



Biorrefinería de la Aceituna

Análisis técnico integral del procesamiento industrial de *Olea europaea*: productos, subproductos, balances de masa y energía, análisis económico CAPEX/OPEX y casos de estudio reales. Orientado a ingenieros especialistas en procesos industriales.

INGENIERÍA DE PROCESOS

BIORREFINERÍA

ECONOMÍA CIRCULAR

Agenda

01

Composición y caracterización de la aceituna

Fraccionamiento de la drupa y propiedades fisicoquímicas de cada fracción.

02

Flujos de proceso y productos principales

Aceite de oliva virgen, aceitunas de mesa, subproductos sólidos y líquidos.

03

Balances de masa y energía

Metodología y ejemplos de cálculo para una planta de referencia de 10 t/h.

04

Análisis económico CAPEX/OPEX

Estimación de costes de inversión y operación con indicadores financieros clave.

05

Casos de estudio y bibliografía

Instalaciones reales en España, Italia y Marruecos con datos publicados.

Composición y Caracterización de la Aceituna

La aceituna es una drupa compuesta por tres fracciones principales cuya proporción varía significativamente con la variedad, el grado de madurez y las condiciones agronómicas. El conocimiento preciso de esta composición es el punto de partida indispensable para cualquier balance de masa riguroso.

Fracción	% masa fresca	Componentes clave
Pulpa (mesocarpo)	65–83 %	Agua (50–60 %), aceite (10–25 %), azúcares, polifenoles
Hueso (endocarpo)	13–23 %	Lignocelulosa (celulosa 27 %, lignina 38 %), humedad 8–12 %
Piel (epicarpo)	1.5–3.5 %	Ceras, antocianinas, clorofilas

Índice de madurez

Escala 0–7 (Uceda & Frías). Óptimo industrial: IM 3–4 para maximizar rendimiento graso.

Humedad total

40–65 % en aceituna entera. Variable crítica para el diseño de centrifugadoras y secadores.

