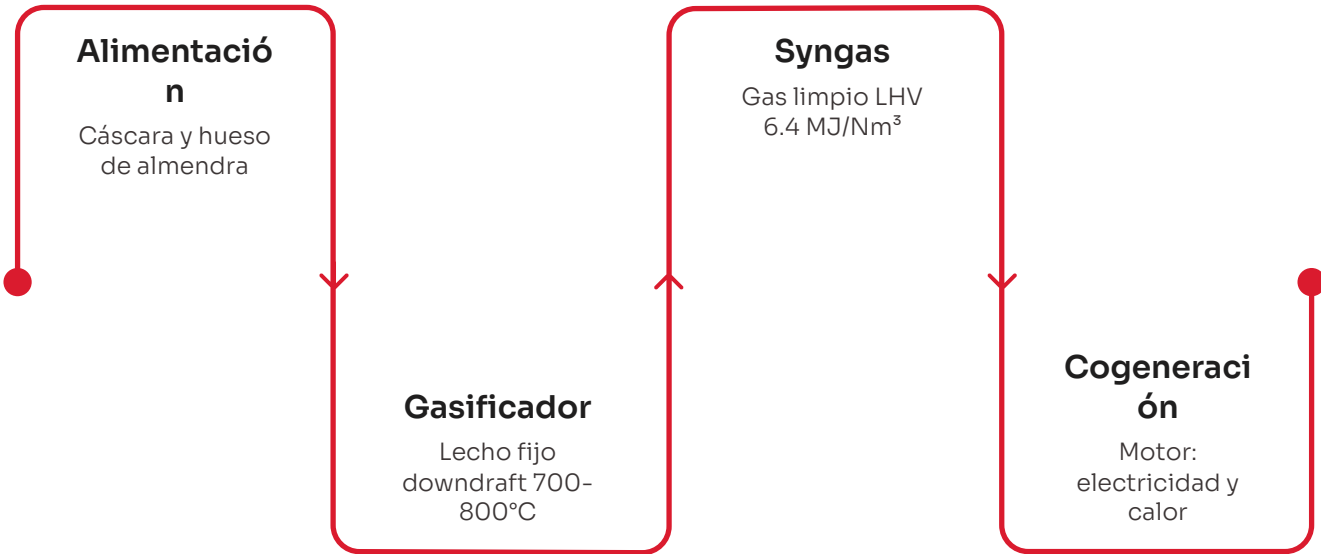
Post-delignificación. Usos: aditivos para cemento, resinas fenólicas, dispersantes y precursor de carbón activo.



Xilooligosacáridos (XOS)

Fracción hemicelulósica (autohidrólisis). Prebióticos de alto valor en industria alimentaria y nutracéutica.

Subproductos y Valorización Energética: Gasificación



Eficiencia de gas frío: **68.9%** | Conversión de carbono: **70.2%** | Rendimiento de syngas: **1.9 Nm³/kg**

Indicadores de Viabilidad (100 kg/h — 100 kWh)

1

VAN

US \$ 204,300 [Carmo-Calado et al., 2023]

2

TIR

20.84% — Atractivo para inversión industrial

3

Payback

5.7 años — Período de recuperación de inversión

i El sólido residual post-hidrólisis contiene ~78 wt.% de lignina, ideal para cogeneración térmica.

