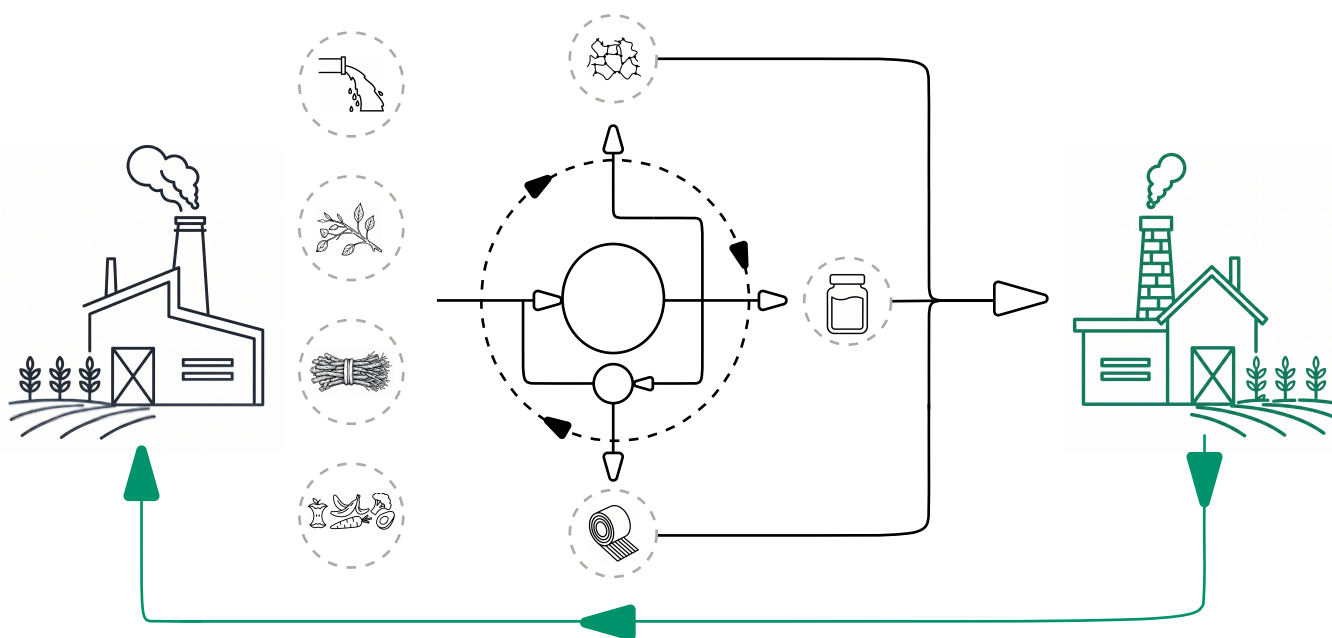


Biorrefinerías de segunda generación

Fundamentos de diseño



Bruno Navajas Preciado
Jonathan Delgado Adámez

OmniaScience

BIORREFINERÍAS DE SEGUNDA GENERACIÓN

FUNDAMENTOS DE DISEÑO

BRUNO NAVAJAS PRECIADO

JONATHAN DELGADO ADÁMEZ

 **OmniaScience**

Biorrefinerías de segunda generación. Fundamentos de diseño

Bruno Navajas Preciado, Jonathan Delgado Adámez

1ra Edición © 2026 OmniaScience (Omnia Publisher SL), Terrassa, Barcelona, España

www.omniascience.com



ISBN: 978-84-129686-7-5

DL: B 14851-2026

DOI: <https://doi.org/10.3926/oms.421>

© Diseño de cubierta: OmniaScience

OmniaScience no se hace responsable de la información contenida en este libro y no aceptará ninguna responsabilidad legal por los errores u omisiones que puedan existir.

ÍNDICE

Autores	7
Abreviaturas	9
Glosario	13
Capítulo 1. Introducción	17
Transformación de la Industria Agroforestal	19
Diseño de Biorrefinerías para Biomosas de Segunda Generación	21
Capítulo 2. Pretratamientos	25
Criterios generales de selección	26
Capítulo 3. Valorizaciones	37
Valor añadido y fracción de biomasa captada	38
Ventana de mercado y riesgo regulatorio	40
Compatibilidad y encadenamiento entre rutas de valorización	41
Arquetipos de planta	42
Capítulo 4. <i>Downstream processing</i>. Etapas iniciales	51
Rutas de diseño según la localización del producto	52
Funciones de las etapas iniciales del <i>downstream processing</i>	54
Selección de tecnologías según las características del efluente	56
Capítulo 5. Etapas finales o purificación	63
Exigencia regulatoria	63
Formato físico final, estabilidad y logística	67
Margen económico, infraestructura y decisión de tecnologías	69

Capítulo 6. Formulado de productos	73
Productos que requieren procesos de polimerización y/o conformado	73
Procesos sumidero	74
Otras técnicas	74
Capítulo 7. Otros considerantes para el diseño de biorrefinerías. Gestión de transferencia de efluentes e insumos	77
Manejo de efluentes (líquidos, sólidos y gases) sin cuellos de botella	77
Circularización de agua y disolventes (cierre de lazos de proceso y reducción de emisiones contaminantes)	78
Eficiencia energética y autosuficiencia	79
Integración de etapas (modularidad “plug-and-play” y diseño en cascada)	79
Capítulo 8. Ventajas de los productos finales y su impacto socioeconómico	81
Capítulo 9. Ejemplo de biorrefinería transversal: Diseño, criterios y resultados esperados	85
Diseño del lineal	85
Consideraciones de diseño	89

AUTORES

Bruno Navajas Preciado

Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura, Avda. Adolfo Suárez s/n, 06007 Badajoz, España.

Tel.: +34 924 01 26 73; correo electrónico: bruno.navajas@juntaex.es

Jonathan Delgado Adámez

Laboratorio agroalimentario de Extremadura, c/ Arroyo Valhondo, 2, 10071 Cáceres, España.

Tel.: +34 927 00 63 10; correo electrónico: jonathan.delgado@juntaex.es

Financiación

Esta obra se ha financiado a través del programa AGROALNEXT que cuenta con apoyo del Ministerio de Ciencia e Innovación, con financiación de la Unión Europea NextGenerationEU, en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR-C17.I1).

Asimismo, Bruno Navajas Preciado agradece la financiación recibida a través de la ayuda PRE2021-097773, financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por el Fondo Social Europeo, “El FSE invierte en tu futuro”.

ABREVIATURAS

Las siglas se definen en su primera aparición y se priorizan las formas españolas consolidadas cuando existen. En caso de usar el texto la siglas anglosajonas, por estar más extendidas, se acompañan dichas siglas con el significado en español.

ABE — Fermentación acetona-butanol-etanol.

ACL — Agua caliente líquida.

AFEX — Expansión de fibra con amoníaco.

AGV — Ácidos grasos volátiles.

ARP — Percolación con amoníaco reciclado.

C/N — Relación carbono/nitrógeno.

C5 — Azúcares de cinco carbonos o pentosas.

C6 — Azúcares de seis carbonos o hexosas.

CAG — Carbón activado granular.

CAP — Carbón activado en polvo.

CEP — Campos eléctricos pulsados.

CHT — Carbonización hidrotermal.

CIP/SIP — Limpieza *in situ* / esterilización *in situ*.

CNC — Nanocristales de celulosa.

CNF — Nanofibras de celulosa.

DA — Digestión anaerobia.

DES — Disolventes eutécticos profundos.

DFC — Dinámica de fluidos computacional.

DQO — Demanda química de oxígeno.

ED/EDR — Electrodialisis / electrodialisis reversible.

FAD — Flotación por aire disuelto.

FDCA — Ácido 2,5-furandicarboxílico.

GEI — Gases de efecto invernadero.

HMF — 5-hidroximetilfurfural.

L/L — Líquido-líquido.

LHT — Licuefacción hidrotermal.

MBBR — Reactor de biopelícula de lecho móvil.

MBR — Biorreactor de membranas.

MCC — Celulosa microcristalina.

NaDES — Disolventes eutécticos profundos naturales.

NF — Nanofiltración.

NMT — Nivel de madurez tecnológica.

OI — Ósmosis inversa.

PAA — Ácido peracético.

PEF — Furanoato de polietileno.

PET — Tereftalato de polietileno.

pH — Potencial de hidrógeno.

PHA — Polihidroxialcanoato(s).

PHB — Polihidroxibutirato.

PLA — Ácido poliláctico.

PSA — Adsorción por cambio de presión.

PYME/PYMES — Pequeña(s) y mediana(s) empresa(s).

RMV — Recompresión mecánica de vapor.

S/L — Sólido-líquido.

SAA — Remojo en amoníaco acuoso.

SBR — Reactor discontinuo secuencial.

SC-CO₂ — Dióxido de carbono supercrítico.

SCP — Proteína unicelular.

SPORL — Pretratamiento con sulfito para superar la recalcitrancia de la lignocelulosa.

UF — Ultrafiltración.

UV — Ultravioleta.

GLOSARIO

Agua caliente líquida: Pretratamiento hidrotermal que emplea agua a temperatura y presión elevadas.

Autohidrólisis: Proceso hidrotermal en el que los ácidos liberados por la propia biomasa favorecen la ruptura parcial de la matriz lignocelulósica sin añadir catalizadores externos.

Biochar: Material carbonoso estable obtenido por pirólisis u otras rutas termoquímicas.

Biomasa de segunda generación: Fracción residual de origen agroforestal o agroindustrial que no compite directamente con la alimentación humana y que puede valorizarse como materia prima renovable.

Biorrefinería: Sistema integrado de procesos que transforma biomasa o residuos orgánicos en productos, energía y materiales de valor añadido.

Biorrefinería en cascada: Estrategia de diseño que ordena las valorizaciones de mayor a menor valor añadido, aprovechando secuencialmente las distintas fracciones del residuo.

Caldo de fermentación: Medio líquido o semilíquido resultante de un bioproceso, que contiene células, nutrientes, metabolitos, producto objetivo e impurezas.

Compuestos inhibidores: Moléculas generadas durante algunos (pre)tratamientos que pueden reducir el rendimiento de fermentaciones o procesos enzimáticos, como furfural, HMF o compuestos fenólicos.

Deshidratación mecánica: Operación que reduce el contenido de agua de lodos, fibras o biomásas mediante presión, centrifugación o filtración, antes de un secado más intensivo o del transporte.

Downstream processing: Conjunto de operaciones posteriores a la conversión biológica, química o termoquímica destinadas a separar, concentrar, purificar, estabilizar y formular el producto.

Efluente: Corriente líquida, sólida o gaseosa que sale de una etapa de proceso y que puede requerir tratamiento, recirculación o valorización.

Escalado: Proceso de trasladar una operación desde escala de laboratorio o piloto hasta una escala demostrativa o industrial manteniendo rendimiento, seguridad y reproducibilidad.

Fraccionamiento: Separación de la biomasa en corrientes enriquecidas en componentes concretos, como celulosa, hemicelulosa, lignina o minerales.

Hemicelulosa: Polímero estructural vegetal formado por azúcares de cinco y seis carbonos.

Hidrólisis enzimática: Proceso biológico/físico-químico que permite la ruptura de polímeros como celulosa o hemicelulosa en azúcares fermentables mediante enzimas específicas.

Lignina: Polímero aromático de la pared vegetal que aporta rigidez y recalcitrancia a la biomasa.

Licor: Fracción líquida obtenida tras una operación de pretratamiento, extracción, fermentación o separación.

Matriz lignocelulósica: Principal componente estructural de la pared celular de las plantas, compuesto principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina.

Monómero: Molécula pequeña que puede polimerizarse para formar polímeros, como el ácido láctico en la producción de PLA.

Organosolv: Familia de pretratamientos que emplean disolventes orgánicos, normalmente mezclados con agua y catalizadores.

Pretratamiento: Etapa o conjunto de etapas que acondiciona la biomasa para facilitar su fraccionamiento, conversión o extracción posterior.

Proceso sumidero: Ruta capaz de absorber corrientes residuales complejas o de menor valor, cerrando balances de materia o energía en la planta.

Recalcitrancia: Resistencia natural de la biomasa lignocelulósica a ser degradada, hidrolizada o fraccionada.

Severidad de pretratamiento: Intensidad global de una operación de tratamiento, determinada por temperatura, presión, tiempo de residencia y uso de reactivos.

Solvente verde: Disolvente seleccionado por su menor impacto ambiental, menor toxicidad o mayor posibilidad de recuperación frente a alternativas convencionales.

Syngas: Gas de síntesis formado principalmente por hidrógeno, monóxido de carbono y otros gases, obtenido mediante gasificación y utilizable como fuente energética o intermedio químico.

Tren de proceso / Tren: Secuencia integrada de operaciones o tecnologías que actúan de forma consecutiva para acondicionar, transformar o valorizar una materia prima, corriente intermedia o producto.

Valorización: Transformación de un residuo o subproducto en una corriente con utilidad económica, ambiental o funcional.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La bioeconomía y la economía circular son dos ejes centrales en las políticas con las que la Unión Europea y otras potencias industriales, como China, buscan transformar sus modelos productivos. Esta transición persigue sistemas de producción, consumo y gestión de residuos más resilientes y competitivos, con especial atención a la etapa final de las cadenas de valor: el retorno de los efluentes y subproductos a nuevos ciclos de aprovechamiento.

En la implementación de los cambios necesarios en las industrias primarias y transformadoras, mediante la figura 1, la Comisión Europea resumió los impedimentos detectados por los diferentes miembros consultados (asesores científicos y de innovación, investigadores, directivos industriales, inversores y fondos de riesgo, etc.). De manera simplificada, la figura evidencia que la principal barrera para la adopción generalizada de las nuevas políticas es la falta de plantas demostrativas e industriales que incorporen metodologías y tecnologías innovadoras. Específicamente la mayor problemática se plantea en la etapa temprana del escalado de proceso, validación de prototipos, donde la inherente incertidumbre tecnológica y ausencia de retorno económico dificulta la obtención de financiación para el desarrollo de estas instalaciones y, por ende, la validación de nuevas soluciones de aprovechamiento y producción. Esta necesidad se ha traducido en 2026 en un refuerzo de los instrumentos públicos

orientados al escalado industrial de la bioeconomía¹. En la Unión Europea, la respuesta se articula mediante el Bioeconomy Investment Deployment Group, con un plan de trabajo previsto para 2026-2029, destinado a coordinar financiación pública y privada, reducir el riesgo inversor y facilitar el paso desde plantas piloto y demostrativas hacia instalaciones industriales^{2,3}. En paralelo, la Circular Bio-based Europe Joint Undertaking lanzó en 2026 una convocatoria de 170.7 millones de euros, con líneas específicas para mejorar la competitividad de biorrefinerías, valorizar biomasa residual y resolver retos de separación y purificación^{4,5}. En China, los planes nacionales de bioeconomía y biomateriales no alimentarios también priorizan la biofabricación, la biomasa no alimentaria y las plataformas demostrativas^{6,7}. Estos hechos reflejan la importancia estratégica y carrera tecnológica subyacente para liderar la remodelación de las industrias mundiales agroforestales.

