

Biorrefinería de la Palta

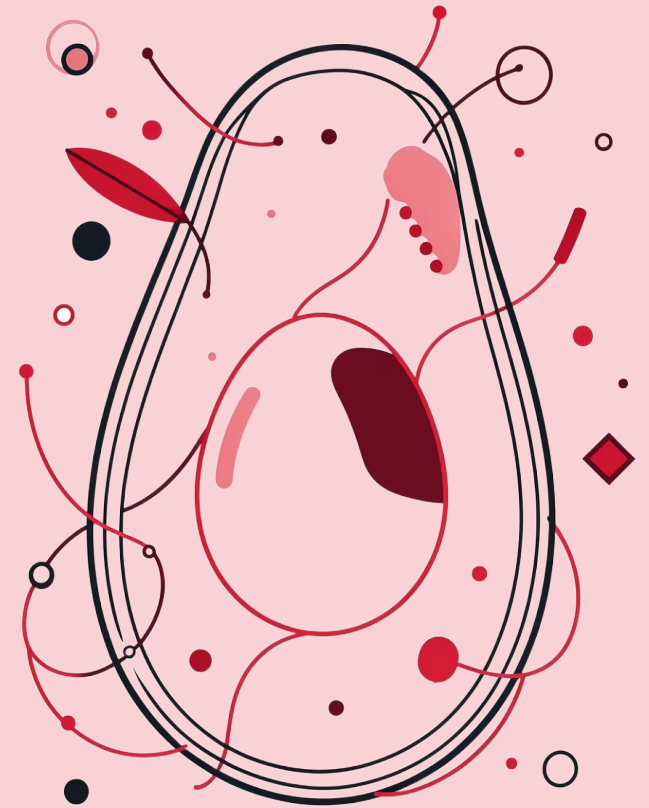
Valorización integral de *Persea americana*: productos, subproductos, balances de masa y energía, análisis económico y casos de estudio

Una presentación técnica dirigida a ingenieros especialistas en procesos industriales, con enfoque en la optimización de recursos, eficiencia energética y rentabilidad económica del procesamiento integral de la palta.

INGENIERÍA DE PROCESOS

BIORREFINERÍA

PERSEA AMERICANA



Índice de Contenidos

Esta presentación cubre el ciclo completo de valorización de la palta, desde la anatomía del fruto hasta el análisis económico de planta industrial.

01

Composición y anatomía del fruto

Fraccionamiento de pulpa, semilla y cáscara con datos cuantitativos.

02

Productos y subproductos

Aceite de alta calidad, harina, extractos funcionales y biogas.

03

Balances de masa y energía

Diagramas de flujo con ejemplos de cálculo numérico detallados.

04

Análisis económico CAPEX/OPEX

Costos de inversión, operación y análisis de rentabilidad.

05

Casos de estudio y bibliografía

Instalaciones reales en Chile, México y España con resultados publicados.

Composición y Fraccionamiento del Fruto

La palta presenta una estructura tripartita bien diferenciada. Conocer la composición cuantitativa de cada fracción es el punto de partida para diseñar cualquier proceso de biorrefinería eficiente.

Fracción	% Masa fruta fresca	Humedad (%)	Lípidos (%bs)
Pulpa	60–70 %	72–80	15–30
Semilla (hueso)	13–18 %	40–55	1–3
Cáscara	8–15 %	65–75	2–5
Subproductos mixtos	5–10 %	Variable	Variable

Fuente: FAO, 2020; Flores et al., 2019 — valores promedio para cv. Hass.