Balances de Masa y Energía

BASE DE CÁLCULO: 1,000 KG DE CÁSCARA SECA

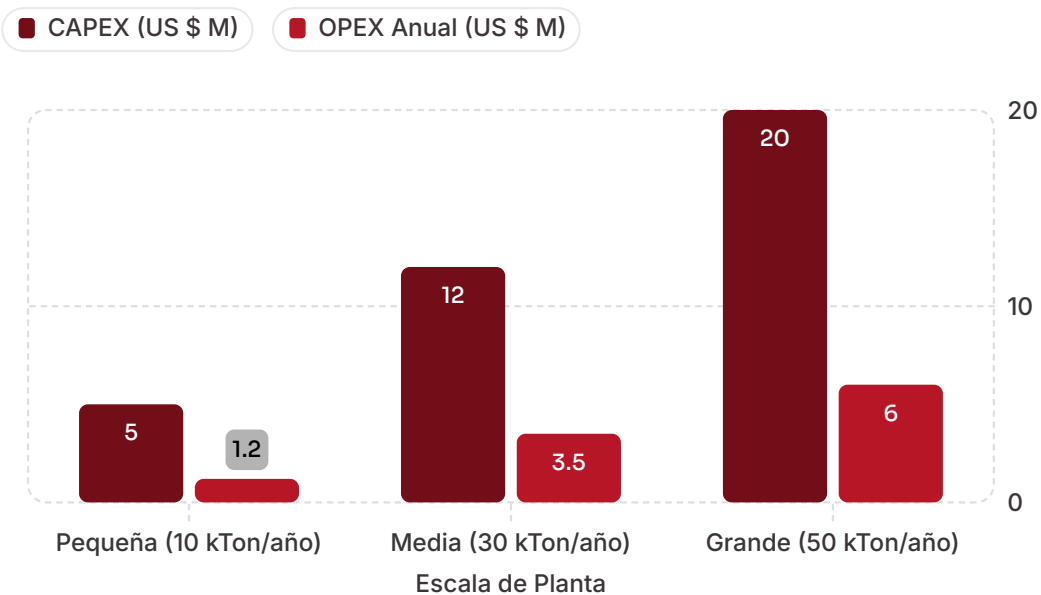
Fracción	Composición (%)	Masa (kg)	Producto Obtenido	Rendimiento Est.
Celulosa	35%	350 kg	Glucosa / CNC	~85% conversión
Hemicelulosa	20%	200 kg	XOS / Xilosa	~60-70% extracción
Lignina	25%	250 kg	Lignina purificada	~90% pureza
Extractivos	8%	80 kg	Compuestos fenólicos	Variable
Cenizas / H ₂ O	12%	120 kg	Purga / Vapor	—

Balance Energético Estimado

- **Autohidrólisis:** ~2.0–2.5 MJ/kg de biomasa (calentamiento a 180°C)
- **Delignificación:** ~1.5–2.0 MJ/kg (reflujo alcalino)
- **Hidrólisis enzimática:** ~0.3–0.5 MJ/kg (temperatura controlada 50°C)
- **Gasificación residual:** Genera ~12.2 MJ/kg de biomasa (LHV syngas)

✓ La gasificación del residuo lignístico puede suplir hasta el **60–70%** de los requerimientos térmicos de la planta.

Análisis Económico: CAPEX y OPEX



Desglose de Costos

Rubro CAPEX	% del Total
Reactores y pretratamiento	35%
Sistema de gasificación	25%
Separación y purificación	20%
Infraestructura civil y control	20%

OPEX típico: **US \$ 100–300 por tonelada** procesada. Los principales drivers son enzimas (~30%), energía (~25%) y mano de obra (~20%).

📌 Rango CAPEX total: **US \$ 5–20 millones** para plantas de 10,000–50,000 ton/año según tecnología y ubicación.

Casos de Estudio y Aplicaciones Industriales

Caso 1 — XOS y Lignina Premium

Foco: Valorización hemicelulósica y lignina de alta pureza.

Mercado: Prebióticos (alimentación) y aditivos para materiales.

Ventaja: Alta rentabilidad por productos de nicho — precio XOS: **US \$ 3,000–8,000/ton**

Caso 2 — Biorrefinería Integral + Bioetanol

Foco: Hidrólisis de celulosa → glucosa → fermentación a etanol.

Mercado: Sector energético y química de base biológica.

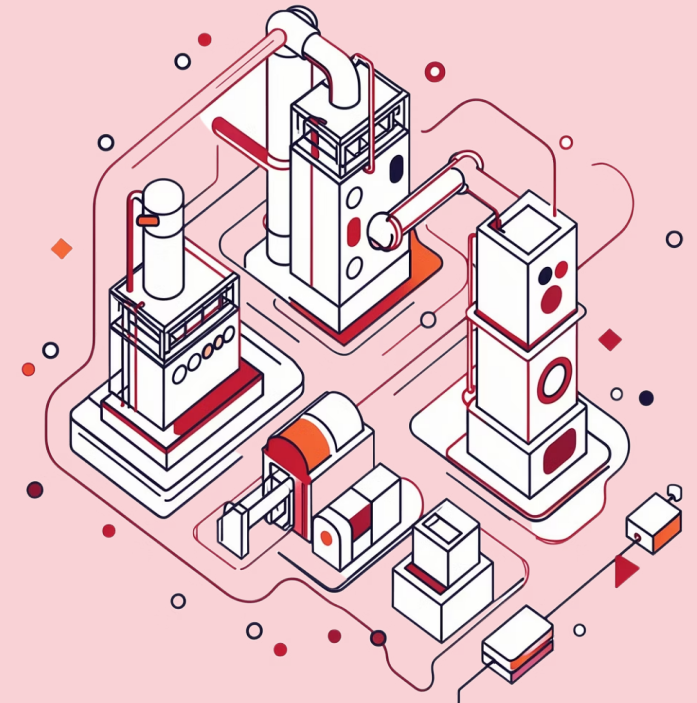
Ventaja: Economía circular completa; valorización de lignina residual por cogeneración.