¹ Comisión Europea. (2025, 27 de noviembre). New plan to unlock the bioeconomy's potential. European Commission. https://commission.europa.eu/news-and-media/news/new-plan-unlock-bioeconomy-potential-2025-11-27_en

² Comisión Europea. (2025, 27 de noviembre). A Strategic Framework for a Competitive and Sustainable EU Bioeconomy COM(2025) 960 final. European Commission. https://environment.ec.europa.eu/document/download/dbf8d2ba-9332-4f7a-b336-f356fa4b7236_en?filename=COM_2025_960_1_EN_ACT_part1_v10_0.pdf

³ Comisión Europea, Dirección General de Medio Ambiente. (2026, 24 de abril). Europe's new platform to help unlock funding for a bio-based future. European Commission. https://environment.ec.europa.eu/news/new-platform-help-unlock-funding-bio-based-future-2026-04-24_en

⁴ Circular Bio-based Europe Joint Undertaking. (2025, 15 de diciembre). €170.7 million for new bio-based innovations. CBE JU. <https://www.cbe.europa.eu/news/eu1707-million-new-bio-based-innovations>

⁵ Circular Bio-based Europe Joint Undertaking. (2026). Amendment 1 Work Programme 2026. CBE JU. <https://www.cbe.europa.eu/system/files/2026-05/1st%20AMD%20CBE%20JU%20AWP%202026%20Adopted%20%281%29.pdf>

⁶ National Development and Reform Commission. (2022, 10 de mayo). 关于印发《“十四五”生物经济发展规划》的通知 [Aviso sobre la publicación del XIV Plan Quinquenal para el desarrollo de la bioeconomía]. NDRC. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202205/t20220510_1324436.html

⁷ National Development and Reform Commission. (2022, 20 de mayo). China unveils five-year plan for bioeconomy. NDRC. https://en.ndrc.gov.cn/netcoo/achievements/202205/t20220520_1326683.html

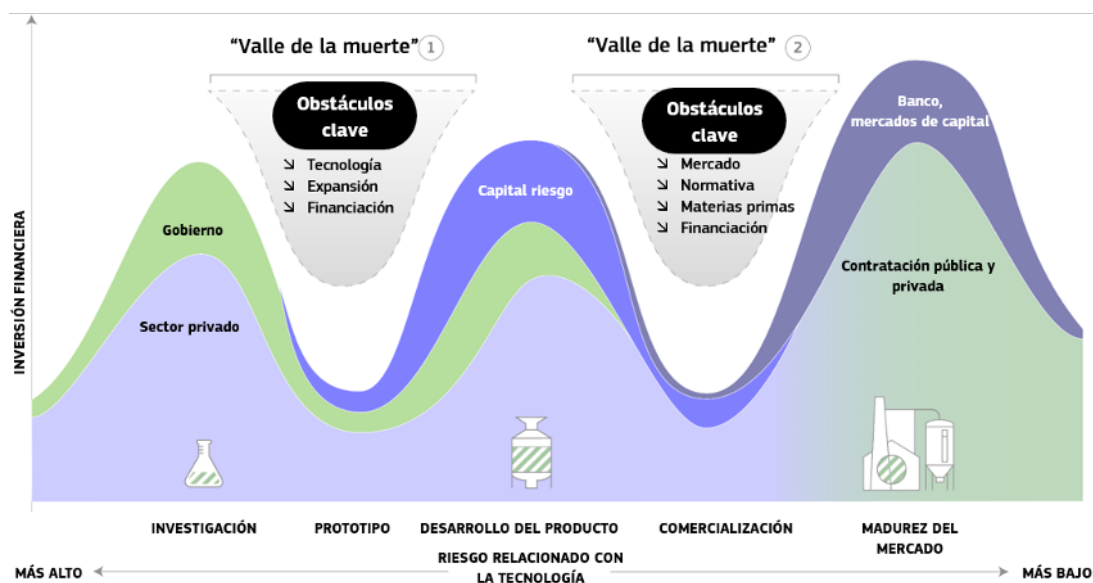


Figura 1. Valles de la muerte para el escalado de la bioeconomía en Europa. Fuente: Figura de la Comisión Europea publicada en su versión oficial en español derivada del documento “A Strategic Framework for a Competitive and Sustainable EU Bioeconomy”; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:52025DC0960>

Transformación de la Industria Agroforestal

La industria agroforestal ocupa una posición central en esta transición, tanto por el volumen de biomasa residual⁸ que genera como por su interés directo en cerrar el ciclo de la materia. Su reto inmediato es reducir los flujos residuales destinados a compostaje no controlado, incineración o vertedero, opciones de bajo retorno económico y con una huella ambiental evitable. En el sector agrario

⁸ El término citado “biomasa residual” requiere una contextualización clara e inequívoca sobre el foco de residuos que engloba y sobre los que se fundamenta el presente catálogo. En muchos casos esta denominación será empleada junto a otras denominaciones relacionadas o sinónimas, tales como “residuo, desecho, efluente residual, lodo”. Todas estas denominaciones hacen referencia a la biomasa de segunda generación o efluentes derivados de esta biomasa, y engloban aquellas fracciones residuales de biomasa lignocelulósicas (paja de cereal, podas agrícolas, restos forestales, excedente hortofrutícolas, entre otros) que no compiten con la alimentación y que hoy están subexplotados.

urge implementar modelos productivos integrales que transformen este pasivo de elevado potencial en muchos de los casos (desechos) en un activo mediante tecnologías (bien individuales o implementadas en procesos en cascada) que permitan extraer el máximo potencial de ellos, y hacerlo a su vez garantizando el estándar productivo de trazabilidad, seguridad y cumplimiento normativo de productos primarios.

Desde la perspectiva industrial, existe una escala suficiente para justificar la inversión y la generación de nuevos modelos de negocio en torno al residuo agroindustrial descrito. En la Unión Europea se generan cada año decenas de millones de toneladas de biorresiduos; en España, los desechos agroforestales concentran una parte muy significativa del total, con la paja de cereal como fracción estrella por volumen. Otras corrientes (lodos de depuradora, restos de poda de parques y jardines, subproductos de la transformación alimentaria, entre otros) adquieren relevancia en entornos urbanos y agroindustriales. En conjunto, el contexto actual refleja que el suministro de las materias primas de estos nuevos sistemas productivos no es el cuello de botella (solo en España, 125.4 millones de toneladas anuales de residuos agroforestales requieren gestión⁹); la barrera operativa recae en la capacidad industrial para clasificar, pretratar y transformar esa biomasa, así como la existencia de contratos de suministro bien cerrados que garanticen la operatividad continuada de estas instalaciones, esquivando la estacionalidad habitual de los diferentes sectores que lo constituyen y la logística desde origen a las instalaciones de procesado. En cuanto al residuo promedio, el denominador común y la principal dificultad técnica proviene de la recalcitrancia de uno de sus componentes estructurales mayoritarios, la lignina. Componente que en la naturaleza actúa como barrera natural, pero a la hora de valorizar se convierte en el principal limitante al bloquear la accesibilidad a la celulosa y a muchos otros compuestos de alto valor alojados en dichas matrices residuales (pigmentos, compuestos antioxidantes, etc.), lo que obliga a planificar con cuidado cada etapa de transformación para optimizar su uso y reducir la degradación de los compuestos más valiosos.

⁹ Evaluación de biomasa potencial en España a nivel provincial – Agroalnext, hacia un sector agroalimentario más sostenible. Informe metodológico y resultados”, Agroalnext, Noviembre 2023. <https://www.agroalnext.es/recursos/descargas/evaluacion-de-biomasa-potencial-en-espana-a-nivel-provincial/>

Esta limitación técnica se suma a la barrera económica descrita en la figura 1. Las biorrefinerías requieren una inversión inicial elevada y, además, los modelos agroforestales tradicionales no siempre disponen de sinergias operativas suficientes para integrar nuevas soluciones. Como resultado, pequeñas y medianas empresas (PYMEs), operadores regionales, cooperativas y grandes compañías encuentran dificultades similares para adoptar tecnologías innovadoras de gestión y valorización de residuos. Además, el marco regulatorio europeo, más reciente y ya tangible, ha introducido una corrección de rumbo. Las nuevas políticas respaldan el principio de la valorización en cascada y priorizan rutas que alargan la vida útil del carbono en productos materiales frente a destinos de baja permanencia (vertedero, combustión, lecho o alimentación en ganadería, compostaje, entre otros). Este cambio no ocurre de manera aislada, ya que los consumidores actuales, mejor informados, exigen trazabilidad y garantías de calidad. Esto incrementa los requerimientos de control, ensayos y documentación en el desarrollo de nuevos productos.

Diseño de Biorrefinerías para Biomásas de Segunda Generación

Ante este escenario, el reto es configurar biorrefinerías integrales y transversales, capaces de complementar los modelos agroforestales tradicionales y de convertir la gestión de residuos en una vía real de generación de productos con interés de mercado.

Las biorrefinerías de segunda generación no responden a un modelo de planta única y rígida. Funcionan como sistemas modulares formados por unidades operativas combinables (pretratamiento, fraccionamiento, conversión fisicoquímica o biológica y postratamiento) que deben adaptarse a la heterogeneidad de la biomasa entrante y a las especificaciones del producto final. Esta modularidad exige validar y escalar múltiples unidades de operación, trasiego de efluentes, diseños que optimicen el consumo de insumos y registrar datos de lote y de proceso que faciliten auditorías y la liberación de productos por proceso.

Para que este modelo funcione, hay tres requisitos operativos que no se deben perder de vista.

- Primero, suministro asegurado: contratos marco y especificaciones de calidad para las corrientes residuales de entrada.
- Segundo, estandarización: criterios claros de entrada, indicadores de calidad intermedia y del producto final, y una clasificación común que evite malentendidos regulatorios y facilite una respuesta adaptativa rápida al continuo avance de las políticas y al desarrollo de nuevos marcos normativos, con el fin de transitar hacia su implementación masiva y a gran escala.
- Tercero, análisis métrico por etapa: procesos que reporten rendimientos por fracción, productividad, consumos específicos y estimaciones, para reducir la incertidumbre y acelerar las decisiones de inversión.

La Figura 2 sirve de marco contextual para los siguientes capítulos dónde se presentan las opciones disponibles en el mercado para las etapas de pretratamiento, fraccionamiento, conversiones biológicas, físico-químicas y energéticas, así como los postratamientos. Se comparan su principio de funcionamiento, condiciones típicas de operación, prestaciones esperadas y principales limitaciones, estableciendo una base que permita seleccionar las tecnologías y equipos adecuados para materializar las etapas en cascada que conforman las biorrefinerías de segunda generación, aplicadas a un desecho agroindustrial específico. El objetivo es ofrecer una guía clara y accionable para que cada lector pueda decidir con criterio qué configurar, en qué secuencia y con qué expectativas de rendimiento y coste en función de la biomasa que se requiere gestionar.

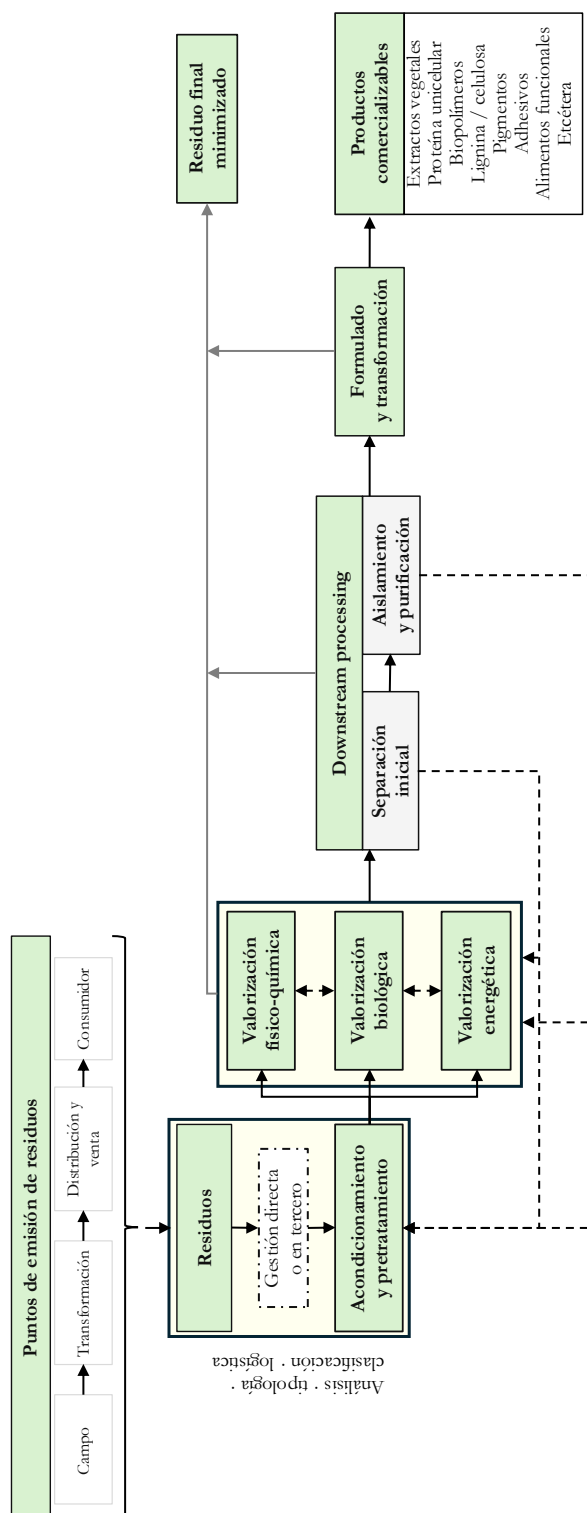


Figura 2. Esquema guía para la lectura del catálogo y la selección secuencial de tecnologías en biorrefinerías de segunda generación.

CAPÍTULO 2

PRETRATAMIENTOS

En este capítulo, el pretratamiento se aborda como la primera decisión crítica de diseño: la etapa que condiciona la accesibilidad de la biomasa, la calidad de las fracciones obtenidas y la viabilidad de las rutas posteriores de valorización.

En biomasa lignocelulósica, matriz ampliamente extendida en los residuos de segunda generación, la resistencia natural de la pared de las células vegetales (donde la lignina actúa como armazón) limita el acceso a los polímeros y metabolitos estructurales internos de interés. Esa barrera no solo dificulta la obtención directa de estos compuestos; también condiciona, entre otros, la llegada de enzimas y catalizadores a la celulosa, polímero estructural mayoritario y de elevado interés para el desarrollo de estrategias de biofactorías. Por ello, la función del pretratamiento no se reduce a “abrir” el material: se busca reorganizar la matriz para facilitar procesos de transformación posteriores, lo que, a escala de proceso, se traduce en mayor reproducibilidad e incremento de rendimientos por operación. En el contexto de biorrefinerías de segunda generación no existe un “mejor pretratamiento universal”, sino combinaciones de tecnologías más o menos adecuadas en función del tipo de residuo disponible, la familia de productos objetivo y las restricciones de inversión y operación de cada proyecto.

Las operaciones de pretratamiento pueden agruparse en familias físicas, químicas, híbridas, térmicas y biológicas. Esta clasificación permite ordenar rutas con funciones diferentes: acondicionar, fraccionar o “limpiar” la corriente antes

de etapas de hidrólisis, catálisis o digestión biológica. Sin embargo, la selección de operaciones a nivel industrial recae en el rendimiento económico final, es decir, se toman con el coste en mente: en la práctica se priorizan opciones que reduzcan consumo energético y carga de insumos, sin penalizar la calidad de los efluentes resultantes.

A partir de esta clasificación, el capítulo plantea un marco de decisión previo a la tabla resumen de tecnologías de final de capítulo. El objetivo es situar el papel del pretratamiento dentro de la biorrefinería, relacionarlo con el tipo de residuo y con las rutas de valorización posteriores, y mostrar qué compromisos técnicos y económicos implica aumentar la severidad de las operaciones.

Criterios generales de selección

I. Familias de biomasa y necesidades de pretratamiento

La selección resulta más clara si los residuos se agrupan en familias operativas con retos de acondicionamiento similares. Las biomásas lignocelulósicas secas y fibrosas, como paja de cereal, poda leñosa, astillas de madera o tallos secos, presentan estructuras compactas con elevada fracción de lignina y baja densidad aparente, lo que hace necesario reducir tamaño, abrir la estructura mediante tratamientos térmicos, químicos o mecánicos y, en muchos casos, plantear un fraccionamiento selectivo de celulosa, hemicelulosa y lignina cuando se desea aprovechar cada fracción en rutas diferenciadas. Los residuos húmedos o pastosos, como orujos, pulpas de fruta, bagazos con alta humedad o lodos orgánicos, concentran su complejidad en el alto contenido en agua, la viscosidad y la presencia de partículas inorgánicas, por lo que suelen requerir homogeneización, desarenado, ajuste de materia seca y desintegración mecánica suave para facilitar bombeo y contacto en las etapas posteriores. Las corrientes con alta carga mineral o con componentes problemáticos, como la paja de arroz con alto contenido en sílice o ciertos lodos con cenizas o metales elevados, exigen estrategias específicas para minimizar abrasión, incrustaciones y penalización de procesos térmicos, normalmente mediante separación de fracción mineral, lavados y selección de pretratamientos compatibles con estos niveles de cenizas. Finalmente, las corrientes mixtas o poco controladas, como mezclas de restos de poda urbana, fracción vegetal de residuos urbanos o mezclas cambiantes de subproductos agroindustriales, requieren líneas robustas y

flexibles, con pretratamientos físicos y térmicos de ventana operativa amplia y sistemas de clasificación y mezcla que amortigüen la variabilidad.

La Tabla 1 sintetiza esta lógica de compatibilidad en una matriz de lectura rápida. Está concebida como punto de partida para que el lector sitúe su residuo dentro de una familia operativa e identifique, a partir de ahí, qué tipos de pretratamiento tiene más sentido explorar.

Tabla 1. Mapa de compatibilidad entre familias de biomasa y familias de pretratamiento. Matriz en la que las filas agrupan biomasa lignocelulósica seca y fibrosa, residuos húmedos o pastosos, corrientes con alta carga mineral y corrientes mixtas o poco controladas, y las columnas recogen las principales familias de pretratamiento mostrando en cada intersección un nivel cualitativo de compatibilidad.

Familia biomasa	Físico-mecánicos	Térmico-hidrotermal	Químicos	Fisicoquímicos adicionales
Lignocelulósicos secos	● ● ●	● ● ●	● ●	● ●
Residuos húmedos / pastosos	● ●	● ●	●	● ● ●
Alta carga mineral / cenizas	● ●	● ●	●	● ● ● (lavados desarenado)
Corrientes mixtas	● ● ● (robustos)	● ●	●	● ●

● ● ● = alta compatibilidad, ● ● = media, ● = baja.

