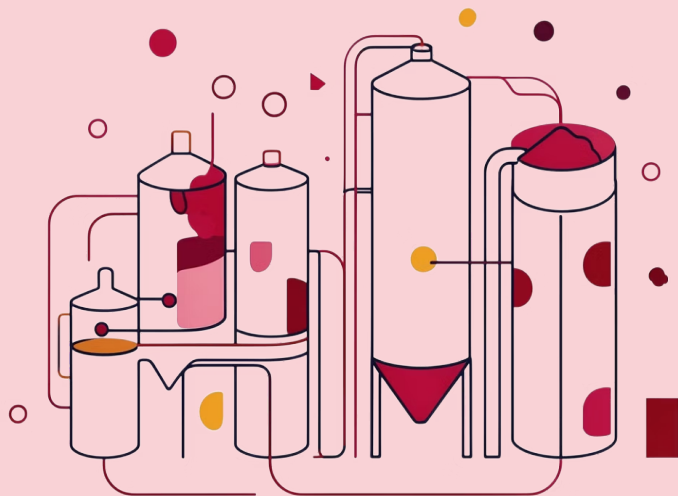




Biorrefinería de Soya: Análisis Integral de Procesos, Productos y Economía Industrial

Una revisión técnica exhaustiva orientada a ingenieros de procesos: balances de masa y energía, productos y subproductos, análisis económico CAPEX/OPEX y casos de estudio reales.

INGENIERÍA DE PROCESOS

BIORREFINERÍA

SOYA INDUSTRIAL

Agenda

01

Conceptualización de la Biorrefinería

Definición, marco conceptual y cadena de valor de la soya

03

Balances de Masa y Energía

Cálculos detallados con ejemplos numéricos

05

Análisis Económico: CAPEX y OPEX

Estimación de costes de capital e inversión y costes operativos

02

Flujos de Proceso y Operaciones Unitarias

Extracción, fraccionamiento, refinado y transformación

04

Productos, Subproductos y Corrientes Residuales

Caracterización y valor comercial de cada fracción

06

Casos de Estudio y Bibliografía

Plantas industriales de referencia mundial y fuentes técnicas

Marco Conceptual: La Biorrefinería de Soya

Una biorrefinería de soya integra múltiples operaciones unitarias para transformar el grano completo en un espectro de productos de alto valor añadido, maximizando el aprovechamiento de biomasa y minimizando residuos.

Composición del Grano

Proteína: 36–40%

Aceite: 18–22%

Hidratos de carbono: 30–35%

Humedad: 11–13%

Cenizas: ~4,5%

Producción Mundial

Cosecha global 2023: ~390 Mt

Principales productores: Brasil, EE.UU., Argentina

Precio referencia: 430–480 USD/t

Capacidad de crushing: ~270 Mt/año

Principio de Biorrefinería

Analogía con la refinería de petróleo: un único flujo de entrada genera múltiples corrientes de productos con diferentes grados de pureza, valor y aplicación industrial o alimentaria.



Diagrama de Flujo de Proceso: Operaciones Unitarias Principales



Productos y Subproductos: Cadena de Valor Completa

A partir de **1.000 kg de soya limpia** se obtienen las siguientes fracciones principales:

Producto / Fracción	Rendimiento (kg/t grano)	Pureza típica	Precio referencia (USD/t)	Aplicación principal
Aceite crudo de soya	185–195	~98% triglicéridos	900–1.100	Alimentación humana, biodiesel, oleoquímica
Harina de soya 48% PB	780–790	48% proteína bruta	380–430	Alimentación animal (aves, porcino, acuicultura)
Lecitina de soya	8–12	60–65% fosfolípidos	900–1.200	Emulsionante en alimentos, farmacia, cosmética
Concentrado proteico (SPC)	40–50*	65–70% proteína	800–1.100	Nutrición animal, formulación de piensos
Aislado proteico (SPI)	25–35*	90–95% proteína	2.500–4.000	Alimentos funcionales, nutrición deportiva
Cáscaras (okara seco)	55–65	~35% fibra cruda	80–120	Fibra dietética, relleno en piensos
Esteroles vegetales	0,3–0,8*	>80% esteroles	8.000–12.000	Nutraceutica, reducción colesterol
Tocoferoles (Vit. E)	0,1–0,3*	30–60% tocoferoles	15.000–25.000	Antioxidante, farmacia, alimentación

*Rendimiento referido a harina base o aceite degomado, no al grano original. PB = proteína bruta.