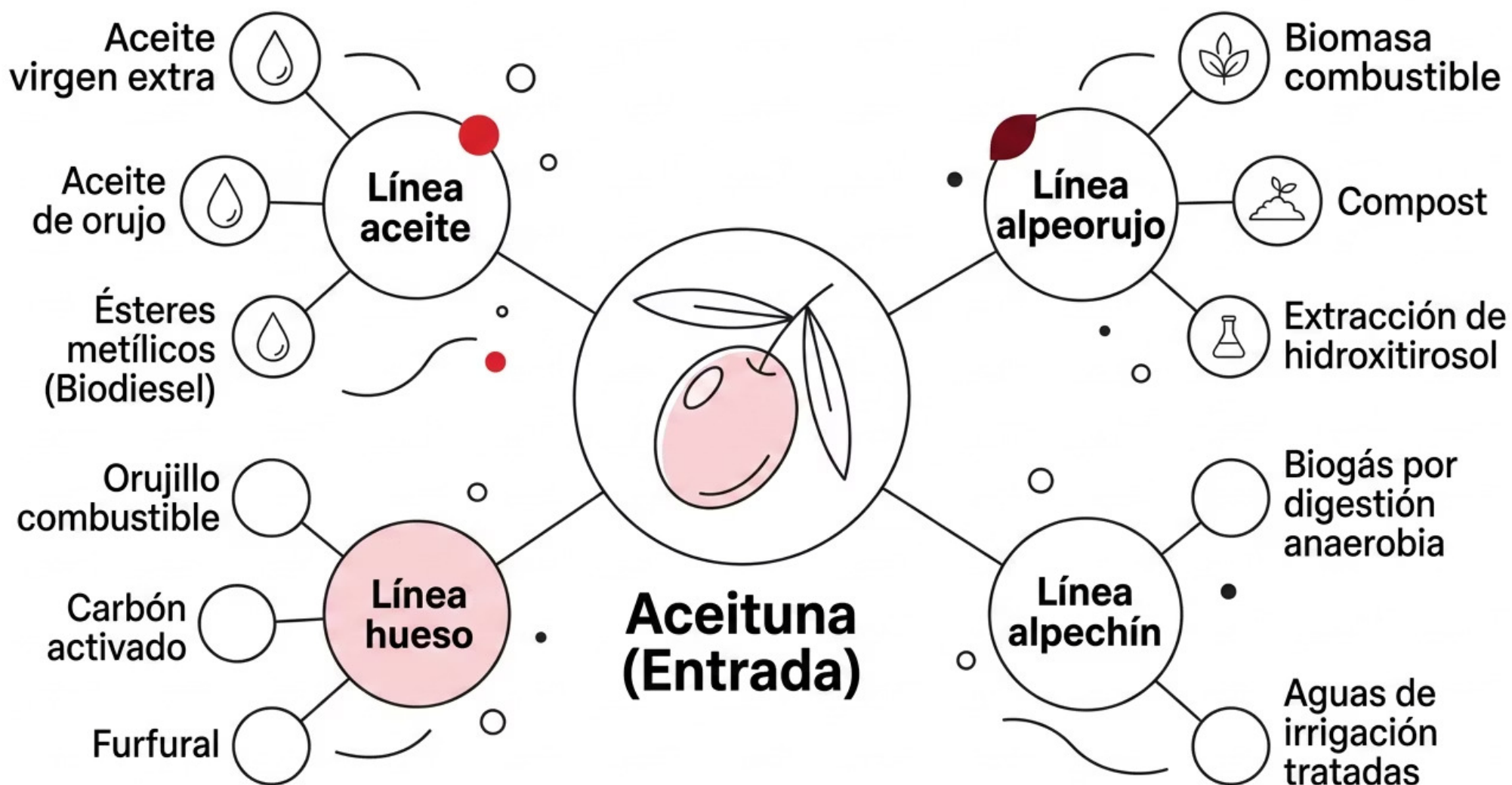
Polifenoles totales

200–800 mg/kg de aceite. Determinan la calidad organoléptica y la estabilidad oxidativa.

i La variedad Picual (España) presenta un contenido graso medio en pulpa de 22–28 % sobre materia seca, frente al 14–18 % de la Arbequina.

Flujos de Proceso: Mapa de la Biorrefinería

La biorrefinería de la aceituna integra múltiples líneas de valorización que transforman cada fracción en productos de alto valor añadido, minimizando residuos según los principios de la economía circular.



Balance de Masa — Planta de Referencia (10 t/h de Aceituna)

Se toma como base de cálculo una almazara moderna de dos fases con decánter horizontal. Los valores indicados corresponden a una variedad Picual con índice de madurez 3.5 y humedad de entrada del 55 %.

Corriente	Flujo (t/h)	Humedad (%)	Observaciones
Aceituna entrada	10.00	55	Base de cálculo
Aceite de oliva virgen	1.60	< 0.2	Rendimiento graso 16 %
Alpeorujo (2 fases)	5.80	60–65	Principal subproducto sólido
Agua de vegetación	2.20	> 95	Carga orgánica 40–80 g DQO/L
Hojas y ramillas	0.15	45	Retiran en limpieza (1.5 %)
Orujillo (tras extracción)	1.25	8–12	PCI ≈ 17 MJ/kg

Ejemplo de cálculo: Rendimiento graso

Dado un contenido graso en pulpa de Faceite = 22 % (b.s.) y humedad H = 55 %:

$$\dot{m}_{aceite} = \dot{m}_{entrada} \times (1 - H) \times F_{aceite} \times \eta_{extracción}$$
$$\dot{m}_{aceite} = 10 \frac{t}{h} \times 0.45 \times 0.22 \times 0.82 = 0.81 \frac{t}{h} \text{ (grasa neta)}$$

Con eficiencia de extracción η = 82 % y factor de corrección por polifenoles, el rendimiento comercial típico oscila entre 1.5 y 1.8 t/h de AOV por cada 10 t de aceituna procesada.