II. Niveles de severidad y compromiso técnico-económico

Desde el punto de vista económico (coste de insumos), cada pretratamiento se sitúa en un rango de severidad operativa (más severo por lo general implica más coste) definido por temperatura, presión, uso de reactivos y tiempo de residencia que requiere su correspondiente proceso. En un extremo se encuentra la baja severidad, que incluye operaciones cercanas a condiciones ambientales o con temperaturas inferiores a 100 °C y sin o con muy poco uso de reactivos, típicamente asociada a molienda, picado, tamizado, lavados y tratamientos alcalinos muy suaves. Estas estrategias presentan ventajas claras en términos de bajos costes económicos de implementación y operación, escasa generación de inhibidores y efluentes más sencillos de tratar, aunque su capacidad para abrir la estructura lignocelulósica es limitada y puede resultar insuficiente cuando se persigue una conversión intensiva hacia productos de alto valor. En un nivel intermedio, la severidad media agrupa pretratamientos a temperaturas entre 100 y 180 °C, con presiones moderadas y reactivos suaves o agua caliente, como la autohidrólisis, la explosión de vapor moderada y ciertos tratamientos alcalinos u organosolv de intensidad limitada. En este rango suele encontrarse un equilibrio razonable entre accesibilidad de la biomasa, coste y grado de madurez industrial de la tecnología, aunque es necesario gestionar bien el consumo energético y el tratamiento de efluentes, y controlar la formación de inhibidores fermentativos. En el extremo de alta severidad se sitúan los pretratamientos a temperaturas superiores a 180 °C, presiones elevadas y reactivos más concentrados o tiempos de residencia largos, como agua caliente líquida (ACL) o los tratamientos ácidos fuertes, que permiten una desestructuración y fraccionamiento muy profundo de la biomasa y abren la puerta a fracciones de alto valor añadido, especialmente en ligninas y hemicelulosas, a costa de un incremento notable en costes operativos con una complejidad operativa y exigencias de seguridad mayores respecto a los tratamientos descritos de menor severidad. Este marco permite interpretar el incremento de coste y complejidad asociado a pretratamientos más severos sin perder de vista la accesibilidad real obtenida en la biomasa.

III. Alineación con las rutas de valorización posteriores

La selección del pretratamiento solo tiene sentido si se interpreta en continuidad con las rutas de valorización a las que alimentará en la biorrefinería. Cuando el foco principal está en fermentaciones para producir bioplásticos, ácidos orgánicos o bioetanol, los pretratamientos más interesantes son aquellos que

maximizan la generación de azúcares fermentables y minimizan la formación de compuestos inhibidores como furfural, hidroximetilfurfural (HMF) o fenoles, por lo que las combinaciones de operaciones físico-mecánicas con pretratamientos térmicos e hidrotermales controlados, y tratamientos alcalinos u organosolv suaves, suelen resultar especialmente atractivas, siempre que se completen con lavados y neutralizaciones ajustados a las necesidades de los microorganismos. En plantas donde la ruta dominante es termoquímica, ya sea pirólisis, gasificación, combustión avanzada o procesos hidrotermales, el pretratamiento se orienta más a mejorar la manejabilidad, el contenido de humedad y el comportamiento térmico del residuo, de modo que operaciones como molienda, secado, clasificación granulométrica, desarenado y acondicionamiento para peletizado o alimentación a digestores y reactores adquieren protagonismo. Si el foco está en materiales y productos de alto valor, como nanocelulosa, hemicelulosas funcionales, ligninas o ligninas modificadas, el pretratamiento debe garantizar fracciones relativamente puras, poco degradadas y con propiedades reproducibles, lo que suele llevar a procesos organosolv, solventes eutécticos profundos (DES) y variantes hidrotermales suaves combinadas con sistemas de recuperación de solventes y control de calidad, y exige un análisis muy fino del nicho de mercado disponible. En los procesos en cascada de una biorrefinería, el diseño de esta etapa debe equilibrar los intereses de cada fracción, evitando optimizar únicamente un flujo si ello compromete de forma significativa la valorización global del residuo.

IV. Árbol de decisión conceptual: objetivo, restricciones y flexibilidad

El diseño de la línea de pretratamiento puede ordenarse mediante tres preguntas básicas, que funcionan como un esquema de decisión para pasar del residuo disponible a la tecnología más adecuada.

- La primera pregunta es cuál es el objetivo principal de la planta con el residuo concreto que se quiere tratar, ya sea la producción de azúcares fermentables y sus derivados, la producción de materiales (fibras, ligninas, nanocelulosas, compuestos para materiales avanzados) o la generación de energía en forma de biogás, biocombustibles sólidos o líquidos, calor y electricidad.
- La segunda pregunta se refiere a las restricciones dominantes en el diseño de la biorrefinería, incluyendo el nivel de inversión asumible, la sensibilidad al coste energético, las exigencias ambientales y de vertido de efluentes y, el grado de integración con infraestructuras existentes.

- La tercera cuestión clave es el nivel de flexibilidad que se requiere frente a cambios en la biomasa de entrada: si se trabaja con corrientes relativamente estables, puede justificarse el uso de pretratamientos más específicos y ajustados a un nicho de producto, mientras que si se prevé variabilidad significativa o mezclas cambiantes de residuos resulta más robusto optar por combinaciones de tecnologías de ventana operativa amplia, apoyadas en equipos estandarizados y esquemas de operación modulables. La Figura 3 presenta un árbol conceptual que relaciona estas tres cuestiones con las familias de pretratamiento más coherentes en cada caso, y sirve como puente visual para interpretar la Tabla 2 que detalla las principales tecnologías de pretratamiento.

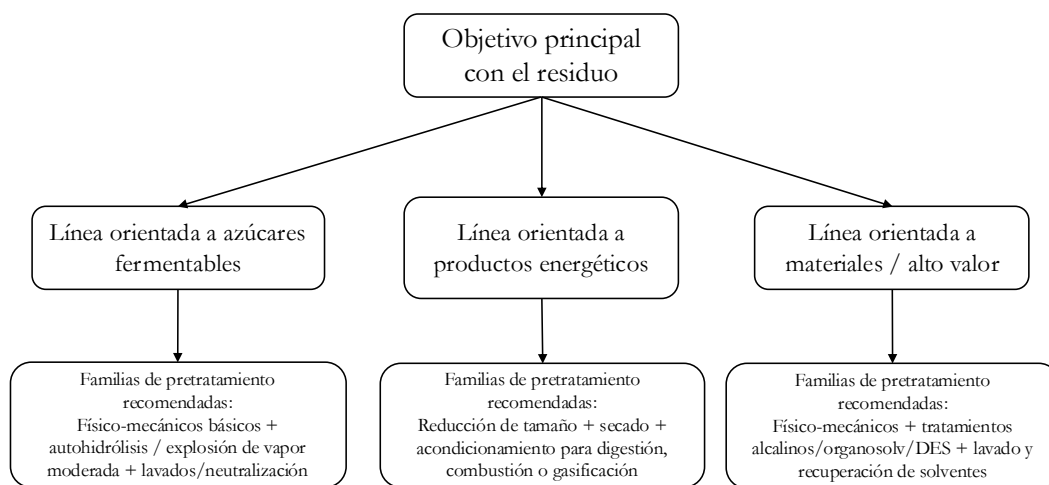


Figura 3. Árbol de decisión para la selección de pretratamientos. Nivel 1 objetivo de la biorrefinería. Nivel 2 familia de pretratamientos más recomendable.

Tabla 2. Principales tecnologías de pretratamiento aplicables a biomasa de segunda generación. La tabla resume la función de cada operación, el tipo de biomasa o efluente objetivo, sus ventajas operativas, limitaciones, nivel de madurez tecnológica e integración potencial en cascada.

Técnica / operación unitaria	Función principal en la biorrefinería	Tipo de biomasa / efluente objetivo	Ventajas operativas clave	Limitaciones y riesgos ambientales	NMT	Integración en cascada / sinergias
Físico						
Reducción de tamaño (molienda, refinado)	Disminuir tamaño de partícula y aumentar superficie específica para mejorar transferencia de calor y masa.	Pajas, bagazos, astillas y otros residuos lignocelulósicos fibrosos.	Tecnología muy madura, robusta y compatible con casi cualquier biomasa sólida; homogeneiza la alimentación a etapas posteriores.	Alto consumo eléctrico cuando se busca granulometría muy fina; no actúa sobre lignina ni elimina inhibidores.	9	Operación casi obligatoria al inicio de línea, previa a pretratamientos térmicos, químicos, biológicos o extrusión.
Extrusión (mono / doble tornillo)	Aplicar cizalla, presión y fricción para desestructurar pared celular y favorecer ruptura parcial de hemicelulosa.	Residuos fibrosos con humedad intermedia, como bagazos de cereal o maíz.	Proceso continuo, integrable en líneas existentes; combina efecto mecánico y térmico.	Necesidad de control de T. ^a y tiempo de residencia para evitar degradación térmica y formación de inhibidores.	7	Se sitúa tras reducción de tamaño y antes de hidrólisis enzimática o fermentación.
Homogeneización a alta presión / cavitación	Generar micro- y nano-fracturas mediante paso a alta presión por orificios, aumentando porosidad y accesibilidad.	Suspensiones líquidas o pastosas derivadas de residuos vegetales refinados.	Mejora accesibilidad sin añadir reactivos; tecnología conocida en lácteos y papel; permite operación continua.	Requiere licor fluido y consumo energético significativo según presión.		Útil como intensificación física posterior a una etapa de licuefacción o refinado mecánico.
Ultrasonidos, microondas, campos eléctricos pulsados (CEP) y radiación ionizante	Intensificar transferencia de masa y apertura estructural mediante cavitación, calentamiento volumétrico, electroporación o radiación.	Suspensiones finas, hidrolizados diluidos, bagazos y pajas previamente acondicionados	Operación sin reactivos adicionales; potencial para reducir tiempos y energía frente a acondicionamientos mecánicos clásicos.	Escalado y estandarización aún limitados; necesidad de diseños específicos y control de potencia; costes de capital elevados en radiación ionizante.	6-7	Complementan o sustituyen molienda/extrusión en esquemas intensificados y mejoran hidrólisis enzimática y extracción posterior.

Tabla 2. Continuación

Químico						
Técnica / operación unitaria	Función principal en la biorrefinería	Tipo de biomasa / efluente objetivo	Ventajas operativas clave	Limitaciones y riesgos ambientales	NMT	Integración en cascada / sinergias
Pretratamiento con ácido diluido	Solubilizar hemicelulosa y desestructurar matriz para exponer celulosa y acelerar hidrólisis posterior.	Biomásas ricas en hemicelulosa, como paja de trigo y otros residuos agrícolas.	Proceso rápido, bien conocido industrialmente y eficaz para mejorar digestibilidad de la fracción celulósica.	Formación de furfural y HMF; corrosión de equipos y necesidad de neutralizar licores ácidos; inhibición de fermentaciones si no se gestionan los subproductos.	8–9	Se sitúa antes de hidrólisis enzimática/ fermentación; requiere etapas de lavado, detoxificación o neutralización previas al bioproceso.
Lavado ácido (descenizado / desmineralizado)	Retirar cationes y minerales para evitar incrustaciones y estabilizar posteriores etapas térmicas/catalíticas	Corrientes con alta carga mineral, como paja de arroz rica en sílice y potasio.	Operación simple, económica y escalable; mejora rendimiento en etapas térmicas y catalíticas subsecuentes.	Genera efluentes salinos que requieren gestión y tratamiento adecuado.	9	Se incorpora antes de pretratamientos térmicos u oxidativos y reduce ensuciamiento de equipos aguas abajo.
Pretratamiento alcalino (NaOH/ KOH)	Hinchamiento de fibras, ruptura de enlaces éster y delignificación parcial para mejorar digestibilidad.	Residuos vegetales con contenido moderado de lignina (pajas, bagazos, astillas).	Genera menos inhibidores que tratamientos ácidos equivalentes; mejora accesibilidad para posteriores etapas biológicas.	Consumo de base, necesidad de lavados intensos y posibles pérdidas de hemicelulosa; gestión de efluentes alcalinos.	9	Adecuado antes de hidrólisis enzimática, digestión anaerobia o fermentación; combinable con etapas físicas previas.
Métodos tradicionales intensivos (ácido concentrado, cal, amoniaco/ AFEX-SAA-ARP; peróxido alcalino, oxidación húmeda)	Lograr altas conversiones de azúcares o delignificación intensa mediante condiciones químicas severas.	Residuos lignocelulósicos recalcitrantes cuando se requieren altos grados de fraccionamiento.	Elevados niveles de apertura de matriz y solubilización; rendimiento técnico probado.	Alta peligrosidad, corrosión, generación de lodos y efluentes complejos, exigencias de contención y recuperación de reactivos.	9	Se justifican solo en escenarios concretos o de transición; exigen posttratamientos intensivos de efluentes.

Tabla 2. Continuación-2

Técnica / operación unitaria	Función principal en la biorrefinería	Tipo de biomasa / efluente objetivo	Ventajas operativas clave	Limitaciones y riesgos ambientales	NMT	Integración en cascada / sinergias
Ozonólisis, organosolventes, SPORL, líquidos iónicos, DES e hidrotropos	Fraccionar biomasa obteniendo ligninas de alta calidad y celulosas muy accesibles en esquemas de solvente casi cerrado.	Residuos lignocelulósicos con interés en coproductos de alto valor (ligninas, pulpas especiales).	Permiten fraccionamientos más limpios, menor carga química neta y corrientes co-producto de mayor valor.	Coste de solventes/oxidantes, necesidad de recuperación eficiente y de controlar viscosidad y toxicidad según el sistema.	6	Bien posicionadas para sustituir métodos tradicionales a medida que maduren; facilitan integración con rutas de química de plataforma.
Híbrido						
CO ₂ supercrítico / “explosión” con CO ₂	Abrir matriz lignocelulósica y extraer compuestos poco polares mediante CO ₂ supercrítico seguido de despresurización brusca.	Semillas, hollejos y residuos herbáceos con fracción de extractables.	Solvente inocuo y reciclable; permite obtener extractos de alto valor y efluentes de salida limpios.	Equipos de alta presión y costes de capital.	4**	Encaja como etapa combinada de extracción y acondicionamiento previa a fermentación o a rutas termoquímicas.
Crio fractura (criomoltruración con N ₂ líquido)	Debilita la pared celular por enfriamiento rápido y facilitar su ruptura mecánica, generando microgrietas y disminuyendo cristalinidad.	Residuos lignocelulósicos de alto valor donde interese minimizar daño térmico o químico.	Obtiene sólidos muy finos, licores limpios y posibilidad de reducir dosis de pretratamiento químico posterior.	Coste energético y logístico del N ₂ líquido; bajo grado de maduración y encaje industrial limitado.	5	Potencial como preetapa física para reducir severidad de tratamientos químicos.

Tabla 2. Continuación-3

Técnica / operación unitaria	Función principal en la biorrefinería	Tipo de biomasa / efluente objetivo	Ventajas operativas clave	Limitaciones y riesgos ambientales	NMT	Integración en cascada / sinergias
Término						
Agua sub/ supercrítica (hot- compressed water)	Hidrolizar rápidamente hemicelulosa (y celulosa en condiciones más severas) en ausencia de reactivos adicionales.	Pajas, astillas y residuos agrícolas con elevada fracción polisacárida.	Procesos muy rápidos, sin adición de catalizadores externos y efluentes de salida relativamente limpios.	Equipos de alta presión, control preciso de tiempos de residencia y gestión de energía; riesgo de degradación si se sale de ventana operativa.	6	Adecuado antes de fermentación o conversión química de azúcares; se integra bien en esquemas de baja carga química.
Explosión de vapor	Des hacer haces fibrosos tras autohidrólisis y solubilizar parcialmente hemicelulosa.	Pajas y astillas con alto contenido estructural lignocelulósico.	No requiere reactivos externos, utiliza equipos técnicos conocidos y genera sustratos altamente accesibles para enzimas.	Formación de inhibidores (furfural, HMF); necesidad de controlar emisiones de vapor y condensados.	7	Precede a hidrólisis enzimática y fermentación; combinable con detoxificación posterior y recuperación de calor.
Agua caliente líquida / autohidrólisis (ACL)	Desprender hemicelulosa y ganar accesibilidad usando solo agua caliente y ácidos formados <i>in situ</i> .	Astillas y residuos agrícolas con alta fracción hemicelulósica.	Evita uso de reactivos externos, genera licores más limpios que alternativas ácidas clásicas.	Alta demanda térmica y necesidad de integración energética y recirculación de agua.	8	Excelente base para hidrólisis enzimática, pretratamientos enzimáticos finos y fermentaciones de precisión.
Torrefacción	Secar, desvolatilizar parcialmente y densificar energéticamente biomasa para facilitar manejo y conversión termoquímica.	Biomasa lignocelulósica sólida (pajas, astillas, restos leñosos).	Mejora molienda, pelletizado y almacenamiento posterior.		9	Pretratamiento de acondicionamiento para pirólisis, gasificación o calderas de biomasa.