Balance de Masa: Ejemplo de Cálculo — Planta de 1.000 t/día

Datos de entrada y parámetros de diseño

Corriente	Flujo (t/h)	% sobre alimentación
Grano limpio entrada	41,67	100,0%
Humedad eliminada (secado)	1,25	3,0%
Cáscaras (descascarillado)	2,50	6,0%
Aceite crudo extraído	7,92	19,0%
Hexano recuperado (recirculado)	~3,96	~9,5% (reciclado)
Harina desolventizada (48% PB)	32,08	77,0%
Lecitina (from degumming)	0,42	1,0%
Pérdidas totales proceso	~0,42	~1,0%

i Ecuación de verificación: $41,67 = 1,25 + 2,50 + 7,92 + 32,08 + 0,42 + 0,42 + (\text{hexano reciclado no es pérdida})$. ✓ Cierre de balance $\approx 99\%$.

Fórmulas clave del balance

Rendimiento en aceite:
 $\eta_{\text{aceite}} = (m_{\text{aceite}} / m_{\text{grano}}) \times 100$
 $= 7,92 / 41,67 \times 100 = \mathbf{19,0\%}$

Factor de extracción (hexano):
Aceite residual en harina $\leq 0,5\text{--}1,0\%$
Eficiencia extracción $\geq 97\text{--}99\%$

Conversión harina:
 $\eta_{\text{harina}} = (m_{\text{harina}} / m_{\text{grano}}) \times 100$
 $= 32,08 / 41,67 \times 100 = \mathbf{77,0\%}$

Cierre global del balance:
 $\Sigma \text{ salidas} / \Sigma \text{ entradas} \times 100 \geq 99\%$

Balance de Energía: Consumos y Generación en Planta de 1.000 t/día

Consumos energéticos por operación unitaria

Operación Unitaria	Energía (MJ/t grano)	% del total
Preparación (laminado, cocción)	120–150	~22%
Extracción con hexano	60–80	~12%
Desolventización-tostado (DT)	200–280	~40%
Destilación miscela	80–120	~18%
Refinado aceite	40–60	~8%
Total proceso crushing	500–690 MJ/t	100%

Referencia industrial: Plantas modernas con recuperación de vapor alcanzan consumos netos de 450–550 MJ/t grano. Plantas antiguas sin optimización consumen hasta 800 MJ/t.

Ejemplo de cálculo — Balance térmico del DT

Datos: Capacidad = 41,67 t harina/h; contenido de hexano en masa húmeda = 25%.

Calor de vaporización hexano: $\Delta H_{\text{vap}} = 334 \text{ kJ/kg}$ a 69°C.

Flujo de hexano a evaporar:

$m_{\text{hex}} = 41,67 \times 0,25 = 10,42 \text{ t/h} = 2.894 \text{ kg/h}$

Calor requerido (evaporación):