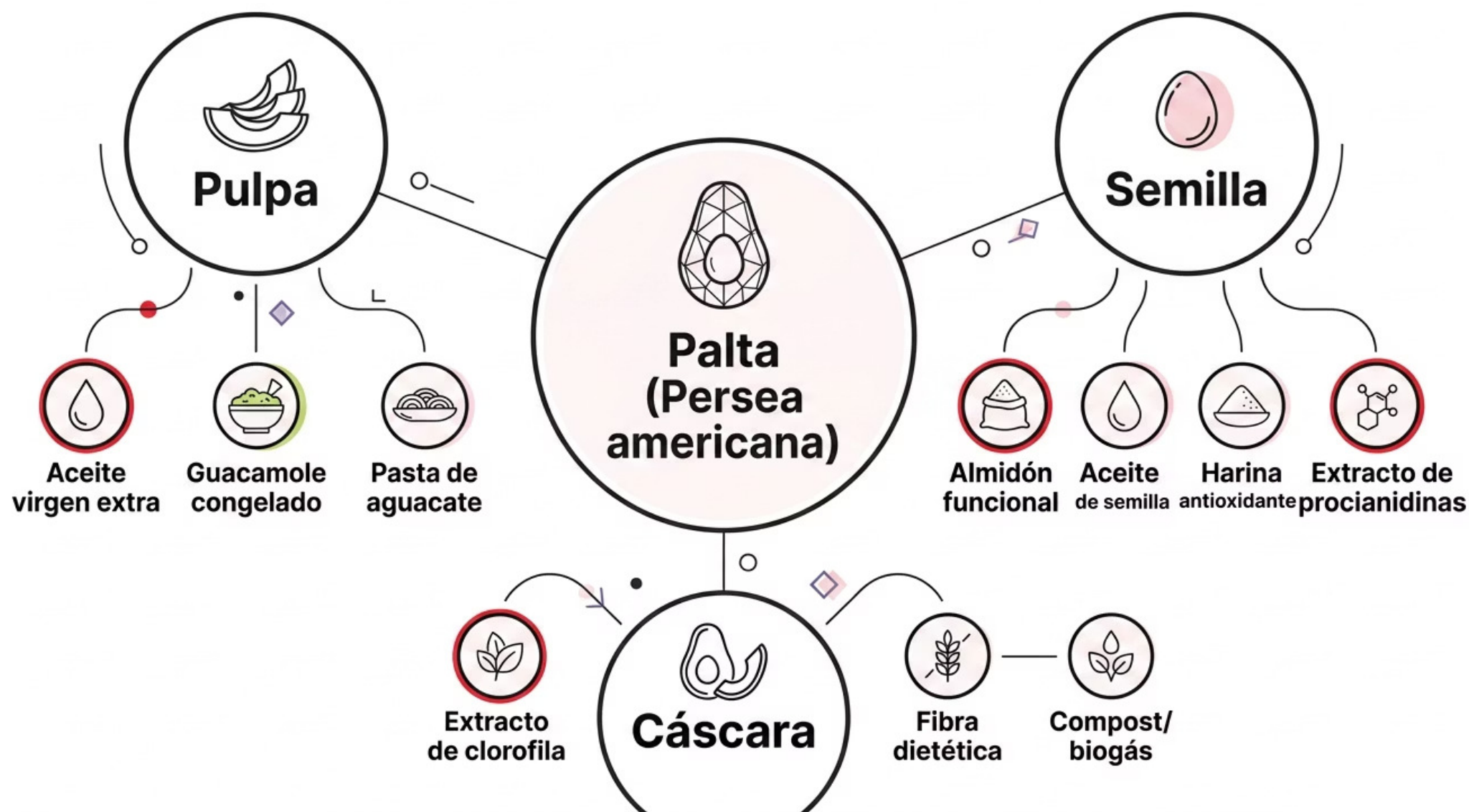
Variedad Hass: referencia industrial

La variedad Hass representa >80 % de la producción mundial comercial. Su contenido graso de la pulpa (15–30 % en base húmeda) la convierte en la más rentable para extracción de aceite virgen extra.

La semilla aporta 4–11 % de aceite y hasta 40 % de almidón, ambos con alto valor de mercado en cosmética y nutrición funcional.

Mapa de Productos y Subproductos de la Biorrefinería

El enfoque de biorrefinería permite generar valor simultáneo a partir de las tres fracciones del fruto, minimizando residuos y maximizando ingresos por tonelada de materia prima procesada.



El rendimiento económico de una biorrefinería integrada puede superar en un **35-50 %** al de una instalación que solo produce aceite, según estudios de Domínguez-Robles et al. (2021) y Nobre et al. (2021).

Procesos de Extracción: Aceite de Pulpa y Semilla

Aceite de Pulpa — Extracción Centrífuga (proceso húmedo)

1. Recepción y lavado

Control de temperatura ≤ 15 °C para evitar oxidación fenólica.

2. Deshuese y triturado

Molino de martillos: tamaño de partícula 3–5 mm; $T = 25\text{--}30$ °C.

3. Malaxado

30–40 min a 27 °C; favorece coalescencia de glóbulos grasos.

4. Centrifugación horizontal (decánter)

2500–3500 rpm; separación aceite / alpechín / sólidos.

5. Centrifugación vertical (pulidora)

Rendimiento final: 85–92 % del aceite extraíble. Acidez libre $\leq 0,5$ %.