❑ **Verificación:** 1.60 + 5.80 + 2.20 + 0.15 + 0.25 (pérdidas) = 10.00 t/h ✓

Balance de Energía — Consumos y Recuperaciones

Demanda energética del proceso

Etapa	Consumo térmico (kWh/t aceituna)	Consumo eléctrico (kWh/t aceituna)
Molturación	0	4–6
Batido (termobatidora)	18–25	2–3
Decantación centrífuga	0	8–12
Secado alpeorujo	120–160	6–10
Extractor hexano (orujo)	80–110	12–18
TOTAL	218–295	32–49

- ✔ La combustión del orujillo generado (1.25 t/h × 17 MJ/kg) aporta ~21 MW térmicos, cubriendo entre el 70 y el 90 % de la demanda de calor de la planta.

Ejemplo: Balance en caldera de biomasa

$$Q_{disponible} = \dot{m}_{orujillo} \times PCI \times \eta_{caldera}$$

$$Q_{disponible} = 1,250 \frac{kg}{h} \times 17,000 \frac{kJ}{kg} \times 0.82 \approx 17,425 \frac{MJ}{h}$$

$$Q_{demanda} = 10 \frac{t}{h} \times 260 \frac{kWh}{t} \times 3.6 = 9,360 \frac{MJ}{h}$$

El excedente térmico (~8,065 MJ/h) puede destinarse a generación de vapor para ORC o a red de calor industrial. La autosuficiencia energética es alcanzable en campañas superiores a 2,000 h/año.

82%

Eficiencia caldera

17 MJ

PCI orujillo/kg

70–90%

Autosuficiencia térmica

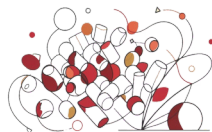
Productos y Subproductos: Valorización Técnica

Cada corriente de la biorrefinería tiene rutas de valorización diferenciadas según su composición. La jerarquía de valor va de los compuestos bioactivos de alta pureza al aprovechamiento energético como última opción.



Aceite de Oliva Virgen Extra

Producto principal (16–20 % sobre aceituna). Precio medio 3–8 €/kg según campaña. Requiere acidez libre < 0.8 % y K_{270} < 0.22. Mercado global de 3.2 Mt/año.



Alpeorujo y Orujillo

58 % del flujo másico. Tras secado y extracción con hexano: aceite de orujo (0.5–1.5 %) + orujillo como combustible sólido (PCI 17 MJ/kg). Mercado energético creciente.



Alpechín → Biogás

Carga DQO 40–80 g/L. Potencial biogás: 0.25–0.35 m³ CH₄/kg DQO. Una planta de 10 t/h genera ~550 Nm³ CH₄/h, equivalente a ~2.2 MW eléctricos en motor de cogeneración.



Polifenoles (Hidroxitirosol)

Corriente de mayor valor añadido: 2–8 kg por tonelada de alpeorujo. Precio mercado: 500–2,000 €/kg. Aplicaciones en nutracéutica, cosmética y conservantes alimentarios.

Análisis Económico: CAPEX

La estimación de inversión se realiza mediante el método de Lang modificado (factor f = 4.8 para plantas de proceso fluido-sólido) sobre los costes de equipos principales en acero inoxidable AISI 316. Datos referidos a una planta de 10 t/h de aceituna con extracción de polifenoles integrada.

Equipo principal	Coste equipo (k€)	Coste instalado (k€)
Molino martillos (2x5 t/h)	85	136
Termobatidoras (4 x 2.5 t/h)	120	192
Decánter centrífugo horizontal (2x)	340	544
Centrífuga vertical (pulidora)	95	152
Secador de alpeorujo (rotativo)	280	448
Extractor de hexano	650	1,040
Unidad extracción polifenoles	420	672
Caldera de biomasa (5 MW)	380	608
Planta biogás (alpechín)	310	496
Edificación, civil e instrumentación	—	850
TOTAL CAPEX	2,680	5,138

Cálculo por método de Lang

$$C_{total} = f_{Lang} \times \sum C_{equipos}$$

$$C_{total} = 4.8 \times 2,680 \text{ k€} \approx 12,900 \text{ k€}$$

La diferencia entre el método de Lang (12.9 M€) y la estimación detallada (5.1 M€) refleja que el factor f = 4.8 sobreestima para plantas de tamaño medio con bajo contenido en instalaciones de control avanzado. Se recomienda el método modular de Guthrie para estimaciones clase II (±20 %).