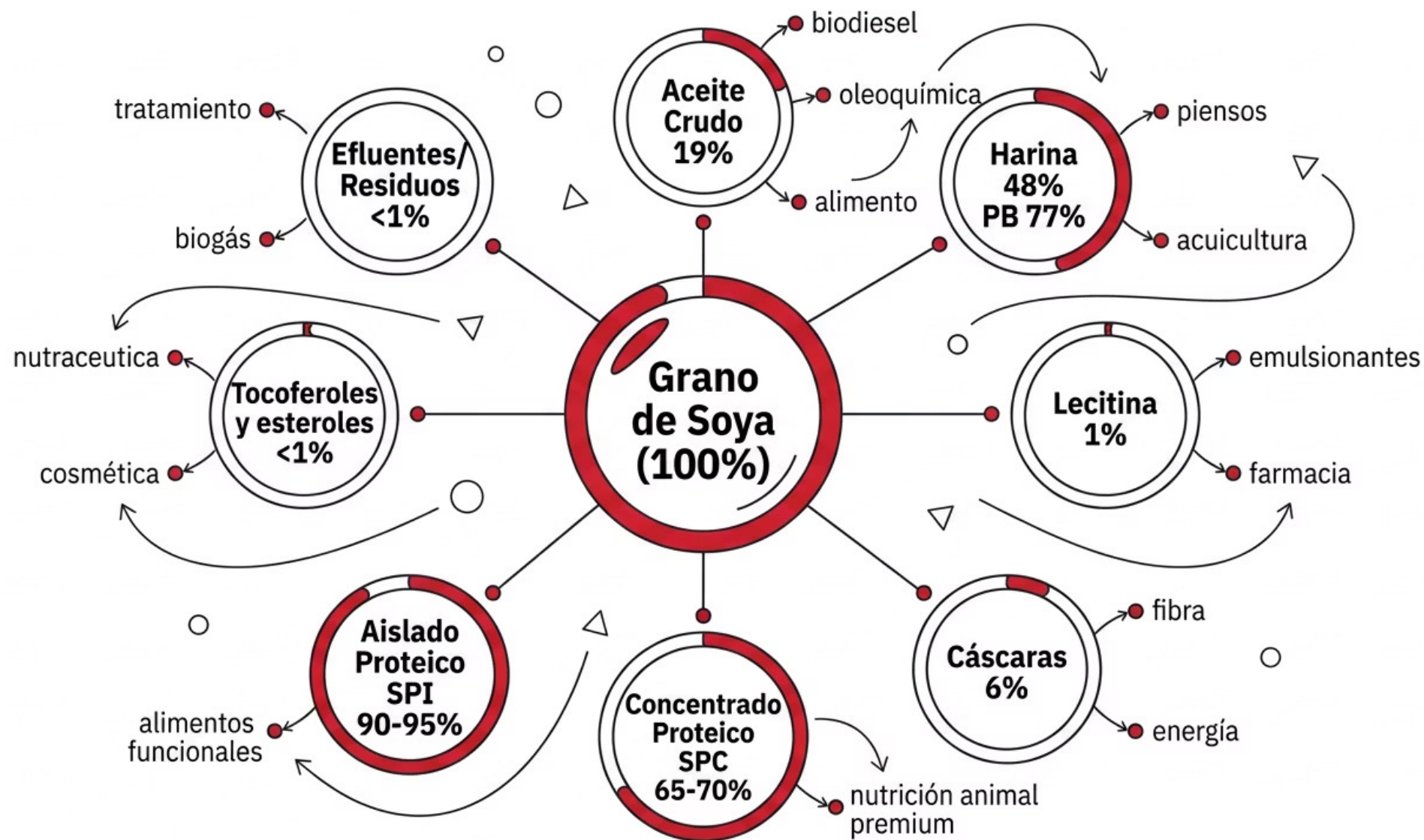
$Q_{\text{evap}} = 2.894 \times 334 = 966.596 \text{ kJ/h} \approx \mathbf{268 \text{ kW-h/h}}$

Vapor necesario (P = 3 bar, H_vap = 2.163 kJ/kg):

$m_{\text{vapor}} = Q_{\text{evap}} / H_{\text{vap}} = 966.596 / 2.163 \approx \mathbf{447 \text{ kg/h}}$

✓ La cogeneración de vapor en caldera biomasa (cáscaras + gas) puede cubrir el 60–80% de esta demanda térmica, reduciendo costes operativos significativamente.