Tabla 2. Continuación-4

Técnica / operación unitaria	Función principal en la biorrefinería	Tipo de biomasa / efluente objetivo	Ventajas operativas clave	Limitaciones y riesgos ambientales	NMT	Integración en cascada / sinergias
Biológico						
Pretratamiento enzimático (lacasas, peroxidadas, xilanas-celulasa)	Afinar superficie, eliminar (fenoles, grupos acetilo) y aumentar accesibilidad sin romper masivamente la biomasa.	Biomasa ya pretratada térmica o químicamente con estructura parcialmente abierta.	Condiciones suaves, alta especificidad y mejor estabilidad de rendimiento en hidrólisis enzimática posterior.	Muy caro	6***	Se ubica como etapa de refinado tras autohidrólisis o pretratamientos térmicos, mejorando conversión y selectividad.
Consortios bacterianos, hongos de pudrición blanca y biolixiviación	Delignificar selectivamente, modular hemicelulosa y reducir carga mineral mediante procesos biológicos controlados.	Residuos lignocelulósicos donde se desee minimizar uso de químicos; corrientes con alto contenido mineral.	Menor carga química, posible mejora de biodegradabilidad y reducción de cenizas para etapas térmicas posteriores.		5-6	Previo a digestión anaerobia, fermentación o conversión termoquímica; complementa o sustituye pretratamientos químicos severos.
Ensilado (fermentación láctica)	Conservar biomasa húmeda, reducir pH y reblandecer fibra durante almacenamiento prolongado.	Tallos de maíz, pajas y residuos herbáceos estacionales de alta humedad.	Tecnología de bajo coste para gestionar estacionalidad y estabilizar suministro sin secado intensivo.		9	Funciona como puente logístico antes de hidrólisis, digestión anaerobia o fermentación.

*En industrias lignocelulósicas; **como tratamiento de alteración estructural; ***como pretratamiento.

CAPÍTULO 3

VALORIZACIONES

En el diseño de una biorrefinería, las valorizaciones definen qué parte del residuo se convierte en producto de alto valor, qué fracciones se destinan a productos de volumen alto y valor reducido y, qué queda para procesos sumidero de cierre con no tanto relevancia económica sino de interés ambiental. Por ello, este capítulo es el eje sobre el que se construyen los modelos de biorrefinería. Si bien se pueden encadenar tantas valorizaciones como se desee, lo habitual no pasa de dos o tres debido a que cada etapa lleva asociados costes económicos elevados de pre y post tratamiento y, por lo general, apuntan a rutas de valorización que no son complementarias. El diseño y la estrategia juegan un papel relevante, los mayores réditos económicos se suelen fundamentar en efectuar valorizaciones de mayor a menor valor añadido, lo que habitualmente coincide con un porcentaje de valorización de menor a mayor cantidad de biomasa a medida que avanza en las etapas de procesado. Si bien algunas técnicas se enfocan en extraer fracciones del 0.1-2 % respecto al volumen total, otras son más inespecíficas y sus estrategias permiten valorizar fracciones muy amplias; algunas incluso tienen capacidad de absorber la totalidad de la biomasa, técnicas que más adelante serán denominadas “valorizaciones sumidero”.

La decisión no es tanto qué hacer con todo a la vez, sino elegir en qué familias de productos se quiere especializar la planta y cómo se completará el esquema para que ninguna corriente se convierta en un coste sin retorno; en este plano, no solo se debe considerar el retorno económico, también la ventaja ambiental o regulatoria que supone la introducción de determinadas valorizaciones. Cada ruta

de valorización combina tres dimensiones que condicionan su papel en el diseño: 1) el valor añadido que puede capturar por unidad de producto, 2) el porcentaje de biomasa residual que es capaz de absorber y 3) el nivel de riesgo asociado al mercado y a la regulación que gobiernan el producto final. A continuación, se desarrollan estos criterios ofreciendo un marco para interpretar la tabla resumen de tecnologías de valorización del final del capítulo (Tabla 3).

La ruta de valorización y el pretratamiento deben leerse como decisiones acopladas. La calidad de las fracciones obtenidas, su coste de producción y su estabilidad operativa determinan qué productos pueden competir en mercado y qué parte de la inversión deberá concentrarse en reactores, etapas de *downstream processing*, sistemas de suministro o módulos auxiliares.

Valor añadido y fracción de biomasa captada

Dentro del conjunto de tecnologías de valorización disponibles, no todas aportan el mismo valor por unidad de biomasa procesada ni absorben la misma fracción del residuo. La Figura 4 resume esta relación entre valor añadido y biomasa valorizada. En la parte alta de valor y baja fracción se sitúan las rutas que generan productos muy intensivos en margen a partir de una porción relativamente pequeña de la biomasa, como extractos fenólicos, pigmentos específicos, nanocelulosa, monómeros de alto valor (monolignoles) o determinados principios activos funcionales (vitaminas o sus precursores). En un nivel intermedio se encuentran valorizaciones que convierten una fracción significativa del carbono en productos plataforma o polímeros con mercados crecientes, como ácidos orgánicos (láctico, succínico, itacónico), polihidroxibutirato (PHB) y otros polihidroxialcanoatos (PHA), ácido poliláctico (PLA), furfural, HMF y derivados afines, que absorben una porción moderada de la biomasa con un valor añadido intermedio. Finalmente, en el cuadrante de fracción alta y valor específico más bajo se sitúan los procesos sumidero (digestión anaerobia hacia biogás o biometano, combustión, pirólisis, gasificación, tecnologías hidrotermales orientadas a bioaceites y biochar) que pueden tratar mezclas complejas y fracciones recalcitrantes y que, aunque ofrecen un margen de retorno económico menor por unidad de biomasa entrante, resultan claves para asegurar el cierre energético y logístico del sistema. En términos realistas, esto se traduce habitualmente en que las rutas de alto valor gestionan del orden de décimas o unidades de porcentaje de la biomasa total,

mientras que las rutas sumidero aspiran a tratar prácticamente el conjunto de los residuos que no encuentran encaje en etapas anteriores (con frecuencia dando salida a porcentajes cercanos al 50 % del residuo inicial). Un ejemplo ilustrativo sería una instalación diseñada para producir únicamente unos pocos kilogramos al año de extractos secos bioactivos crudos de origen vegetal. Esta instalación utilizaría la misma corriente de materia prima que, en un proceso a mayor escala, genera cientos o incluso miles de toneladas de biomasa vegetal. Esa biomasa, después de destinarse a la extracción de compuestos bioactivos, podría transformarse mediante pirólisis para la producción de biochar o combustibles sólidos.

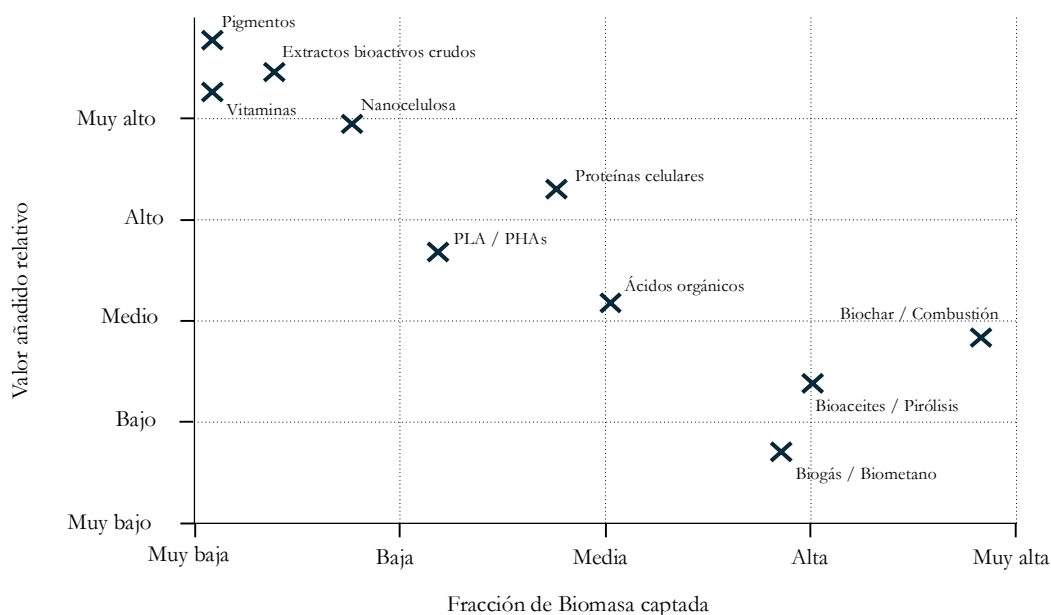


Figura 4. Mapa de valor añadido frente a fracción de biomasa captada. El eje horizontal muestra la fracción de biomasa que absorbe cada ruta de valorización y el eje vertical su valor añadido relativo.

Ventana de mercado y riesgo regulatorio

El valor potencial de una ruta solo es relevante si existe un mercado capaz de absorber el producto en condiciones razonables de riesgo. Algunas familias de valorización operan ya en mercados consolidados y fuertemente regulados, donde las especificaciones técnicas están claras y la demanda es relativamente estable; aquí se encuadran, por ejemplo, bioetanol, biometano, algunos solventes y combustibles líquidos renovables, celulosa microcristalina (MCC) y ciertos adsorbentes estandarizados. Un segundo grupo corresponde a mercados en crecimiento, pero todavía volátiles, donde la demanda aumenta al compás de la presión regulatoria y de la sustitución de productos fósiles, como ocurre con muchos bioplásticos (PLA, PHB y otros PHAs), las proteínas unicelulares para alimentación y piensos. Por encima, en términos de riesgo, se encuentran los productos emergentes o de nicho, como HMF y su derivado oxidado ácido 2,5-furandicarboxílico (FDCA), algunas rutas de lignina (monolignoles) o derivados obtenidos por licuefacción hidrotermal, que ofrecen un potencial de margen elevado, pero dependen de cadenas de suministro incipientes, normativas en evolución y acuerdos comerciales específicos. La Figura 5 sintetiza esta “ventana de mercado” situando cada familia de producto en función de la estabilidad de su demanda y del nivel de exigencia regulatoria asociado, de manera que el lector pueda decidir hasta qué punto su planta se apoyará en productos de referencia conocida o asumirá apuestas más innovadoras. En muchos casos, esta diferencia se refleja también en el tipo de contratos disponibles: productos energéticos que, en muchos casos, se comercializan bajo acuerdos de compraventa de energía a largo plazo, lo que contribuye a estabilizar los ingresos de la propuesta tecnológica a la que dan respaldo, mientras que biopolímeros, nanomateriales o ingredientes funcionales suelen requerir acuerdos de co-desarrollo y contratos a medida con clientes concretos. Además, la posición de cada producto en esta figura no es estática, ya que las políticas públicas, la taxonomía europea/mundial y los objetivos de descarbonización pueden desplazar determinadas familias de productos desde regiones emergentes hacia zonas de mayor estabilidad en horizontes temporales de muy pocos años. Sirva de ejemplo los combustibles sostenibles de aviación en la Unión Europea, que han pasado de ser un mercado casi experimental a disponer de cuotas obligatorias de mezcla (2 % en 2025, con incrementos progresivos hasta el 70 % en 2050), lo que ha consolidado una demanda a largo plazo que hasta hace pocos años era puramente voluntaria.

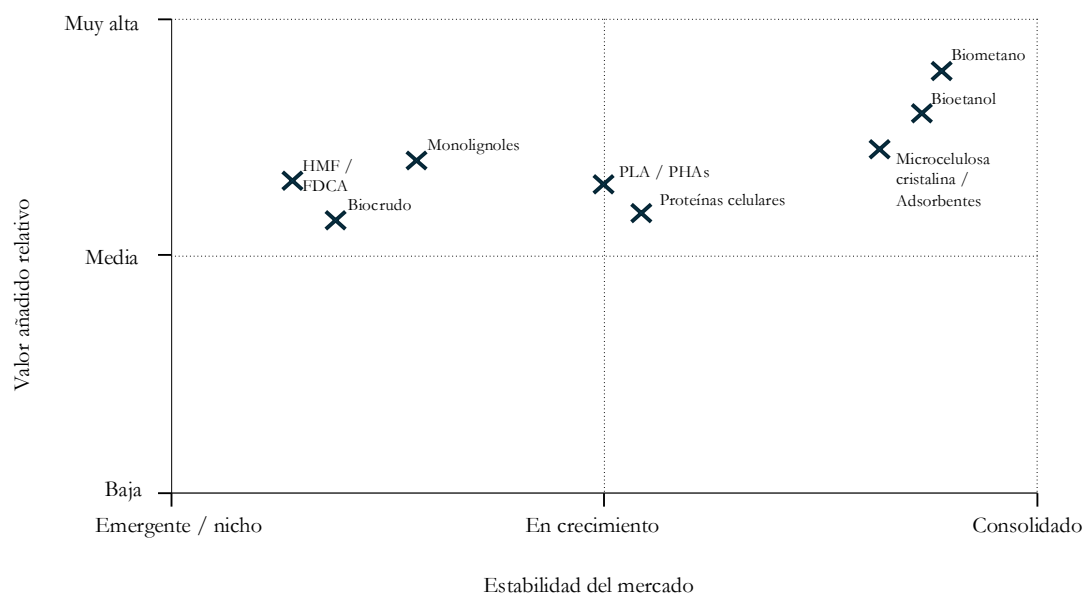


Figura 5. Ventana de mercado y exigencia regulatoria de las rutas de valorización. El eje horizontal refleja la estabilidad del mercado, desde productos emergentes o de nicho hasta productos consolidados, y el eje vertical el valor añadido relativo.

Compatibilidad y encadenamiento entre rutas de valorización

Las valorizaciones no funcionan de manera aislada: se apoyan o se interfieren entre sí según qué fracciones de la biomasa utilicen. Existen combinaciones en cascada que resultan especialmente naturales, como extraer primero compuestos solubles de alto valor (polifenoles, pigmentos, entre otros) de una corriente líquida. Dedicar después la fracción rica en carbohidratos a fermentaciones (biofactorías) para producir bioetanol, ácidos orgánicos o polímeros microbianos y, finalmente, conducir los restos de materia orgánica y las corrientes mezcladas hacia digestión anaerobia, combustión, gasificación o pirólisis para recuperar energía. Del mismo modo, la fracción sólida enriquecida en carbono aromático puede destinarse a producir biochar y adsorbentes que reintroducen parte del residuo en cadenas de valor agronómicas o ambientales. Frente a estos encadenamientos coherentes, hay rutas que compiten directamente por la misma fracción: lignina orientada a derivados aromáticos de alto valor frente a la misma lignina utilizada como combustible en caldera o azúcares fermentables destinados a bioplásticos frente a su purificación directa para su uso como endulzantes naturales. Tener claras estas compatibilidades y conflictos es clave

para decidir qué fracciones se reservan como materia prima para productos de alto valor y cuáles se aceptan como combustible o sumidero, evitando diseñar cadenas que se resten materia prima entre sí. Esta compatibilidad no es solo química, sino también logística: ciertas rutas pueden compartir tanques, utilidades y líneas de transporte, mientras que otras requieren infraestructuras dedicadas, con el consiguiente impacto en inversión y operación.

La viabilidad de una ruta no depende solo de cuánta biomasa absorbe, sino de la calidad de la corriente que recibe. Un licor bombeable, con baja viscosidad y sólidos finos, puede integrarse en esquemas biológicos convencionales; un efluente espesado, pastoso o rico en coloides exige otra lógica de equipos y operación. El primer caso puede integrarse con relativa facilidad en esquemas clásicos de digestión anaerobia o tratamiento biológico de aguas, donde los reactores, los sistemas de agitación y la instrumentación están pensados para líquidos bombeables con contenidos de sólidos moderados. Ese mismo tren de equipos, sin embargo, puede resultar inviable o ineficiente para manejar efluentes densos o pastosos, en los que la transferencia de oxígeno, la mezcla y la extracción de calor se ven seriamente limitadas y donde tiene más sentido plantear otras estrategias, como fermentaciones de alto contenido en sólidos, biorreactores específicos o incluso rutas termoquímicas adaptadas a matrices más concentradas. Introducir este criterio de “calidad de corriente” ayuda a justificar decisiones que, de otro modo, podrían parecer arbitrarias: un mismo residuo de origen puede dar lugar a efluentes muy distintos según el pretratamiento aplicado, y cada uno de ellos abre o cierra el acceso a determinadas rutas de valorización y a determinadas familias de equipos.