Aceite de Semilla — Extracción por Solvente (Hexano)

1. Secado de semilla

Temperatura: 60–70 °C hasta HR ≤ 8 %; evita hidrólisis de almidón.

2. Molienda fina

Partícula $< 0,5$ mm; aumenta superficie de contacto con solvente.

3. Extracción Soxhlet / continua

Hexano n-hexano técnico; ratio solvente:sólido = 6:1 (v/m); 60 °C, 4–6 h.

4. Evaporación y recuperación

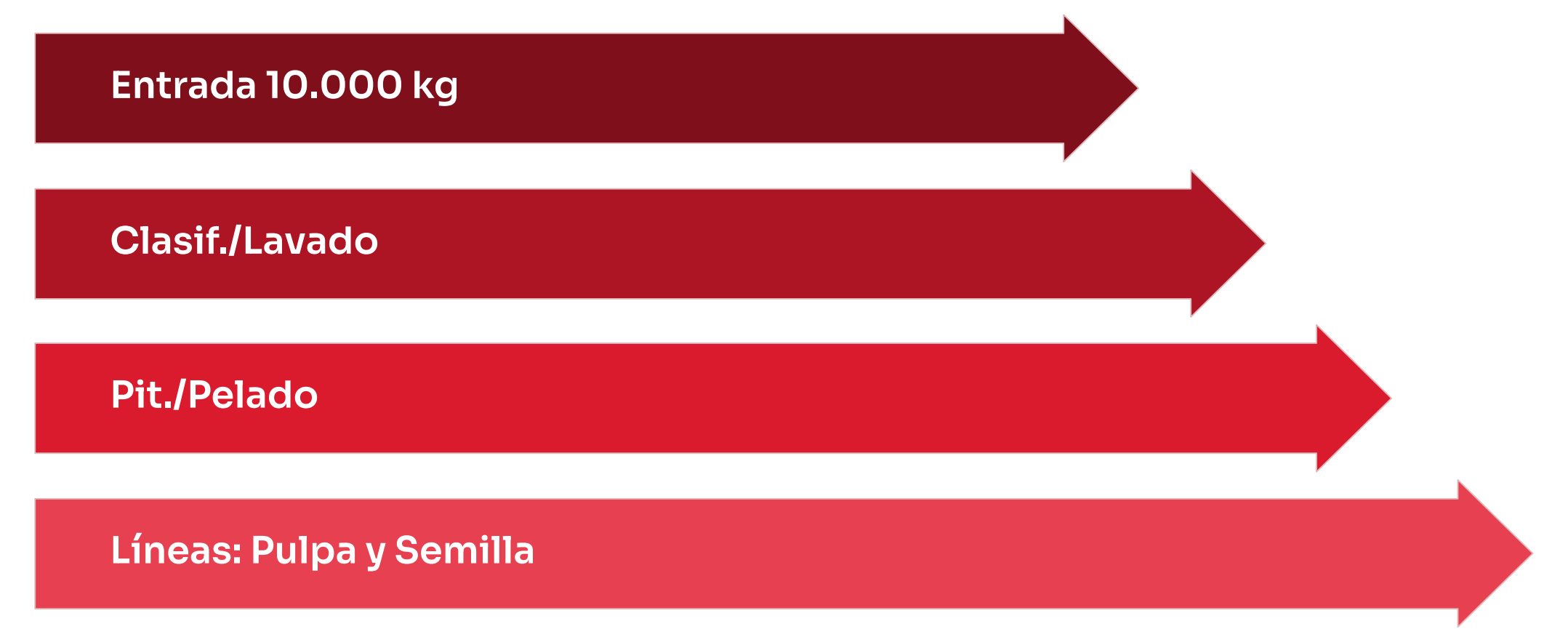
Evaporador rotatorio; recuperación solvente > 95 %. Torta desengrasada → harina.

5. Refinación opcional

Desgomado, neutralización, blanqueo y desodorización para grado cosmético.

Balance de Masa: Planta de 10 t/día de Palta Fresca

El siguiente balance corresponde a una planta de escala semi-industrial procesando 10.000 kg/día de palta entera (variedad Hass, 68 % pulpa, 15 % semilla, 12 % cáscara, 5 % rechazo). Todos los valores en **kg/día**.