Mapa de Corrientes: Infografía de la Biorrefinería Integral



La biorrefinería de soya es un sistema de conversión altamente integrado donde cada fracción tiene un destino valorizado. La jerarquía de valor va desde las cáscaras (menor valor, uso energético) hasta los tocoferoles y aislados proteicos (mayor valor específico, mercados nicho de alta pureza).

Análisis Económico: CAPEX — Estimación de Inversión de Capital

El CAPEX de una biorrefinería de soya depende fuertemente de la capacidad de procesamiento instalada. Se aplica la **regla de los seis décimos** para escalado: $C_2 = C_1 \times (Q_2/Q_1)^{0,6}$

Área de proceso / Equipo	500 t/día (M€)	1.000 t/día (M€)	2.000 t/día (M€)	% del total (ref. 1.000 t/d)	Notas
Preparación y extracción (Hexano)	18–22	28–35	44–55	~35%	Extractores Rotocell / Crown
Desolventizador-tostador (DT)	6–8	9–12	14–18	~12%	Equipo Desmet Ballestra/Crown
Sistema recuperación hexano	4–6	6–9	9–14	~8%	Destiladores, condensadores
Refinería de aceite (física/química)	5–7	8–11	12–17	~10%	Degomado, neutralización, blanqueo, desodorización
Planta proteínas (SPC/SPI)	10–14	16–22	25–35	~20%	Lavado ácido/alcalino, ultrafiltración
Servicios auxiliares (vapor, agua)	6–8	9–12	14–18	~12%	Cogeneración, EDAR
Civil, estructural, eléctrico	3–5	5–7	8–11	~7%	Obra civil y automatización (DCS)
TOTAL CAPEX estimado	52–70 M€	81–108 M€	126–168 M€	100%	Factor localización ±20%

⚠ Estos rangos son estimaciones Clase 4 (±30%). Para ingeniería de detalle se requieren cotizaciones de proveedores OEM (Desmet Ballestra, Crown Iron Works, Harburg-Freudenberger) y estudio FEED específico.

Análisis Económico: OPEX — Costes Operativos Anuales

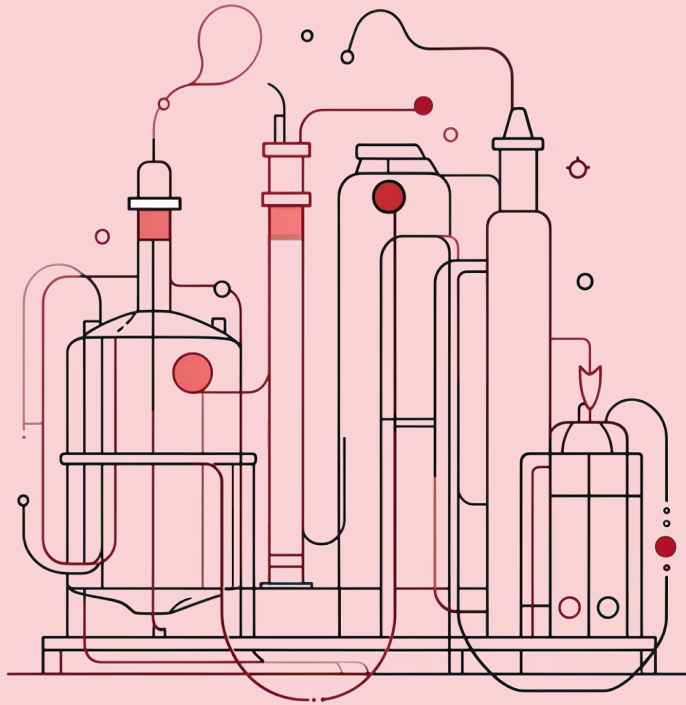
Estructura de costes operativos (ref. 1.000 t/día, 330 días/año)