Arquetipos de planta

Para trasladar estos criterios al diseño de planta, las rutas de valorización pueden ordenarse en carteras de producto y arquetipos de biorrefinería. La primera propuesta de arquetipo correspondería a una planta orientada a bioplásticos y química de plataforma, que prioriza rutas como la producción de ácidos orgánicos, PLA, PHB y monómeros derivados, apoyada en una química renovable basada en furfural, HMF, FDCA y ciertos derivados de lignina, y que utiliza digestión anaerobia, combustión o gasificación como sumidero energético para las fracciones residuales (este arquetipo de biorrefinería se expone en detalle en el capítulo final del catálogo como propuesta de diseño real). Una

segunda propuesta de arquetipo correspondería a una planta orientada a la producción de energía y a la generación de productos destinados a mejorar la fertilidad del suelo. En este modelo, la mayor parte del residuo se dirige a procesos consolidados como la digestión anaerobia, el upgrading a biometano, la pirólisis, la gasificación y la producción de biochar. Se trata de una biorrefinería centrada en rutas de valorización robustas y de menor retorno económico unitario, pero que cuentan con tecnologías ampliamente contrastadas, mercados estables y una elevada capacidad para procesar miles de toneladas anuales de biomasa. Finalmente, un tercer modelo intermedio sería la planta mixta, que combina una parte de química de plataforma y biopolímeros con otra parte dedicada a biogás, biochar y energía térmica o eléctrica, de forma que reparte la biomasa entre productos de margen medio-alto y rutas energéticas más robustas frente a cambios de mercado. La figura 6 ilustra estos tres arquetipos y muestra cómo puede distribuirse un mismo residuo entre productos de alto valor, rutas de volumen intermedio y procesos sumidero, en función del modelo de planta elegido.

Sobre estos arquetipos actúa la lógica de riesgo y retorno: los productos con precio de referencia conocido, como bioetanol, biometano o ciertos combustibles sólidos, ofrecen márgenes más ajustados pero menor incertidumbre; los productos con prima verde asociada a la innovación, como PLA, PHB, nanocelulosa o ligninas (o ligninas derivadas), ofrecen márgenes por unidad de biomasa valorizada más elevados a costa de una mayor dependencia de la evolución regulatoria y de las especificaciones del cliente. Diseñar la cartera de valorizaciones implica decidir qué peso se otorga a cada tipo de producto dentro del arquetipo de planta elegido, sabiendo que, en todos los casos, será necesario garantizar procesos sumidero capaces de absorber rechazos y fracciones que no alcancen las calidades requeridas por mercado. Además, estos arquetipos no tienen por qué ser estáticos: una planta puede arrancar con un perfil más energético, apoyado en tecnologías maduras y contratos de suministro estables, e ir incorporando progresivamente módulos de biopolímeros o química de plataforma a medida que gana experiencia operativa, cierra acuerdos comerciales y mejora su acceso a financiación.

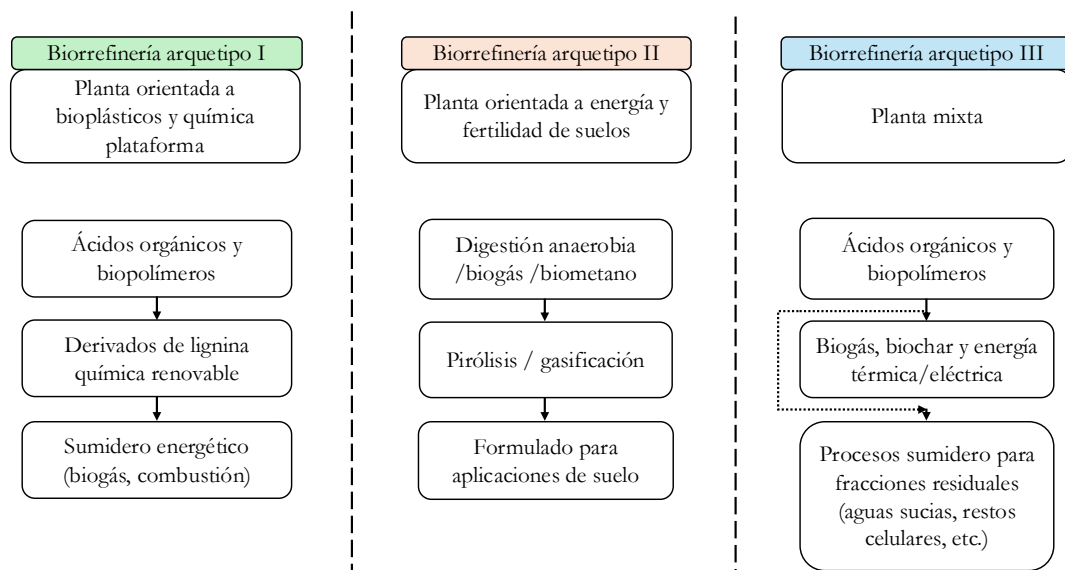


Figura 6. Arquetipos de biorrefinería según combinación de rutas de valorización. El esquema compara tres configuraciones: una planta orientada a bioplásticos y química de plataforma, una planta orientada a energía y fertilidad de suelos y una planta mixta.

En cada caso se muestran las tecnologías de valorización predominantes y las combinaciones más habituales para alcanzar un cierre de biomasa como estrategia de biorrefinería cero.

*No se muestran los pretratamientos ni los procesos de purificación requeridos por etapa.

Tabla 3. Principales rutas de valorización en biorrefinerías de segunda generación. La tabla compara funciones, corrientes objetivo, ventajas operativas, nivel de madurez tecnológica e integración en cascada de rutas fermentativas, materiales, químicas, termoquímicas y energéticas.

Técnica / operación unitaria	Función principal en la biorrefinería	Tipo de biomasa / efluente objetivo	Ventajas operativas clave	NMT	Integración en cascada / sinergias
Fermentaciones a bioetanol	Convertir azúcares C5/C6 en etanol combustible mediante fermentación alcohólica.	Hidrolizados lignocelulósicos de pajas y bagazos con alto contenido en glucosa y xilosa.	Tecnología consolidada, integración con destilación en cascada y mercado maduro de bioetanol.	9 en bioetanol de primera generación, 8 en segunda generación.	Se alimenta de caldos azucarados; vinazas y licores residuales pueden dirigirse a digestión anaerobia o a rutas energéticas.
Fermentación ABE (acetona-butanol-etanol)	Producir solventes renovables, especialmente butanol, a partir de azúcares fermentables.	Hidrolizados relativamente limpios con azúcares C5/C6 y baja carga de inhibidores.	Genera coproductos solventes con interés químico y energético; butanol compatible con gasolina.	8	Complementa líneas de bioetanol y puede combinarse con recuperación energética del residuo líquido vía digestión anaerobia.
Producción de ácidos orgánicos plataforma (láctico, succínico, itacónico)	Transformar azúcares en monómeros para bioplásticos y resinas bio-basadas.	Hidrolizados ricos en glucosa y pentosas, con baja carga salina y de inhibidores.	Permite acceder a cadenas de valor de polímeros renovables; ácido láctico es una ruta industrial muy madura.	9 en ácido láctico; 7 en succínico e itacónico.	Los ácidos se deben polimerizar en PLA u otros polímeros; las corrientes residuales restantes se tratan por digestión anaerobia y/o diferentes técnicas de fraccionamiento.
Producción de PHA/ PHB	Acumular poliésteres intracelulares biodegradables a partir de azúcares o AGV.	Corrientes ricas en carbono fácilmente asimilable y ajustables en relación C/N.	Genera biopolímeros compostables de alto valor; regulación genética y fisiología del proceso bien estudiadas.	8-9	Integra bien con etapas de <i>downstream processing</i> para extracción suave; los efluentes pueden valorizarse energéticamente.
Proteína unicelular (SCP)	Convertir azúcares o corrientes nutritivas en biomasa microbiana rica en proteína para piensos.	Fraciones azucaradas limpias, aguas de proceso con nutrientes y corrientes laterales tratadas.	Alta productividad, uso de infraestructuras de fermentación existentes y mercado creciente en acuicultura y alimentación animal.	9	Complementa líneas de fermentación, aprovechando excedentes de azúcares o CO ₂ y generando biomasa comercializable.

Tabla 3. Continuación

Técnica / operación unitaria	Función principal en la biorrefinería	Tipo de biomasa / efluente objetivo	Ventajas operativas clave	NMT	Integración en cascada / sinergias
Producción de biohidrógeno (fermentación oscura)	Generar hidrógeno renovable a partir de azúcares o AGV.	Hidrolizados y corrientes ricas en compuestos fácilmente fermentables.	Permite recuperar parte de la energía en forma de H ₂ ; efluente residual valorizable por digestión anaerobia.	6	Se integra bien en esquemas de dos etapas H ₂ + biogás, maximizando recuperación energética.
Digestión anaerobia a biogás	Convertir mezclas orgánicas en biogás (CH ₄ /CO ₂) y digestato aprovechable.	Lodos, vinazas, licores madre y corrientes orgánicas no fácilmente fermentables a productos de mayor valor.	Tecnología modular, muy consolidada; genera energía y reduce carga contaminante del residuo.	9	Funciona como proceso sumidero al final de la cascada y puede alimentar cogeneración o upgrading a biometano.
Producción de xilitol por fermentación	Reducir xilosa de corrientes hemicelulósicas para obtener xilitol de uso alimentario y farmacéutico.	Prehidrolizados ricos en C5 tras detoxificación.	Acceso a ingrediente de alto valor añadido a partir de fracciones hemicelulósicas.	8-9	Se acopla a cadenas de hidrólisis hemicelulósica; el licor residual puede dirigirse a biogás o a tratamientos biológicos.
Producción de nanocelulosa (CNF/CNC)	Transformar celulosa en nanofibras o nanocristales para uso como refuerzo y modificador reológico.	Pulpas celulósicas depuradas o residuos previamente refinados.	Obtención de materiales ligeros, con alta superficie específica y aplicaciones en papeles barrera, recubrimientos y composites.	8	Requiere fracciones de celulosa ya purificadas; complementa rutas que producen pulpas de alta calidad.
Producción de celulosa microcristalina (MCC)	Generar partículas cristalinas de celulosa usadas como excipientes en farma y alimentación.	Celulosa de alta pureza procedente de fraccionamientos avanzados.	Mercado consolidado, parámetros de calidad bien definidos, tecnología estandarizada.	9	Cierra rutas de alta pureza de celulosa; coexiste con nanocelulosa según requisitos de mercado.
Producción de furfural desde pentosas	Deshidratar xilosa/arabinosa para obtener furfural como intermediario químico.	Prehidrolizados de paja y otros residuos ricos en C5.	Acceso a precursor químico renovable para resinas y solventes; procesos industriales ya en operación.	9	Puede integrarse con producción de HMF/levulínico en esquemas de química de plataforma; licores residuales se tratan por vías biológicas o térmicas.

Tabla 3. Continuación-2

Técnica / operación unitaria	Función principal en la biorrefinería	Tipo de biomasa / efluente objetivo	Ventajas operativas clave	NMT	Integración en cascada / sinergias
Producción de HMF y ácido levulínico desde hexosas/ celulosa	Transformar glucosa/fructosa o celulosa en HMF y ácido levulínico, precursores de FDCA y otros químicos.	Hidrolizados ricos en glucosa y fracciones celulósicas controladas.	Permite fabricar monómeros como FDCA para PEF y otras rutas de química renovable.	7	Complementa producción de furfural y bioplásticos; concentrados pueden integrarse con unidades de destilación y cristalización.
Hidrogenación de azúcares a polialcoholes (sorbitol, xilitol catalítico)	Convertir monosacáridos en polialcoholes con mercados consolidados en alimentación y química.	Corrientes purificadas de glucosa o xilosa con baja carga de impurezas.	Tecnología disponible, catalizadores comerciales y líneas industriales existentes.	9	Se alimenta de hidrolizados purificados; los licores agotados pueden derivarse a biogás o tratamientos de agua.
Depolimerización de lignina a aromáticos	Producir monómeros fenólicos a partir de ligninas técnicas mediante rutas reductivas u oxidativas.	Ligninas kraft, organosolv u otras con especificación relativamente estable.	Abre rutas a resinas, adhesivos y aditivos aromáticos renovables.	7	Aprovecha corrientes de lignina generadas en pretratamientos; sus productos se integran en industrias de materiales.
Extracción de polifenoles y pigmentos con solventes verdes (DES/NaDES, técnicas asistidas)	Recuperar antioxidantes y colorantes de orujos, hojas y cáscaras mediante solventes de perfil toxicológico favorable.	Orujos de uva, subproductos hortofrutícolas, cáscaras y hojas ricas en compuestos fenólicos.	Mejora rendimientos extractivos, reduce uso de solventes orgánicos convencionales y favorece la extracción de ingredientes de alto valor.	8	Se integra como primera valorización de alta calidad antes de rutas energéticas o biológicas.
Producción de carbones/adsorbentes desde biochar	Activar biochar para generar adsorbentes de alta superficie destinados a tratamiento de aguas o gases.	Biochar procedente de pirólisis de residuos agrícolas y forestales.	Añade valor a un coproducto de pirólisis, genera materiales con aplicación ambiental y contribuye a captura de carbono.	8	Cierra el círculo en plantas con pirólisis; los adsorbentes pueden reutilizarse internamente en tratamiento de efluentes.

Tabla 3. Continuación-3

Técnica / operación unitaria	Función principal en la biorrefinería	Tipo de biomasa / efluente objetivo	Ventajas operativas clave	NMT	Integración en cascada / sinergias
Pirólisis lenta orientada a biochar	Transformar biomasa en biochar para mejora de suelos o base de adsorbentes, más fracciones de gas y líquido.	Residuos agrícolas y forestales secos.	Aporta co-beneficios de captura de carbono y productos sólidos estables de fácil almacenamiento y transporte.	9	Complementa pretratamientos previos; el gas puede usarse para calor de proceso y el biochar activarse como adsorbente.
Pirólisis rápida orientada a bioaceite	Producir bioaceite, gas y pequeñas cantidades de biochar mediante calentamiento rápido sin oxígeno.	Biomasa seca y finamente dividida (astillas, serrín, paja molida).	Genera biocombustible líquido transportable, apto para co-refino o hidrotatamiento.	8	Puede operar como suma de valorización energética y química; el biochar residual se valoriza adicionalmente.
Gasificación a syngas	Transformar biomasa en mezcla de H ₂ , CO y CH ₄ para usos energéticos o síntesis química.	Residuos lignocelulósicos secos y homogeneizados.	Permite producir energía, metanol o combustibles sintéticos; flexible en integración con otras unidades.	8-9	Funciona como vía sumidero para fracciones recalcitrantes y cierra el balance energético de planta.
Carbonización hidrotermal (CHT)	Transformar residuos húmedos en hidrochar y licor orgánico en medio acuoso a temperaturas moderadas.	Lodos de depuradora, restos de poda urbana y mezclas orgánicas húmedas.	Adecuado para biomasa con alta humedad; genera sólido con mayor densidad energética y licor valorizable por digestión anaerobia.	8	Proceso sumidero. Se integra con digestión anaerobia y rutas de uso de hidrochar como combustible o enmienda de suelos.
Liquefacción hidrotermal (LHT)	Producir bioocrudo a partir de biomasa húmeda a alta temperatura y presión.	Lodos, algas y mezclas orgánicas con alto contenido de agua.	Evita secado previo y genera combustible líquido denso energéticamente.	8	Complementa digestión anaerobia en residuos muy húmedos y puede conectarse a refinarias convencionales.

Tabla 3. Continuación-4

Técnica / operación unitaria	Función principal en la biorrefinería	Tipo de biomasa / efluente objetivo	Ventajas operativas clave	NMT	Integración en cascada / sinergias
Peletizado / briquetado de biomasa	Compactar biomasa para facilitar almacenamiento, transporte y uso térmico.	Paja, astillas, serrín y mezclas lignocelulósicas secas.	Incrementa densidad aparente y estandariza el combustible sólido; industria y equipos bien desarrollados.	9	Complementa líneas que entregan biomasa sólida; los pellets abastecen calderas internas o mercados externos.
Combustión / co- combustión en caldera (cogeneración)	Generar calor, vapor y electricidad a partir de biomasa sólida.	Flujos heterogéneos de residuos lignocelulósicos y fracciones de bajo valor material.	Tecnología madura, base instalada amplia y capacidad de gestionar mezclas complejas.	9	Opera como proceso sumidero al final del lineal, suministrando energía térmica y eléctrica a la propia planta.

CAPÍTULO 4

DOWNSTREAM PROCESSING ETAPAS INICIALES

El *downstream processing* inicial condiciona buena parte de la calidad final del producto y del coste operativo por unidad de biomasa procesada. En esta etapa se decide hasta dónde puede avanzarse en pureza, qué rendimiento real tendrán las rutas de valorización y cuánto costará convertir cada corriente intermedia en un producto aprovechable.