Caso 3 — Gasificación Descentralizada

Foco: Cáscara + hueso → syngas → electricidad y calor in situ.

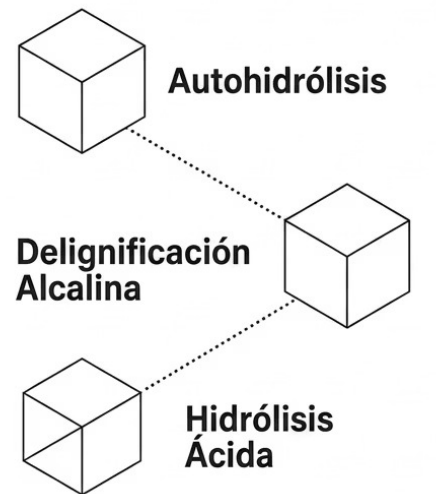
Escala: 100 kg/h biomasa → 100 kWh eléctricos.

Ventaja: VAN **US \$ 204,300**, TIR **20.84%**, payback **5.7 años**.



Consideraciones Ambientales y Sostenibilidad

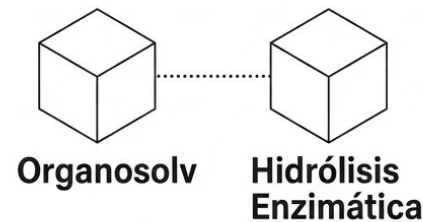
RUTA A



Bajo
impacto
total



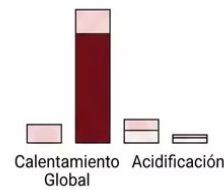
RUTA B



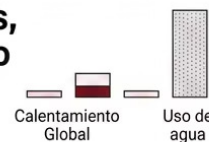
RUTA C



Impacto
medio-alto



Impacto bajo
en emisiones,
mayor en uso
de agua



Resultados Clave del ACV

- La **hidrólisis enzimática** presenta los mayores impactos ambientales por el consumo de enzimas comerciales [Sillero et al., 2021]
- La **delignificación alcalina** es ambientalmente preferible frente a organosolv en 5 de 7 categorías de impacto evaluadas
- La **ruta óptima**: autohidrólisis → delignificación alcalina → hidrólisis ácida minimiza impacto global

✓ La biorrefinería de almendra puede reducir hasta un **40% la huella de carbono** respecto a la disposición convencional del residuo en vertedero.

Conclusiones y Perspectivas Futuras

1 Modelo viable y sostenible

La biorrefinería de cáscara de almendra ofrece valorización integral con rentabilidad demostrada

2 Pretratamiento: factor crítico

La ruta alcalina optimiza simultáneamente pureza de producto e impacto ambiental

3 Escala e integración

La diversificación de productos y la cogeneración son clave para la viabilidad económica

Líneas de I+D Prioritarias

- Optimización de catalizadores y cócteles enzimáticos de bajo costo
- Nuevos materiales de alto valor a partir de lignina (carbón activo, resinas)
- Integración de procesos para máxima eficiencia energética
- Escalado piloto y validación techno-económica en campo

Bibliografía

Morales et al. (2020) *Bioresource Technology*, 315, 123896 · Carmo-Calado et al. (2023) *Agronomy*, 13(9), 2278 · Sillero et al. (2021) *Sustainable Production and Consumption*, 28, 749–759 · Sánchez (2024) *Bioresources and Bioprocessing*, 11(1) · Espinosa Puerta, J.M. (2020) TFG, Universidad de Jaén