Partida OPEX	Unidad	Coste/año (M€)	%
Materia prima (soya)	~330.000 t @ 450 €/t	148,5	~82%
Energía eléctrica	~35 kWh/t grano	1,15	~0,6%
Vapor / gas natural	~0,55 GJ/t grano	3,60	~2,0%
Hexano (pérdidas ~0,5 kg/t)	165 t/año @ 800 €/t	0,13	~0,07%
Reactivos (NaOH, ácidos)	Varios	0,80	~0,4%
Mano de obra directa	~60 operarios	3,60	~2,0%
Mantenimiento (2% CAPEX)	Anual	1,90	~1,1%
Seguros, gestión, G&A	~1,5% ingresos	2,70	~1,5%
Tratamiento efluentes	EDAR	0,50	~0,3%
TOTAL OPEX		~162,9 M€/año	100%

Ingresos estimados y margen de proceso

Producto	Producción (t/año)	Ingresos (M€)
Aceite crudo (48% refinado)	60.720	60,7
Harina 48% PB	253.440	101,4
Lecitina cruda	3.960	4,0
SPC / SPI (30% harina)	~8.000	16,0
Cáscaras (uso energético)	19.800	2,0
TOTAL INGRESOS		~184,1 M€

✔ **Margen bruto de proceso:** 184,1 – 162,9 = **21,2 M€/año**
EBITDA margen: ~11,5%
Payback simple: CAPEX 95 M€ / 21,2 M€ = **~4,5 años**



Proceso de Refinado del Aceite: Operaciones y Balances Parciales



Producción de Proteínas de Soya: SPC y SPI

Concentrado Proteico de Soya (SPC) — 65–70% Proteína

Proceso: Lavado de harina desgrasada con etanol 60–80% v/v o solución ácida (pH 4,5) para eliminar azúcares solubles (oligosacáridos: rafinosa, estaquiosa) y factores antinutricionales.

- **Alimentación:** 1.000 kg harina 48% PB
- **Rendimiento SPC:** ~550–620 kg (55–62%)
- **Recuperación proteica:** ~85–90%
- **Corriente residual:** aguas de lavado con azúcares (valorizable como prebióticos)

Aislado Proteico de Soya (SPI) — 90–95% Proteína

Proceso: Extracción alcalina (NaOH, pH 8–9) de harina desgrasada, seguida de precipitación isoelectrica (HCl, pH 4,5) y secado por atomización (*spray drying*).

- **Alimentación:** 1.000 kg harina 48% PB
- **Rendimiento SPI:** ~250–300 kg (25–30%)
- **Recuperación proteica:** ~60–70%
- **Coproducto:** suero de soya (carbohidratos, minerales → fermentación)

 El SPI alcanza precios de 2.500–4.000 USD/t frente a los 380 USD/t de harina base, representando un salto de valor 6–10× con mayor complejidad de proceso.

Caso de Estudio 1: Complejo Industrial ADM — Decatur, Illinois (EE.UU.)

Descripción de la Planta

Archer Daniels Midland (ADM) opera en Decatur uno de los complejos de procesamiento de soya más grandes del mundo. Capacidad de crushing: **~18.000 t/día** de soya. Integra crushing, refinado de aceite, producción de biodiesel (B100), SPI, lecitina, tocoferoles y esteroides.

Indicadores Técnicos y Económicos

CAPEX histórico (expansión 2015–2018): ~850 M USD

Empleos directos: ~4.000

Consumo energético: ~180 MW eléctricos + cogeneración vapor

Recuperación hexano: ≥99,5% (normativa EPA)

Claves de Éxito y Lecciones

La integración vertical desde el campo hasta el producto final (contratos con agricultores), el uso de cogeneración con gas natural y residuos del proceso, y la diversificación hacia biocombustibles y proteínas especiales han sido determinantes para la rentabilidad sostenida frente a la volatilidad del precio de la soya.