En un esquema clásico monoproducto, como los habituales en la industria farmacéutica o alimentaria, el diseño del tren de procesamiento posterior se orienta a una única matriz relativamente constante y a un solo producto o familia de productos bien definidos. Esto permite optimizar una secuencia fija de operaciones para una ventana estrecha de composición: se afina una línea para un tipo de caldo, unos rangos de sólidos y unas especificaciones de pureza concretas, y todo el tren de procesado gira alrededor de ese objetivo.

En una biorrefinería de segunda generación, el punto de partida es distinto. El mismo tren de *downstream processing* debe ser capaz de trabajar con efluentes procedentes de varias líneas de valorización, con composiciones muy diferentes entre sí y, a menudo, con variaciones estacionales. A lo largo de una campaña, o entre campañas sucesivas, el mismo tren puede tener que adaptarse a licores ricos en azúcares y ácidos orgánicos, caldos viscosos con alta carga de partículas y restos celulares, y corrientes residuales de salida muy variables que deben dirigirse a usos diferentes. Esto obliga a dejar de pensar en “un tren optimizado

para un único producto” y pasar a diseñar una infraestructura compartida con más etapas y con capacidad de *bypassear* operaciones para ser capaz de operar con más de una matriz y de hacerlo sin comprometer ni la estabilidad de la planta ni la calidad de los productos.

En este contexto, operaciones como clarificación, filtración, centrifugación, deshidratación mecánica, membranas, extracción líquido-líquido o CO₂ en condiciones supercríticas dejan de plantearse como bloques fijos y pasan a funcionar como módulos combinables. El criterio general se mantiene: retirar primero volumen y materia no deseada con tecnologías sencillas, concentrar antes de las operaciones más costosas y aplicar al final las separaciones más selectivas. La diferencia es que, en una biorrefinería, esa lógica debe ser válida para varios efluentes distintos que comparten, total o parcialmente, el mismo tren.

Por todo ello, el diseño de las etapas iniciales de *downstream processing* comienza por responder con claridad a tres preguntas: i) dónde y cómo de amplio es el rango de producto que interesa recuperar; ii) en qué estado físico se encuentran las corrientes que llegan al tren (licores bombeables frente a lodos espesos); iii) y qué uso se quiere dar a las fracciones que no contienen el producto principal, ya sea como materia prima para otras valorizaciones, como fuente de energía o como corriente de salida tratada. Los subapartados siguientes ofrecen un marco para ordenar las operaciones y para entender cómo se reparten funciones entre líneas y equipos en un entorno multiproducto como el de las biorrefinerías, buscando respuestas a los interrogantes expuestos.

Rutas de diseño según la localización del producto

La primera decisión del tren de *downstream processing* es localizar el producto: dentro de un microorganismo, disuelto o suspendido en un efluente líquido, o presente como sólido separado. De esa localización derivan tres rutas tipo:

a) Producto intracelular

Si el producto está dentro de una célula (por ejemplo, biopolímeros microbianos, enzimas o proteínas), el primer bloque del *downstream processing* debe romper esa célula. Esto implica incluir una operación de lisis (homogeneización a alta presión, molienda con perlas, tratamientos enzimáticos o químicos) seguida de una separación sólido-líquido robusta, normalmente con un tren de operaciones que incluye centrifugación y filtración a presión. Los caldos tienen un contenido elevado de sólidos y una viscosidad elevada, de modo que el consumo de energía y la selección de equipos quedan muy condicionados por estas propiedades.

b) Producto en efluente líquido/licor

Si el producto está disuelto en el medio (por ejemplo, ácidos orgánicos, azúcares, pigmentos solubles u otros metabolitos), el objetivo inicial es clarificar y estabilizar el licor antes de concentrar o purificar. Aquí se utilizan decantación, clarificación gravitatoria o de alta tasa, centrifugación de discos y filtración tangencial para retirar sólidos en suspensión y coloides. Una vez obtenidos licores claros, es más eficiente aplicar operaciones como evaporación, ultrafiltración, nanofiltración u otras etapas de concentración y purificación.

c) Producto en forma sólida o lodo

Cuando el producto de interés es un sólido (por ejemplo, biochar, biomasa para uso agrícola o sales cristalizadas) o se desea obtener un lodo con buena manejabilidad, el foco se traslada a la deshidratación mecánica. Prensas de banda, filtros prensa o prensas de tornillo, permiten aumentar la materia seca y reducir drásticamente el volumen a manejar, lo que disminuye el consumo energético del secado térmico posterior y facilita la logística.

La Figura 7 resume estos tres casos en un diagrama sencillo que cruza la posición del producto (intracelular o en el licor) con el tipo de matriz (fluida o sólida) y señala qué familias de operaciones suelen abrir el tren en cada situación.

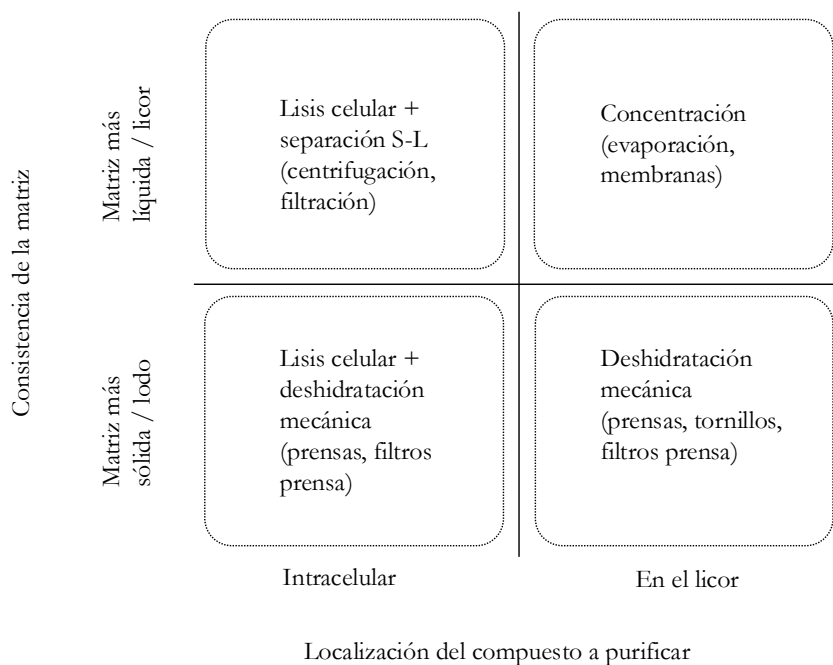


Figura 7. Mapa de localización del producto y operaciones iniciales de *downstream processing*. Diagrama en el que el eje horizontal distingue entre productos intracelulares y productos presentes en el licor, y el eje vertical entre matrices líquidas o bombeables y matrices sólidas o tipo lodo. En cada cuadrante se indican las familias de operaciones que suelen abrir el tren de *downstream processing*.

Funciones de las etapas iniciales del *downstream processing*

Definida la localización del producto, cada bloque inicial del *downstream processing* debe cumplir una función concreta. Estas funciones pueden agruparse en tres niveles operativos:

1. Eliminar primero lo que es fácil y barato de separar.

Aquí entran rejillas (incluidas en equipos industriales tales como despulpadoras), tamices, desarenadores y decantación o clarificación primaria. El objetivo es retirar sólidos gruesos y sedimentables (arenas, fibras, partículas

grandes) con equipos sencillos y de bajo coste. Todo lo que se retire en esta fase no llegará a las operaciones más sensibles o caras.

2. Reducir el volumen de agua antes de las etapas costosas.

Una vez retirada la fracción gruesa, se trabaja sobre caldos y lodos para concentrarlos. Se utilizan centrifugación, deshidratación mecánica, evaporación y, en algunos casos, ultrafiltración. Cuanto más se reduzca el volumen en esta fase, menores serán el tamaño y el consumo energético de secadores, cristalizadores, columnas de cromatografía y otras operaciones de alto coste específico.

3. Ajustar la calidad de cada corriente al uso que va a tener.

Las corrientes que van a purificación fina deben llegar con la mínima presencia de sólidos, coloides y compuestos que interfieran. Las que se destinan a digestión anaerobia deben mantener una fracción orgánica adecuada para producir biogás de forma estable. Las que se pretenden reutilizar o verter se ajustan para cumplir los requisitos internos o regulatorios: contenido de materia orgánica, nutrientes y posibles sustancias problemáticas.

La Figura 8 ofrece un ordenamiento cronológico para dejar de ver las etapas como piezas aisladas.

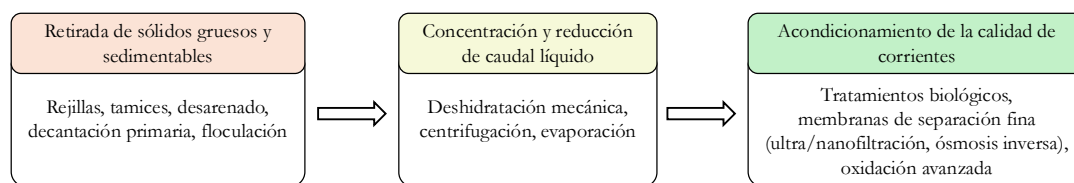


Figura 8. Regla de oro del *downstream processing* inicial en tres etapas. Esquema de flujo que resume la lógica de diseño de las etapas iniciales de *Downstream processing*.

Selección de tecnologías según las características del efluente

Definidas directrices de diseño y la función de cada bloque, la elección entre tecnologías concretas se apoya frecuentemente en tres propiedades del efluente que son fácilmente cuantificables: el contenido de sólidos totales, la viscosidad y la carga orgánica medida como demanda química de oxígeno. La tabla 4 resume todas las tecnologías que se contemplan habitualmente en esta etapa de procesamiento.

I. Contenido de sólidos totales y tamaño de partícula

Cuando los sólidos son bajos y sedimentan con facilidad, la decantación o la clarificación simple suelen ser suficientes y resultan económicas. A medida que aumenta la fracción de sólidos finos o la concentración total, la eficiencia de estas operaciones disminuye y es más adecuado recurrir a centrifugación o filtración a presión. En el extremo, los lodos con varios puntos porcentuales de materia seca requieren equipos específicos de deshidratación mecánica (prensas, filtros prensa, deshidratador de tornillo) antes de plantearse cualquier secado térmico.

II. Viscosidad del caldo

Si la corriente se vuelve muy viscosa, la mezcla se dificulta, aumentan las pérdidas de carga y se incrementa el riesgo de colapso en membranas. En estas condiciones, ciertas tecnologías dejan de ser viables o rentables y es necesario optar por geometrías de canal más amplio, por menores gradientes de presión o por otras rutas de concentración y separación. La viscosidad, por tanto, marca qué equipos pueden operar de manera estable y cuáles no.

III. Demanda química de oxígeno: recurso o carga

La demanda química de oxígeno (DQO) mide la carga orgánica presente en el efluente. Desde el punto de vista del diseño, interesa distinguir dos casos:

- Cuando la materia orgánica es mayoritariamente biodegradable y el contexto de la planta hace interesante producir biogás u otros productos, la DQO se considera un recurso. En este caso, el lineal de equipos se diseña para conducir estas corrientes hacia digestión anaerobia u otros procesos biológicos de valorización energética.

- Cuando la materia orgánica no es fácilmente biodegradable o no tiene interés como recurso, la DQO se convierte en una carga que hay que reducir al menor coste posible. En este escenario se combinan tratamientos biológicos, membranas y, solo si el reuso o la normativa lo exigen, procesos de oxidación avanzada.

La Figura 9 integra estos tres parámetros en un mismo esquema. En el eje horizontal se representa el aumento de sólidos totales y viscosidad y en el eje vertical la carga orgánica. Sobre este plano se marcan las zonas en las que resultan más naturales la clarificación, la centrifugación, la deshidratación mecánica, la digestión anaerobia o los tratamientos de pulido, de modo que el lector pueda ver cuándo es razonable pasar de una familia de tecnologías a otra a medida que cambia la naturaleza del efluente.

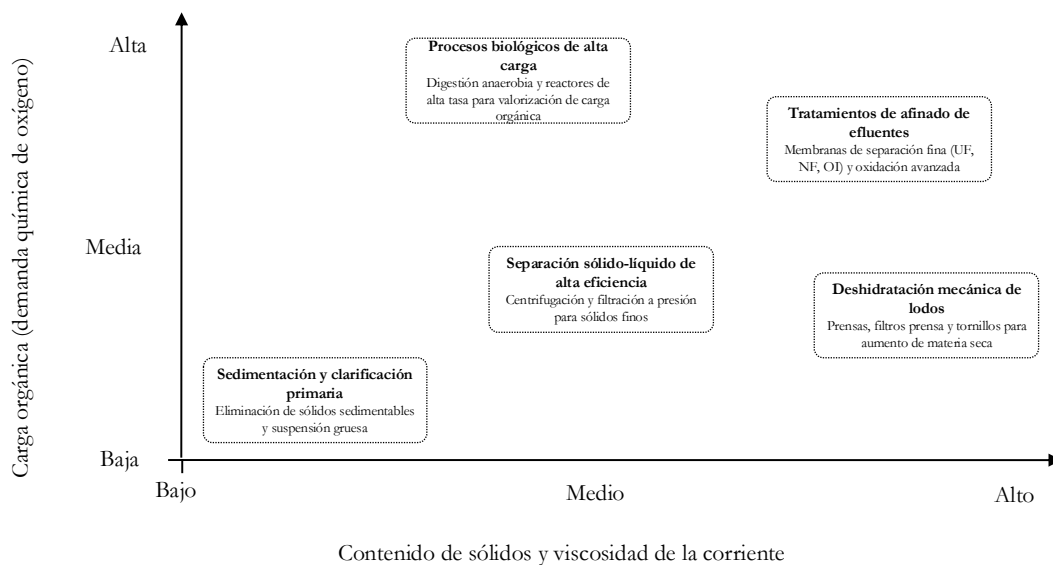


Figura 9. Rango de aplicación de tecnologías según sólidos, viscosidad y carga orgánica. Gráfico en el que el eje horizontal representa el incremento conjunto del contenido de sólidos totales y de la viscosidad de la corriente, y el eje vertical la carga orgánica expresada como demanda química de oxígeno.

Tabla 4. Tecnologías de *downstream processing* inicial (pre-purificación). La tabla recoge operaciones de separación, concentración, lisis, adsorción, desinfección y tratamiento biológico aplicables a caldos, lodos y efluentes de biorrefinería.

Técnica / operación unitaria	Función principal en la biorrefinería	Tipo de biomasa / efluente objetivo	Ventajas operativas clave	NMT	Integración en cascada / sinergias
Decantación y clarificación gravitatoria	Separar sólidos sedimentables por gravedad en decantadores, espesadores y clarificadores.	Lodos y aguas con sólidos en suspensión tras coagulación/floculación.	Bajo coste operativo, diseño simple y alta robustez a variaciones moderadas de carga.	9	Etapas base antes de deshidratación mecánica, filtración o procesos biológicos.
Clarificación de alta tasa (floculación lastrada)	Formar flóculos pesados con material inerte para acelerar sedimentación.	Corrientes con picos de caudal o turbidez, descargas de pretratamientos o torrentes de agua de lluvia.	Compacta, respuesta rápida y fácil de implantar en plantas existentes.	9	Protege centrifugadoras, filtros y resinas de intercambio situados aguas abajo.
Centrífuga decantadora (decanter)	Espesar y deshidratar lodos y biomasa con alto contenido de sólidos en continuo.	Lodos de fermentación, lodos biológicos y suspensiones densas.	Alta capacidad de manejo de sólidos, operación continua y robustez mecánica.	9	Primera elección para desaguado previo a secado, compostaje o digestión anaerobia.
Centrífuga-filtro (basket / filtro centrifugo)	Separar sólido-líquido mediante filtración centrífuga por lotes.	Suspensiones donde el sólido es producto o interesa obtener tortas muy secas.	Alta velocidad de filtración y baja humedad residual en la torta.	9	Adecuada como etapa previa a secado térmico o molienda de producto sólido.
Centrífuga multicámara (bowl de depósito con separadores)	Fracccionar sólidos por tamaños en operación discontinua mediante sedimentación en varias cámaras.	Lotes especiales o suspensiones donde se requiera separación por tamaño sin equipamiento complejo.	Permite fraccionamientos específicos en volúmenes moderados.	9	Uso puntual en líneas donde se precise clasificación granulométrica detallada antes de purificación fina.
Homogeneización a alta presión (lisis mecánica)	Romper células y liberar productos intracelulares en caldos de fermentación.	Biomasa microbianas (bacterias, levaduras) en suspensión densa.	Proceso continuo, escalable y sin aditivos químicos; permite lisis eficiente a gran volumen.	9	Puerta de entrada a etapas de purificación de proteínas, enzimas y polímeros intracelulares.