Corriente	Caudal (kg/día)	Humedad (%)	Destino/Uso	Valor estimado (€/kg)
Aceite de pulpa (EVOO)	1 020	≤ 0,2	Alimentario / Cosmético	12–18
Alpechín (agua de vegetación)	4 590	94	Tratamiento / Biogas	—
Orujo húmedo de pulpa	1 190	65	Compostaje / Biogás	0,05
Aceite de semilla	67	≤ 0,5	Cosmético	20–35
Harina funcional de semilla	1 050	8	Alimentario / Nutraceutical	3–6
Extracto cáscara	180	Variable	Farmacéutico	40–80

✔ **Ejemplo de cálculo — Rendimiento aceite pulpa:** Contenido lípidos pulpa = 6.800 kg × 0,22 (base húmeda) = 1.496 kg aceite teórico. Eficiencia centrífuga = 68 % → Aceite recuperado = 1.496 × 0,68 ≈ **1.017 kg/día** ✓ (concuerda con tabla).

Balance de Energía y Utilidades

El análisis energético es crítico para determinar la sostenibilidad del proceso. La mayor demanda energética se concentra en las etapas de secado, malaxado y evaporación de solvente.

Operación unitaria	Consumo térmico (MJ/t palta)	Consumo eléctrico (kWh/t palta)
Lavado y clasificación	—	3,5
Triturado + Malaxado	18,5	12,0
Centrifugación (2 etapas)	—	22,0
Secado de semilla	95,0	4,0
Extracción + Evaporación solvente	120,0	8,0
Refrigeración y almacenamiento	—	15,0
TOTAL	233,5	64,5

Base: 1 tonelada métrica de palta fresca procesada. Fuente: elaboración propia con datos de Salazar-López et al., 2020.

Potencial de Autosuficiencia Energética

El biogás generado por digestión anaerobia del alpechín y orujo puede cubrir una fracción significativa de la demanda térmica:

0,35

Nm³ CH₄/kg SV

Potencial metanogénico del alpechín

62%

Demanda térmica cubierta

Con biogás de residuos propios (estimación)

📌 **Cálculo ejemplo:** Alpechín 4.590 kg/día × 0,06 kg SV/kg × 0,35 Nm³ CH₄/kg SV × 35,8 MJ/Nm³ = **3.459 MJ/día** disponibles ≈ 346 MJ/t palta.

Análisis Económico: CAPEX y OPEX

Los valores siguientes corresponden a una planta de procesamiento de **10 t/día** (250 días operativos/año = 2.500 t/año), en un emplazamiento de Europa meridional o Latinoamérica, con grado de estimación AACE Clase 4 ($\pm 30\%$).

CAPEX — Inversión de Capital ($\times 10^3$ €)

Partida	Coste (k€)	% Total
Equipos principales (decánter, molino, secador)	850	38 %
Instrumentación y control (SCADA)	220	10 %
Instalaciones civiles y almacenamiento	430	19 %
Servicios (vapor, agua, electricidad)	310	14 %
Digestor anaerobio + antorcha	190	9 %
Ingeniería, puesta en marcha, contingencia	230	10 %
TOTAL CAPEX	2.230	100 %

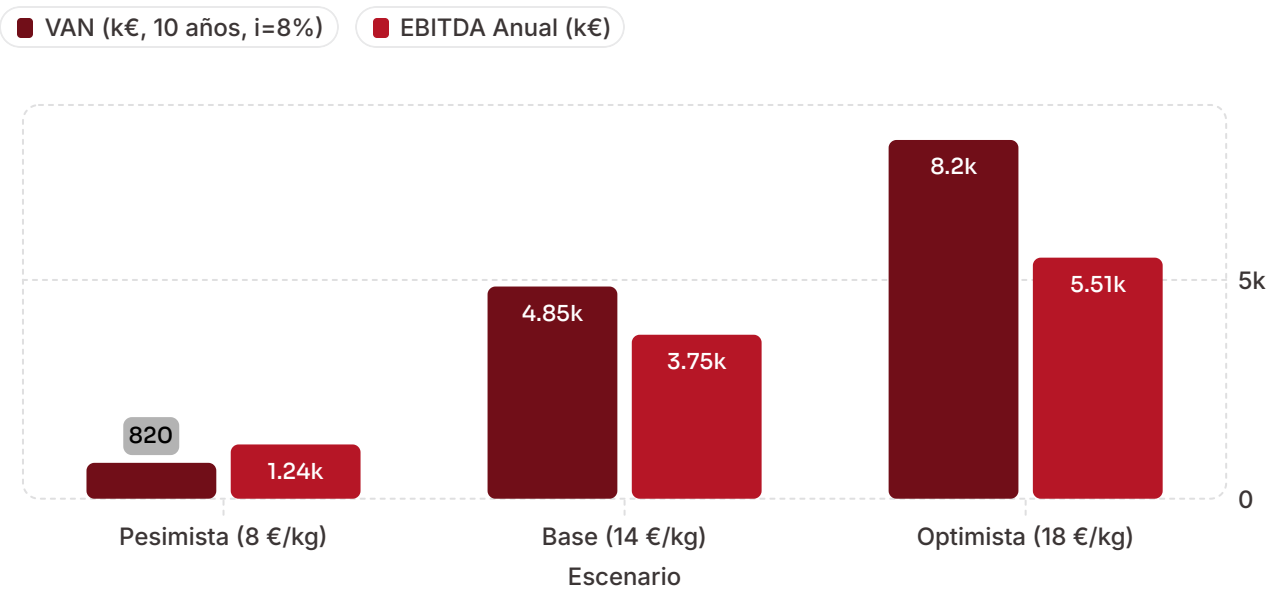
OPEX — Costes Operativos Anuales ($\times 10^3$ €/año)