⚠ El CAPEX de la unidad de extracción con hexano incluye costes de seguridad ATEX: sala de control presurizada, detectores de gases y sistema de inertización con N₂.

Análisis Económico: OPEX e Indicadores Financieros

Costes operativos anuales (campaña 1,800 h/año)

Partida	k€/año	% OPEX
Materia prima (aceituna)	2,700	41.5 %
Energía eléctrica (red)	380	5.8 %
Reactivos (hexano, agua)	210	3.2 %
Mano de obra directa (18 op.)	720	11.1 %
Mantenimiento (2.5 % CAPEX)	128	2.0 %
Gestión residuos (alpechín)	95	1.5 %
Amortización (15 años lineal)	342	5.3 %
Otros (seguros, admin.)	940	14.5 %
TOTAL OPEX	5,515	100 %

Ingresos y rentabilidad proyectada

Producto	Producción (t/año)	Precio (€/t)	Ingreso (k€/año)
AOVE	2,880	3,800	10,944
Aceite de orujo	504	1,200	605
Orujillo (energía)	2,250	85	191
Biogás (electricidad)	3,960 MWh	120 €/MWh	475
Hidroxitirosol (98%)	14.4	800,000	11,520
TOTAL INGRESOS	—	—	23,735

18.2M€

EBITDA anual estimado

3.4 años

Payback simple

28%

TIR proyecto (10 años)

❑ El hidroxitirosol representa el 48.6 % de los ingresos totales pese a ser una corriente minoritaria en masa. La decisión de incluir esta unidad es determinante para la viabilidad económica del proyecto.

Casos de Estudio

A continuación se presentan tres instalaciones industriales reales con diferentes estrategias de valorización, que ilustran la variabilidad en configuraciones tecnológicas y resultados económicos.

Oleícola San Francisco — Jaén, España

Capacidad: 60 t/h aceituna (variedad Picual). **Configuración:** sistema de 2 fases con valorización de alpeorujo en extractora propia y planta de biogás de 1.2 MW. **Resultado:** autosuficiencia energética total desde 2019. Reducción de emisiones de 3,200 tCO₂/año. **Ref.:** Jiménez et al., *Bioresource Technology*, 2021.

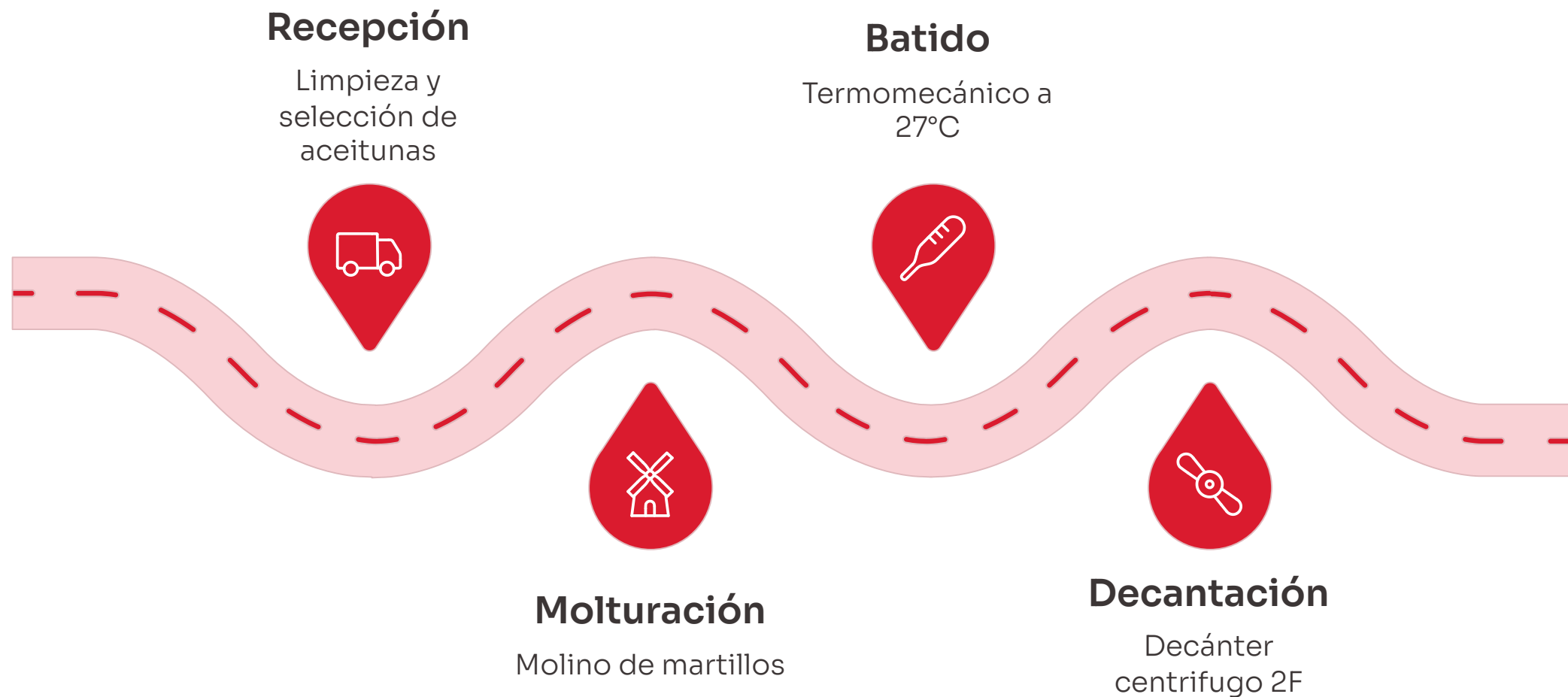
Cooperativa Agro-olearia — Puglia, Italia