Tabla 4. Continuación

Técnica / operación unitaria	Función principal en la biorrefinería	Tipo de biomasa / efluente objetivo	Ventajas operativas clave	NMT	Integración en cascada / sinergias
Concentración térmica (evaporación RMV, película raspada)	Retirar agua de licores para reducir volumen antes de secado o cristalización.	Licores de fermentación, extractos, soluciones de ácidos orgánicos y efluentes concentrables.	RMV ofrece alta eficiencia energética; película raspada protege productos sensibles y licor viscoso.	9	Previa a secado, cristalización, destilación o membranas; facilita cierre hídrico con recuperación de condensados.
Deshidratación mecánica (prensa de banda, tornillo, filtro prensa, filtro prensa de membrana)	Reducir contenido de agua de lodos y biomasa antes de secado térmico o transporte.	Lodos biológicos, fibras, algas, bagazos y orujos.	Menor consumo energético que el secado térmico; tecnologías modulares y robustas.	9	Etapla intermedia clave entre clarificación y valorización (compostaje, digestión, secado final).
Electrocoagulación	Generar coagulante <i>in situ</i> para desestabilizar coloides, emulsiones y ciertos metales.	Aguas con aceites/grasas, color y turbidez donde la química convencional es costosa o variable.	Dosificación ajustable, sistema modular y reduce consumo de coagulantes externos.	7-8	Se ubica antes de clarificación/FAD y puede reducir la carga de contaminantes a etapas biológicas o de membranas.
Resinas de intercambio iónico	Retirar iones específicos (amonio, nitratos, metales, dureza) para ajustar calidad de agua o corrientes de proceso.	Aguas de proceso que requieren especificaciones iónicas estrictas.	Alta selectividad y obtención de efluentes de gran calidad.	9	Encaja en esquemas de economía circular del agua, antes de membranas de alta presión o reutilización interna.
Carbón activado granular (CAG)	Adsorber compuestos disueltos (olor, color, microcontaminantes) como etapa de pulido.	Aguas parcial o totalmente tratadas que necesitan estabilización de calidad.	Tecnología robusta, regenerable y sencilla de operar.	9	Se sitúa al final del tren de tratamiento de agua antes de reúso o vertido.
Carbón activado en polvo (CAP)	Adsorción puntual de contaminantes en episodios de picos de carga o incidencias.	Aguas con episodios puntuales de contaminantes específicos o color.	Alta flexibilidad y rápida respuesta, sin necesidad de grandes inversiones.	9	Herramienta de apoyo que se acopla a depósitos o floculadores existentes.
Electrodialisis / electrodialisis reversible (ED/EDR)	Desalar selectivamente y concentrar sales utilizando membranas iónicas y campo eléctrico.	Corrientes salinas donde interese ajustar conductividad sin llegar a OI.	Permite recuperar o ajustar sales específicas con menor presión que membranas de ósmosis inversa.	8-9	Interesante en circuitos internos de agua/salmuera y para precalibrar calidades antes de etapas de alta pureza.

Tabla 7. Continuación

Técnica / operación unitaria	Función principal en la biorrefinería	Tipo de biomasa / efluente objetivo	Ventajas operativas clave	NMT	Integración en cascada / sinergias
Ósmosis inversa (OI)	Eliminar sales y compuestos de bajo peso molecular para obtener agua de alta pureza.	Aguas de proceso para calderas, enjuagues críticos y circuitos de reuso interno.	Alta eficacia de separación con huella en planta reducida.	9	Etapas final de cierre hídrico en combinación con UF/NF y tratamientos de pulido.
Extracción orgánica clásico (L/L)	Transferir solutos relativamente hidrofóbicos desde fase acuosa a disolvente orgánico inmiscible.	Caldos de fermentación con antibióticos, moléculas hidrofóbicas o productos intermedios.	Alta capacidad de concentración y selectividad en esquemas en contracorriente.	9	Previo a destilación o cristalización para concentrar producto; complementa cromatografía en algunos casos.
Extracción en dos fases acuosas	Separar proteínas/enzimas entre dos fases acuosas (polímero/sal o polímero/polímero) con mínima desnaturalización.	Caldos ricos en proteínas y enzimas donde la bioactividad sea crítica.	Proceso suave, biocompatible y sin disolventes orgánicos.	6	Paso intermedio verde antes de cromatografía de alta resolución.
CO ₂ supercrítico (SC-CO ₂)	Extraer compuestos no polares (aceites, aromas, carotenoides) a baja temperatura.	Matrices agro-residuales ricas en aceites, pigmentos y compuestos volátiles.	Uso de solvente inocuo y reciclable; alta selectividad ajustable por presión y temperatura.	9	Puede ser primera valorización de alto valor antes de rutas de fermentación o valorización energética.
Cromatografía (intercambio iónico, afinidad, exclusión, interacción)	Purificar ingredientes de alto valor a muy alta pureza mediante separación por carga, tamaño o afinidad.	Fracciones concentradas de enzimas, proteínas, péptidos, ácidos orgánicos o metabolitos.	Selectividad excepcional y capacidad de alcanzar calidades grado ingrediente o farmacéutico.	9	Colocada al final de la cadena de purificación tras clarificación y concentración; clave para productos de alto valor añadido.
Cristalización	Obtener sólidos puros a partir de soluciones sobresaturadas de pequeñas moléculas.	Soluciones concentradas de ácidos orgánicos, azúcares o antibióticos.	Alta pureza y producto sólido estable, con costes unitarios competitivos.	9	Etapas final habitual tras evaporación y purificación para transformar disolución en producto comerciable.

Tabla 4. Continuación-3

Técnica / operación unitaria	Función principal en la biorrefinería	Tipo de biomasa / efluente objetivo	Ventajas operativas clave	NMT	Integración en cascada / sinergias
Reactor discontinuo secuencial (SBR)	Realizar ciclos de tratamiento biológico (llenado, reacción, decantación, descarga) en un solo tanque.	Aguas con caudal y composición variables (campañas, lotes).	Alta flexibilidad y menor inversión de capital en plantas medianas.	9	Alternativa compacta a lodos activados convencionales; combinable con clarificación y desinfección UV.
Lecho móvil de biopelícula (MBBR)	Intensificar tratamiento biológico haciendo crecer biomasa en soportes plásticos móviles.	Aguas con choques de carga o plantas que precisen aumentar capacidad sin ampliar volumen.	Robusto y sencillo de operar; aumenta capacidad biológica sin grandes obras civiles.	9	Se añade a líneas existentes de lodos activados para mejorar rendimiento.
Biorreactor de membranas (MBR)	Combinar tratamiento biológico con separación por membrana para obtener efluente de alta calidad.	Aguas que requieran reuso interno o descarga con especificaciones muy estrictas.	Efluente muy claro y baja huella en planta.	9	Etapa avanzada antes de OI y esquemas de reuso de agua; reduce carga a procesos de pulido.
Lodo granular aerobio	Formar gránulos densos que concentran biomasa y mejoran sedimentación y eliminación de nutrientes.	Aguas con alta carga biodegradable donde se busque intensificar tratamiento en poco espacio.	Menor huella y demanda de aeración; sedimentación muy rápida.	9	Alternativa intensificada a lodos activados; reduce tamaño de clarificadores.
Reactor anaerobio de alta carga	Convertir materia orgánica en biogás con baja producción de lodos.	Corrientes con alta demanda química de oxígeno (DQO) biodegradable (azúcares, alcoholes) de pretratamientos o fermentación.	Recupera energía y reduce carga orgánica con poca generación de lodo.	9	Se integra aguas abajo de procesos industriales para generar biogás destinado a cogeneración o upgrading.
Humedales construidos	Pulir efluentes mediante procesos físicos, químicos y biológicos extensivos con vegetación.	Efluentes previamente tratados biológica o físicoquímica en entornos con disponibilidad de terreno.	Muy bajo consumo energético, alta resiliencia y co-beneficios ambientales y paisajísticos.	9	Etapa final de pulido y demostración de compromiso ambiental en biorrefinerías rurales.

CAPÍTULO 5

ETAPAS FINALES O PURIFICACIÓN

Las etapas finales de *downstream processing* convierten una corriente de valor en un producto comercializable. En ellas se fijan la pureza alcanzable, el formato físico de salida y la estabilidad durante almacenamiento y transporte; por ello, su diseño debe partir de la calidad exigida por el mercado, no de la tecnología disponible. Por tanto, el punto de partida es la especificación objetivo: qué pureza mínima debe tener el producto, qué impurezas son críticas, en qué forma se va a comercializar y durante cuánto tiempo debe conservar sus propiedades sin degradarse. A partir de esa especificación, la secuencia de operaciones se construye hacia atrás, seleccionando solo aquellas combinaciones que pueden cumplirla de forma reproducible y con un coste asumible por el precio de los producto(s) final(es). En la tabla 5 se sintetiza esta idea para productos habituales de biorrefinerías, relacionando el nivel de exigencia del mercado con la pureza objetivo y con las familias de operaciones que suelen entrar en juego en cada caso. Mientras en la tabla resumen de tecnologías de final de capítulo (Tabla 7) se muestran las opciones más relevantes que deben ser contempladas para el diseño de esta etapa de la biorrefinerías.

Exigencia regulatoria

El uso final del producto define el nivel regulatorio que deberá cumplir la línea de purificación. En el extremo menos exigente se encuentran los productos de uso energético o técnico, como bioaceites, gas de síntesis o materiales carbonosos. En estos casos, las especificaciones se centran en estabilidad,

contenido de agua, cenizas, metales y compuestos corrosivos. Las etapas finales se orientan a controlar estas variables con el mínimo número de operaciones, priorizando tecnologías robustas y de bajo coste por unidad, aunque la pureza química no sea extrema. En un nivel intermedio se sitúan los productos destinados a alimentación humana o animal, como ácidos orgánicos, fibras, proteína unicelular o extractos funcionales (crudos o purificados). Aquí, además de las propiedades fisicoquímicas, hay que garantizar límites estrictos de contaminantes físicos y químicos, ausencia de microorganismos patógenos y un grado de trazabilidad acorde con la normativa alimentaria. Esto obliga a utilizar materiales aptos para contacto con alimento, esquemas claros de limpieza y operaciones finales que no introduzcan residuos difíciles de justificar ante una autoridad reguladora. En el nivel más exigente están los productos de alta pureza para usos farmacéuticos o sanitarios, como determinadas enzimas o ingredientes bioactivos puros. En este segmento se requiere un control muy fino de impurezas, un historial trazable del proceso y una capacidad demostrada de reproducir lote a lote las mismas características de calidad. Esto limita de forma clara el abanico de tecnologías utilizables y suele conducir a líneas de purificación que combinan cromatografía, adsorción selectiva, membranas de alta separación, cristalización y secados muy controlados.

Tabla 5. Relación entre familias de producto, trenes de etapas finales, coste económico, complejidad operativa, adaptabilidad del tren y especificidad al producto.

Familia de producto	Tren de etapas finales (resumen)	Coste económico	Complejidad operativa	Adaptabilidad del tren de operaciones a otros productos	Especificidad al producto
Lignina (grado técnico, combustible / relleno)	Precipitación → lavado → secado → molienda	**	**	***	*
Lignina de mayor valor (resinas, polímeros, aditivos)	Fraccionamiento / membranas → lavado → purificación parcial → secado / formulación	***	***	**	***
Celulosa y fibras (materiales, refuerzo, MCC)	Lavado → purificación / blanqueo suave → deshidratación mecánica → secado	**	**	**	**
Biomasa microbiana (SCP inactiva, ingrediente proteico)	Centrifugación → lavado / concentración → inactivación → secado (spray / lecho)	***	***	**	**
Probióticos / cultivos vivos	Centrifugación suave → concentración → crioprotección → liofilización / atomizado	****	****	*	****
Azúcares funcionales simples y ácidos “commodity”	Clarificación → desmineralización parcial → evaporación → cristalización / formulación líquida	**	**	***	**

Tabla 5. Continuación

Familia de producto	Tren de etapas finales (resumen)	Coste económico	Complejidad operativa	Adaptabilidad del tren de operaciones a otros productos	Especificidad al producto
Ácidos orgánicos modificados y derivados especiales	Clarificación fina → separación de subproductos → fraccionamiento selectivo → secado/cristalización	***	***	**	***
Extractos crudos bioactivos / postbióticos	Clarificación → concentración → estabilización (pH, antioxidantes, conservantes) → formulación	***	***	**	**
Extractos vegetales purificados / vitaminas	Extracción → filtración → purificación (cromatografía / cristalización) → secado / formulación	****	****	*	****
Sales minerales de origen biorrefinería	Clarificación → eliminación de orgánicos → cristalización / precipitación → secado	**	**	***	**

* = bajo; ** = medio-bajo; *** = medio-alto; **** = muy alto (coste, complejidad, adaptabilidad o especificidad según la columna).

Formato físico final, estabilidad y logística

Fijado el nivel de calidad que se quiere alcanzar, el siguiente criterio es el formato físico con el que el producto va a salir de planta. Un mismo compuesto puede ponerse en el mercado como sólido cristalino, polvo amorfo, solución concentrada, emulsión o suspensión. Cada opción implica un conjunto diferente de operaciones finales y un comportamiento distinto durante almacenamiento, transporte y uso.

Si se busca un sólido cristalino, el tren final suele combinar concentración, cristalización controlada, separación sólido-líquido/líquido-líquido (S-L/L-L) y secado. La forma de los cristales, la presencia de otros compuestos en la matriz y la eliminación de disolventes influyen tanto en el rendimiento como en la funcionalidad del producto. Si lo que se quiere es un polvo amorfo o un sólido de baja densidad aparente, tecnologías como el secado por atomización, la liofilización o el secado en lecho fluidizado toman relevancia. Estas alternativas permiten estabilizar productos sensibles, pero tienen un coste energético y de inversión elevado, por lo que su uso se justifica por el valor del producto y la ausencia de opciones más económicas.

En el caso de soluciones, emulsiones o suspensiones, el foco se desplaza a la formulación, donde con frecuencia se requiere el uso de agitadores mecánicos, homogeneizadoras de alta cizalla o de alta presión. Además, suele ser necesario ajustar la concentración, el pH, la fuerza iónica y, cuando procede, añadir estabilizantes aceptables para el mercado objetivo. También se debe controlar la viscosidad para facilitar bombeo, dosificación y envasado.

La vida útil que se espera del producto define si basta con un control adecuado de proceso o si son necesarias etapas adicionales de conservación, como tratamiento térmico suave, filtración estéril o envasado en atmósferas protectoras. La Tabla 6 sintetiza, para cada formato final, qué familias de productos de biorrefinería tienden a utilizarlo como opción preferente, alternativa o puntual, ofreciendo una guía para alinear la elección de formato con la naturaleza del producto y las exigencias de estabilidad y uso.

Tabla 6. Adecuación de los formatos finales de producto según familia tecnológica. La matriz diferencia formatos preferentes, frecuentes o alternativos y puntuales o de nicho para soluciones concentradas, emulsiones o suspensiones, polvos o granulados y sólidos cristalinos.

Nivel de adecuación \ Formato final	Solución concentrada	Emulsión o suspensión estable	Polvo amorfo o granulado	Sólido cristalino
Formato preferente	Carbohidratos y ácidos orgánicos; extractos bioactivos / postbióticos; extractos purificados / vitaminas hidrosolubles	Extractos bioactivos lipofílicos; probióticos / cultivos vivos en formulaciones líquidas refrigeradas	Biomasa microbiana inactiva; probióticos secos; prebióticos y azúcares funcionales; extractos bioactivos / postbióticos; sales minerales; extractos purificados / vitaminas	Carbohidratos y ácidos orgánicos sencillos; sales minerales purificadas; vitaminas y micronutrientes cristalizables
Formato frecuente / alternativo	Biomasa microbiana inactiva como slurry intermedio; sales minerales en formulación líquida; suspensiones concentradas de celulosa y fibras	Lignina en dispersión acuosa; celulosa y fibras en suspensión; extractos purificados en matrices oleosas	Lignina en polvo o granulado técnico; celulosa y fibras secas; carbohidratos y ácidos orgánicos en formulaciones granuladas	Celulosa y fibras derivatizadas; algunas mezclas sólidas de extractos purificados y vitaminas
Formato puntual o de nicho	Lignina y derivados en solución; probióticos en solución con vida útil corta y cadena de frío estricta	Carbohidratos y ácidos orgánicos en formulaciones especiales; biomasa microbiana inactiva como producto final líquido	Extractos extremadamente termolábiles que solo pueden estabilizarse mediante liofilización intensiva	Lignina y derivados; extractos bioactivos complejos; biomasa microbiana inactiva; probióticos en forma sólida poco habitual

Margen económico, infraestructura y decisión de tecnologías

Como las etapas finales de *downstream processing* concentran una parte importante del coste por unidad de producto, la selección tecnológica no puede basarse solo en el rendimiento técnico. Debe considerar el mercado objetivo, el margen económico disponible y la infraestructura ya existente en la biorrefinería. Definir el segmento de mercado y la especificación mínima aceptable (pureza, impurezas críticas, formato y vida útil) permite fijar la exigencia regulatoria y descartar desde el inicio operaciones incompatibles con el retorno económico del producto. La Figura 10 integra estos tres elementos (nivel de mercado y exigencia regulatoria, margen económico accesible y conjunto de equipos disponibles) resumiendo el aporte de cada área para desarrollar estrategias viables de purificación de productos de biorrefinería.