Partida	Coste (k€/año)	% Total
Materia prima (palta industria)	500	36 %
Mano de obra (12 operarios + técnicos)	380	27 %
Energía eléctrica + gas natural	165	12 %
Mantenimiento (3 % CAPEX)	67	5 %
Solvente hexano (reposición 5 %)	45	3 %
Gestión residuos y certificaciones	80	6 %
Amortización (10 años, lineal)	155	11 %
TOTAL OPEX	1.392	100 %

✔ **Ingresos estimados anuales:** Aceite pulpa: $1.020 \text{ kg/día} \times 250 \text{ días} \times 14 \text{ €/kg} = \mathbf{3.570 \text{ k€}}$ | Harina semilla: $1.050 \times 250 \times 4 = \mathbf{1.050 \text{ k€}}$ | Otros productos: $\sim \mathbf{520 \text{ k€}}$ → **EBITDA $\approx 3.748 \text{ k€/año}$** → **Payback $\approx 0,6$ años** (escenario optimista, precio aceite premium).

Rentabilidad y Análisis de Sensibilidad

El VAN y la TIR varían significativamente con el precio de venta del aceite de pulpa, que representa el principal vector de ingresos. Se analizan tres escenarios: pesimista (precio 8 €/kg), base (14 €/kg) y optimista (18 €/kg).



Indicadores Financieros Clave

8%

Tasa de descuento

Tasa usada para el cálculo del VAN (WACC referencia sector agroalimentario)

2,1

Años Payback (escenario base)

Tiempo de recuperación de inversión en condiciones normales de mercado

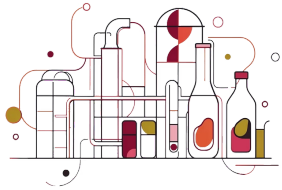
47%

TIR (escenario base)

Tasa Interna de Retorno a 10 años; muy por encima del coste de capital

Casos de Estudio Industriales

Se presentan tres instalaciones de referencia que ilustran distintos niveles de integración del concepto biorrefinería de palta, con datos publicados en literatura científica y técnica.



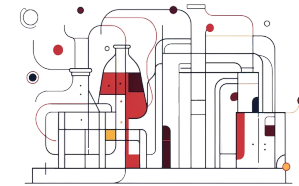
Caso 1 — Chile: Biobío Avocado Oil (Nancagua)

Planta de **25 t/día**, extracción centrífuga en frío, certificación EVOO. CAPEX real: 4,8 M€. Integra digestión anaerobia del alpechín generando 60 % del calor de proceso. Exporta a UE y Japón. *Referencia: ODEPA, 2021; González et al., Food Bioprod. Process., 2022.*



Caso 2 — México: Bioavocado S.A. (Michoacán)

Planta de **50 t/día**, primer país exportador mundial. Valoriza semilla como harina antioxidante (extracto de procianidinas). Ingresos por subproductos: 28 % del total. Payback: 3,2 años. *Referencia: Flores-Jiménez et al., Ind. Crops Prod., 2020.*



Caso 3 — España: Proyecto RETOS-PALTA (Málaga, CSIC)

Planta piloto de **2 t/día**, enfoque farmacéutico: extracción de persina y clorofila de cáscara. Rendimiento económico de cáscara: 65 €/kg de extracto concentrado. En fase de escalado industrial 2024. *Referencia: Domínguez-Robles et al., Molecules, 2021.*

Extractos Funcionales de Alta Valor: Semilla y Cáscara

Las fracciones no comestibles de la palta (semilla y cáscara) son fuente de compuestos bioactivos de elevado valor de mercado en cosmética, farmacia y alimentación funcional. Su correcta extracción puede multiplicar el margen neto del proceso.