Capacidad: 25 t/h (variedades Coratina y Leccino). **Innovación:** primera planta europea con extracción de polifenoles a escala industrial certificada EFSA. Produce 8 t/año de hidroxitirosol 95 %. **Resultado:** incremento del margen bruto del 42 % respecto a la almazara convencional. **Ref.:** Servili et al., *OCL Journal*, 2020.

Huilerie Moderne — Meknès, Marruecos

Capacidad: 15 t/h (variedades Picholine marroquí y Arbequina). **Desafío:** alta concentración de alpechín (75 g DQO/L) por uso de sistema de 3 fases tradicional. **Solución:** lagoon anaerobio de alta tasa (UASB) → 0.28 m³ CH₄/kg DQO. **Resultado:** cumplimiento normativa marroquí 2023, reducción OPEX en 18 %. **Ref.:** El Hajjouji et al., *Journal of Cleaner Production*, 2022.

Diagrama de Flujo del Proceso: Sistema de Dos Fases



Bibliografía y Referencias Técnicas

Artículos científicos

Servili, M. et al. (2020). "Main phenolic compounds in olive oil and their relationship with quality parameters." *OCL Journal*, 27, 28. DOI: 10.1051/ocl/2020022

Jiménez, A. et al. (2021). "Energy integration in olive oil extraction: a systematic review." *Bioresource Technology*, 331, 125031. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.125031

El Hajjouji, H. et al. (2022). "Anaerobic treatment of olive mill wastewater: UASB performance." *Journal of Cleaner Production*, 340, 130812.

Federici, F. et al. (2019). "Biorefinery of olive oil production waste: life cycle assessment." *Journal of Cleaner Production*, 238, 117899.

Normativa, libros y bases de datos

COI (Consejo Oleícola Internacional). Norma comercial aplicable al aceite de oliva y al aceite de orujo de oliva. COI/T.15/NC n.º 3/Rev. 14. Madrid, 2021.

Turton, R. et al. (2018). *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*, 5.ª ed. Prentice Hall. ISBN: 978-0-13-512966-1. [Método de estimación CAPEX]

ASPENTECH (2023). Aspen Process Economic Analyzer v14. Base de datos de costes de equipos para estimaciones clase III.

EFSA (2017). "Hydroxytyrosol and protection of LDL particles from oxidative damage." *EFSA Journal*, 15(4), e04728. Claim aprobado Reglamento UE 432/2012.