Caso de Estudio 2: Planta Bunge — Porto Alegre, Brasil

Contexto y Parámetros de la Planta

Bunge Brasil opera múltiples complejos en el Cerrado y litoral sur. La planta de Porto Alegre procesa **5.000 t/día** de soya, con exportación directa de harina y aceite refinado al mercado europeo.

Capacidad de crushing	5.000 t/día
Producción aceite refinado	~950 t/día
Producción harina 48% PB	~3.850 t/día
Lecitina producida	~50 t/día
Consumo vapor (planta)	~220 t/h
Consumo eléctrico	~18 MW
CAPEX estimado planta	~380–450 M USD

Optimización Energética: Cogeneración

La planta emplea cogeneración con caldera de biomasa (cáscaras de soya + bagazo) que genera **~28 MW eléctricos** y **~180 t/h de vapor**. Esto cubre el 75–80% de la demanda de vapor del proceso sin combustible fósil.



Ahorro energético anual: ~8,5 M USD/año vs. generación en gas natural.

Reducción de CO₂: ~42.000 t CO₂eq/año.

La venta de excedente eléctrico a red añade ~1,2 M USD/año.

Este modelo de cogeneración es replicable en cualquier planta ≥ 2.000 t/día con acceso a biomasa residual propia. El tiempo de retorno de la inversión en la caldera de cogeneración es de 3–4 años.

Subproductos de Alto Valor: Tocoferoles y Esteroles Vegetales



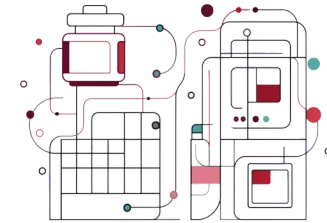
Destilados de Desodorización (SODD)

El condensado de la etapa de desodorización (*Soybean Oil Deodorizer Distillate*) contiene **8–12% tocoferoles** y **12–20% esteroides**. Su rendimiento es de ~3–8 kg/t aceite. Precio del destilado crudo: 1.200–1.800 USD/t.



Proceso de Purificación de Tocoferoles

Mediante destilación molecular (thin-film evaporator, ~200°C, 0,001 mbar) y cromatografía preparativa se obtienen tocoferoles con pureza del 30–60% (mezcla $\alpha, \beta, \gamma, \delta$). El mercado global de tocoferoles naturales supera los **500 M USD/año**.



Esteroides: Purificación y Mercado

La cristalización fraccionada del SODD permite aislar fitosteroides (β -sitosterol, campesterol, estigmasterol) con pureza $\geq 80\%$. Precio: 8.000–12.000 USD/t. Aplicaciones: margarinas funcionales (*flora proactiv*), suplementos cardioprotectores.

Gestión de Efluentes y Sostenibilidad Ambiental

Efluentes Líquidos (EDAR)

Generación: 1,5–3,0 m³/t grano.

DQO entrada: 3.000–8.000 mg/L.

Tratamiento: DAF + biológico aerobio (MBBR) + clarificación.

DQO salida: <200 mg/L.

Emisiones Atmosféricas

Hexano: <0,5 kg/t grano (norma EPA 40 CFR Part 63).

COV: Control con oxidadores térmicos regenerativos (RTO).

Polvo: Filtros de mangas, ciclones (eficiencia >99%).

Residuos Sólidos

Lodos EDAR: 8–15 kg SS/t grano → compostaje o biogás.