Procianidinas (semilla)

Potentes antioxidantes; IC_{50} DPPH $\approx 12 \mu\text{g/mL}$. Extracción: etanol-agua (70:30). Rendimiento: 3–5 % peso seco. Precio de mercado: 200–500 €/kg (grado cosmético).

Almidón de semilla

Contenido: 35–42 % bs. Temperatura de gelatinización 65–72 °C. Alta resistencia a la digestión enzimática → almidón resistente tipo RS3. Precio: 2–4 €/kg (grado alimentario).

Persina (cáscara)

Compuesto antifúngico y anticancerígeno (estudio in vitro). Extracción: hexano o CO_2 supercrítico. Concentración en cáscara: 0,02–0,08 % bs. Grado farmacéutico: > 1.000 €/kg.

Clorofila y carotenoides

Contenido: 0,5–2,5 mg/g bs en cáscara verde. Extracción: acetona fría. Colorante natural E-140; precio: 50–120 €/kg. Inestable a la luz: requiere microencapsulación.



La extracción de persina requiere manejo de solventes orgánicos bajo normativa REACH (UE) y regulación NOM-010-STPS (México). Evaluar solventes verdes (CO_2 supercrítico, etanol) para cumplimiento regulatorio y reducción de costes de gestión de residuos.

Conclusiones y Recomendaciones

1 La biorrefinería integrada maximiza el valor económico

El procesamiento simultáneo de pulpa, semilla y cáscara puede generar ingresos 35–50 % superiores al procesamiento únicamente de aceite, según los casos analizados en Chile, México y España.

3 La rentabilidad es sólida incluso en escenario pesimista

Con un CAPEX de 2,2 M€ para 10 t/día, el VAN es positivo en todos los escenarios analizados ($i = 8\%$). La TIR del escenario base supera el 47 %, con payback inferior a 2,5 años.

2 El balance energético favorece la autosuficiencia

La digestión anaerobia de alpechín y orujo permite cubrir entre el 60 y el 80 % de la demanda térmica, reduciendo el OPEX energético y la huella de carbono del proceso.

4 Los extractos de semilla y cáscara son el vector de crecimiento

Los compuestos bioactivos (procianidinas, persina, clorofila) tienen precios de mercado 10–100 veces superiores al aceite. Invertir en capacidades analíticas y certificación GMP es prioritario para acceder a estos mercados.

Bibliografía de Referencia

Fuentes primarias empleadas en el desarrollo técnico y económico de esta presentación. Se priorizan publicaciones en revistas indexadas (JCR Q1/Q2) y fuentes institucionales de referencia internacional.

Domínguez-Robles et al. (2021)

Valorisation of avocado waste biomass: a refinery approach. **Molecules**, 26(13), 3857. DOI: 10.3390/molecules26133857

Flores-Jiménez et al. (2020)

Physicochemical, compositional and functional properties of avocado seed starch. **Industrial Crops and Products**, 148, 112279.

González et al. (2022)

Energy integration and biogas recovery in avocado oil extraction plants. **Food and Bioproducts Processing**, 131, 45–58.

Nobre et al. (2021)

Avocado biorefinery: production of value-added products from avocado waste. **Bioresource Technology**, 337, 125444.

Salazar-López et al. (2020)

Avocado by-products: Nutritional and functional properties. **Trends in Food Science & Technology**, 105, 201–213.

FAO (2020)

Agrifood systems and avocado — global production, trade and consumption trends. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma.

ODEPA (2021)

Mercado del palto en Chile: producción, exportaciones y cadena de valor. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Ministerio de Agricultura, Chile.

Turatti et al. (2002) — Referencia fundacional

Extração e caracterização do óleo de abacate. **Coletânea do ITAL**, 32(1), 14–19. Primera caracterización cuantitativa del aceite en proceso industrial continuo.

❑ Todas las estimaciones de CAPEX/OPEX son de carácter indicativo (AACE Clase 4, $\pm 30\%$) y deben validarse con ingeniería de detalle y cotizaciones actualizadas de proveedores antes de tomar decisiones de inversión.