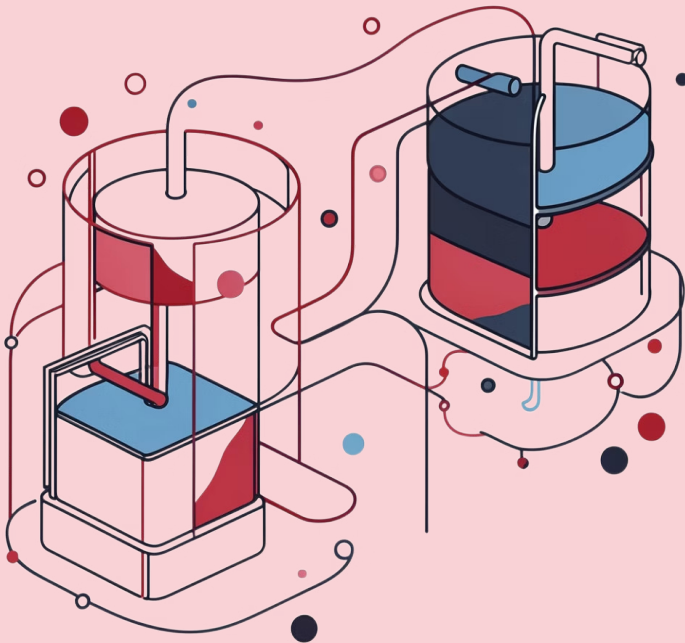
Tierra de blanqueo agotada: 5–8 kg/t aceite → valorización en cementera o vertedero controlado.

Cáscaras: Combustible o pienso.

Huella de Carbono

Intensidad de carbono del crushing: **30–60 kg CO₂eq/t grano** (alcance 1 y 2).

Con cogeneración biomasa: reducción del 40–50%. Herramienta de referencia: ISCC EU, RSPO, RTRS para certificación.



Indicadores de Desempeño Clave (KPI) de la Biorrefinería

99%

Recuperación de Hexano

Pérdidas $\leq 0,5\text{--}1,0$ kg/t grano. Estándar industrial moderno según EPA.

97%

Extracción de Aceite

Aceite residual en harina $\leq 0,5\text{--}0,8\%$. Eficiencia del extractor continuo de lecho profundo.

550

MJ/t grano (consumo)

Energía específica de proceso en planta moderna con recuperación de vapor integrada.

4,5

Años Payback (referencia)

Período de retorno simple para planta 1.000 t/día. Rango real: 3,5–6 años según contexto.

Bibliografía Técnica de Referencia

Libros y Manuales Técnicos

Erickson, D.R. (ed.) — *Practical Handbook of Soybean Processing and Utilization*. AOCS Press / United Soybean Board, 1995.
Referencia estándar en diseño de plantas de crushing.

Johnson, L.A. & Myers, D.J. — *Industrial Uses for Soybeans*, en: *Soybeans: Chemistry, Production, Processing and Utilization*. AOCS Press, 2008. ISBN 978-1-893997-64-6.

Gunstone, F.D., Harwood, J.L., Dijkstra, A.J. — *The Lipid Handbook*, 3rd ed. CRC Press, 2007. Cubre refinado, fraccionamiento y análisis de aceites vegetales.

Turton, R. et al. — *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*, 5th ed. Prentice Hall, 2018. Base para estimación CAPEX/OPEX con método de Lang y Guthrie.

Artículos, Normas y Fuentes de Datos

Becker, E.W. — "Microalgae for aquaculture: nutritional aspects." *J. Appl. Phycol.* 2004. (Contexto comparativo proteínas alternativas).

EPA 40 CFR Part 63, Subpart GGGG — National Emission Standards for Solvent Extraction for Vegetable Oil Production. U.S. EPA, 2002 (actualización 2020). Estándar de control de VOC/hexano.

USDA NASS / ABIOVE / GRASAS Y ACEITES — Estadísticas anuales de producción, crushing y precios de soya y derivados. *Oil World Annual*, ISTA Mielke GmbH, 2023.

Martínez, M.L. et al. — "Characterization of deodorizer distillate from soybean oil." *J. Am. Oil Chem. Soc.* 87: 507–514, 2010. DOI: 10.1007/s11746-009-1511-5.

❑ Para ingeniería de detalle (FEED), se recomienda consultar directamente a proveedores OEM como **Desmet Ballestra** (Bélgica), **Crown Iron Works** (EE.UU.) y **Harburg-Freudenberger** (Alemania), que disponen de software propietario de simulación y bases de datos de rendimiento de sus equipos.