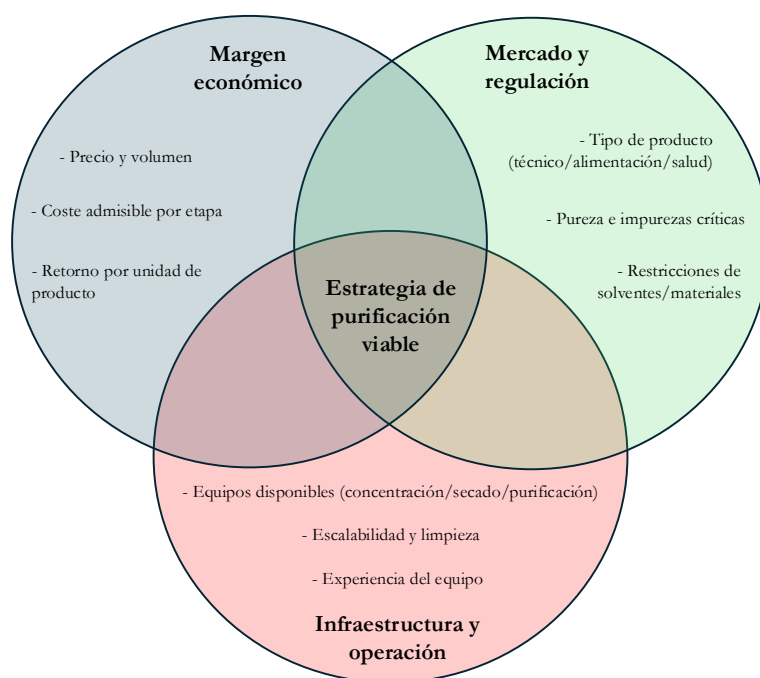


Figura 10. Parámetros clave para definir una estrategia de purificación viable en biorrefinerías. Los tres bloques de decisión: margen económico, mercado y regulación e infraestructura y operación dan lugar al punto de intersección teórico que se debe alcanzar para obtener un conjunto realista de estrategias de purificación que la biorrefinería puede implementar.

Tabla 7. Tecnologías finales de *downstream processing* (purificación, concentración, extracción, cristalización, secado, etc.).
La tabla resume su función, corrientes objetivo, ventajas operativas, nivel de madurez tecnológica e integración potencial dentro del tren de *downstream processing*.

Técnica / operación unitaria	Función principal en la biorrefinería	Tipo de biomasa / efluente objetivo	Ventajas operativas clave	NMT	Integración en cascada / sinergias
Centrifuga de discos apilados	Clarificar caldos con baja-media carga de sólidos finos en continuo.	Caldos de fermentación, suspensiones de levaduras y líquidos con sólidos finos.	Alta capacidad de clarificación, diseños autoclarificantes y compatible con CIP/SIP.	9	Paso previo ideal a membranas y cromatografía en líneas de ingredientes y bioproductos.
Centrífuga tubular	Capturar partículas ultrafinas a altas velocidades de giro.	Caldos diluidos con partículas muy pequeñas (fracciones celulares finas, virus, vacunas).	Excelente rendimiento de separación en partículas submicrónicas.	9	Se usa cuando la especificación de claridad es muy exigente antes de etapas de purificación de alto valor.
Filtración tangencial (cross-flow)	Clarificar y concentrar caldos reduciendo colmatación gracias a flujo tangencial.	Caldos de fermentación, extractos y suspensiones con sólidos finos.	Operación continua, modular y sin disolventes; compatible con CIP/SIP.	9	Precede a UF, NF, cromatografía o cristalización, reduciendo volumen y carga de sólidos.
Ultrafiltración y diafiltración	Retener macromoléculas (proteínas, enzimas, polímeros) y eliminar sales/impurezas de bajo peso molecular.	Caldos con proteínas, enzimas o biopolímeros en solución.	Proceso suave, bajo consumo energético frente a evaporación y alta selectividad por tamaño.	9	Previo a cromatografía, secado y formulación de ingredientes funcionales.
Nanofiltración (NF)	Rechazar iones divalentes y moléculas medianas, ablandando agua y reduciendo color y orgánicos.	Corrientes líquidas que requieran reducción de dureza y orgánicos de tamaño medio.	Compromiso favorable entre calidad obtenida y consumo energético.	9	Paso intermedio antes de OI o como etapa de pulido para aguas de proceso.

Tabla 7. Continuación

Técnica / operación unitaria	Función principal en la biorrefinería	Tipo de biomasa / efluente objetivo	Ventajas operativas clave	NMT	Integración en cascada / sinergias
Ósmosis inversa (OI)	Eliminar sales y compuestos de bajo peso molecular para obtener agua de alta pureza.	Aguas de proceso para calderas, enjuagues críticos y circuitos de reuso interno.	Alta eficacia de separación con huella en planta reducida.	9	Etapla final de cierre hídrico en combinación con UF/NF y tratamientos de pulido.
Extracción orgánica clásico (L/L)	Transferir solutos relativamente hidrofóbicos desde fase acuosa a disolvente orgánico inmiscible.	Caldos de fermentación con antibióticos, moléculas hidrofóbicas o productos intermedios.	Alta capacidad de concentración y selectividad en esquemas en contracorriente.	9	Previo a destilación o cristalización para concentrar producto; complementa cromatografía en algunos casos.
Extracción en dos fases acuosas	Separar proteínas/enzimas entre dos fases acuosas (polímero/sal o polímero/polímero) con mínima desnaturalización.	Caldos ricos en proteínas y enzimas donde la bioactividad sea crítica.	Proceso suave, biocompatible y sin disolventes orgánicos.	6	Paso intermedio verde antes de cromatografía de alta resolución.
CO ₂ supercrítico (SC- CO ₂)	Extraer compuestos no polares (aceites, aromas, carotenoides) a baja temperatura.	Matrices agro-residuales ricas en aceites, pigmentos y compuestos volátiles.	Uso de solvente inocuo y reciclable; alta selectividad ajustable por presión y temperatura.	9	Puede ser primera valorización de alto valor antes de rutas de fermentación o valorización energética.
Cromatografía (intercambio iónico, afinidad, exclusión, interacción)	Purificar ingredientes de alto valor a muy alta pureza mediante separación por carga, tamaño o afinidad.	Fracciones concentradas de enzimas, proteínas, péptidos, ácidos orgánicos o metabolitos.	Selectividad excepcional y capacidad de alcanzar calidades grado ingrediente o farmacéutico.	9	Colocada al final de la cadena de purificación tras clarificación y concentración; clave para productos de mayor valor.
Cristalización	Obtener sólidos puros a partir de soluciones sobresaturadas de pequeñas moléculas.	Soluciones concentradas de ácidos orgánicos, azúcares o antibióticos.	Alta pureza y producto sólido estable, con costes unitarios competitivos.	9	Etapla final habitual tras evaporación y purificación para transformar disolución en producto comerciable.

Tabla 7. Continuación-2

Técnica / operación unitaria	Función principal en la biorrefinería	Tipo de biomasa / efluente objetivo	Ventajas operativas clave	NMT	Integración en cascada / sinergias
Liofilización	Secar productos sensibles mediante congelación y sublimación al vacío.	Enzimas, probióticos, vacunas y otros bioproductos muy sensibles al calor.	Máxima conservación de bioactividad y estabilidad a largo plazo.	9	Última etapa para fracciones premium tras purificación y formulación líquida.
Secado por aspersión (spray drying)	Aromizar soluciones y secarlas rápidamente para obtener polvos estables.	Extractos, metabolitos y soluciones de sensibilidad térmica moderada.	Proceso continuo, escalable y con costos unitarios menores que la liofilización.	9	Última etapa de transformación de ingredientes líquidos concentrados a formatos sólidos en polvo.
Secado en lecho fluidizado	Secar partículas o gránulos húmedos con control uniforme de temperatura.	Cristales, gránulos y partículas tras cristalización o precipitación.	Buen control térmico, tiempos razonables y calidad homogénea del producto.	9	Etapa de acabado tras cristalización o granulación antes de envasado.
Secadores de banda y secadores flash/ring	Secar sólidos y partículas a diferentes escalas de tiempo y temperatura.	Ingredientes sensibles (banda) y partículas finas no pegajosas (flash/ring).	Banda: bajas temperaturas y flexibilidad; flash/ring: altísima capacidad y tiempos de residencia cortos.	9	Seleccionados según sensibilidad del producto y capacidad requerida; integrables con sistemas de recuperación de calor.
Secadores al vacío (palas, banda, bandejas) y secador de tambor	Secar pastas y sólidos a baja temperatura o con alta productividad.	Pastas, biomásas sensibles y productos donde la recuperación de solventes sea relevante.	Buen control de temperatura y posibilidad de recuperar solventes; tambor ofrece productividad elevada.	9	Usados como etapas finales en productos de alto valor o cuando se requiere recuperación de solvente/ agua a baja temperatura.

CAPÍTULO 6

FORMULADO DE PRODUCTOS

El formulado es la etapa que conecta el producto obtenido en la biorrefinería con sus condiciones reales de uso y comercialización. En productos biobasados, su papel es especialmente relevante porque la competitividad no depende solo de la composición, sino también de la estabilidad, el formato, la facilidad de aplicación y la aceptación por parte del usuario final. Además, no solo las prestaciones y el nicho son barrera para la adquisición por el cliente final, estos productos requieren un esfuerzo extra (no solo económico) de formación y concienciación del público receptor, con frecuencia más difícil de sortear que la propia limitación de prestación técnica del producto o mayor coste que pueda tener frente a su homólogo de fabricación tradicional.

El capítulo anterior contiene los principales procesos de refinado de productos de alto valor (extractos vegetales, aceites de alto valor, pigmentos, etc.), sin embargo, algunos productos derivados de las biorrefinerías deben ser acondicionados de forma diferente.

Productos que requieren procesos de polimerización y/o conformado

En biopolímeros y materiales, el objetivo de estas tecnologías es transformar la fracción obtenida en un formato comercial. Los casos más representativos son el PHB y el PLA, aunque la lógica también aplica a celulosas, fibras y otros

materiales derivados de biomasa. En términos de proceso, en algunos casos, como el de la celulosa, no se requieren etapas adicionales, mientras que, en otros, como el PHB, solo se necesitan procesos de conformado. En el caso del PLA, es necesario realizar una etapa previa de polimerización antes del conformado. Existen múltiples técnicas de conformado, aunque las más utilizadas en este tipo de polímeros son la extrusión en film, en filamento o en formato peletizado. Estas operaciones no solo transforman el biopolímero, sino que también reducen los tiempos de salida al mercado y mejoran el retorno económico.

Por otro lado, el destino final de estos compuestos puede ser variado: algunos se comercializan directamente; otros, como la micro- o nanocelulosa, así como las fibras vegetales brutas, pueden comercializarse o emplearse como agentes de refuerzo en el diseño de composites. Además, si la biorrefinería planteada contempla la obtención de efluentes ricos en aldehídos y fenoles, los principios de economía circular sobre los que se sustentan las biorrefinerías pueden invitar a soluciones empresariales que deriven en la formulación de las propias resinas fenol-aldehído que actúen como matriz en dichos composites.

Procesos sumidero

Se entiende como procesos de cierre de ciclo o ‘sumidero’ aquellos capaces de valorizar la totalidad de la biomasa que entra en proceso. Aunque pueden aplicarse como estrategia única, su mayor interés radica en integrarlos como etapa final dentro de rutas de proceso más amplias, junto a otras técnicas de valorización descritas. Esto se debe a que la conversión que ofrecen suele orientarse a la formulación de productos de valor añadido limitado, lo que compromete no solo el retorno económico si no el concepto sostenible de valorización en cascada. Sin embargo, su aplicación resulta fundamental en el diseño de industrias orientadas al residuo cero, al permitir derivar fracciones finales a nuevos productos y así lograr la reintroducción exitosa de todo el residuo inicial en la cadena de valor. La categoría de “procesos de valorización energética” encaja plenamente en este grupo, junto con algunas técnicas biológicas tradicionales como el compostaje, o mecánicas como el extrusionado y el briquetado.

Otras técnicas

Para muchos de los productos de alto valor generados en sistemas de biorrefinería —que frecuentemente se destinan a industrias muy específicas, como la farmacéutica o la alimentaria— puede ser necesario recurrir a tecnologías orientadas a reducir alteraciones microbianas, mejorar la texturización o moldeado del producto y optimizar su formato final, entre otros objetivos.

En esta categoría, tecnologías como las altas presiones hidrostáticas, la pasteurización, la impresión 3D o la encapsulación deben considerarse por el beneficio que pueden aportar al mejorar la estabilidad, funcionalidad y permanencia de los productos en el mercado. No obstante, su incorporación debe evaluarse cuidadosamente, ya que suelen implicar un coste adicional de implementación elevado.

CAPÍTULO 7

OTROS CONSIDERANTES PARA EL DISEÑO DE BIORREFINERÍAS. GESTIÓN DE TRANSFERENCIA DE EFLUENTES E INSUMOS

Manejo de efluentes (líquidos, sólidos y gases) sin cuellos de botella

La transferencia de efluentes residuales heterogéneos es uno de los principales cuellos de botella en el diseño de biorrefinerías. Los flujos más problemáticos suelen ser líquidos o pastas con sólidos en suspensión, granulometrías amplias y viscosidad variable, por lo que su manejo resulta crítico para mantener la continuidad operativa del sistema. Con líquidos y pastas viscosas, las bombas de cavidad progresiva, de doble tornillo y peristálticas ofrecen soluciones robustas, priorizando la continuidad y el bajo cizallamiento. El uso de variadores de frecuencia mejora el control operativo, reduciendo picos de presión y consumo energético. Alternativamente, tecnologías emergentes de alta eficiencia, como las bombas asociadas a *Smart Pump Systems*, son una alternativa a considerar para manejar con precisión y estabilidad fluidos complejos. Para el transporte de sólidos, tornillos, válvulas rotativas y compactadores estabilizan el caudal hacia etapas como espesado o deshidratación. En el caso de gases, el tratamiento de corrientes residuales (off-gas) mediante condensadores, ciclones, *scrubbers*, biofiltros o carbón activado permite controlar compuestos orgánicos volátiles, olores y recuperar fracciones útiles.

Un manejo de efluentes bien dimensionado evita la sobrecarga de las etapas sensibles, especialmente en el *downstream processing* inicial, y protege operaciones de mayor coste como aquellas que involucran membranas, sistemas de exclusión por tamaño y/o afinidad. Además, facilita una operación más próxima al concepto de “residuo cero”, al dirigir cada corriente hacia su vía óptima de valorización con menos dependencia de depósitos pulmón. El impacto se refleja en menos paradas, menor coste asociado al bombeo de efluentes y control de emisiones de proceso. Lo cual se traduce en una mayor productividad y más seguridad en planta.

Circularización de agua y disolventes (cierre de lazos de proceso y reducción de emisiones contaminantes)

La incorporación de etapas de filtración en *downstream processing* (combinaciones de ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa) permite avanzar hacia el cierre hídrico de instalaciones industriales y recircular buena parte del agua de proceso. Su combinación con carbón activo, resinas u otros tratamientos de pulido permite controlar picos de microcontaminantes y ajustar la calidad del agua para su reintroducción como agua de proceso. El impacto directo repercute en mayor ahorro de agua, un menor canon de vertido de aguas residuales y una mayor cantidad de producto vendible por unidad de insumo. La prioridad de implantación depende del precio local de agua/energía, las tecnologías tienen NMT 8-9 y son sistemas ya adaptados a tecnologías *plug-and-play* alineados con la premisa de diseños modulares.

Para los solventes, destilación con integración térmica y adsorción permiten tasas altas de recuperación y reducción de compuestos con mayor huella ambiental negativa.

Finalmente, la captura/uso de CO₂ mediante fijación químico-física (catalizadores) o biológica con microorganismos fotosintéticos y la recuperación de nutrientes de corrientes secundarias fortalecen la circularidad y abren vías de coproductos en la biorrefinería.

Eficiencia energética y autosuficiencia

La eficiencia energética de una biorrefinería puede mejorarse combinando diseño de equipos, integración térmica y valorización interna de corrientes energéticas. La dinámica de fluidos computacional (DFC), por ejemplo, permite optimizar mezcla y aireación en reactores y biorreactores, reduciendo potencia de agitación y tiempos de homogeneización sin comprometer la calidad final del proceso. Por otro lado, los sistemas de intercambiadores y bombas de calor en cascada añaden una mejora tecnológica que permite simultáneamente suministrar frío de proceso y recuperar calor útil ($>100\text{ }^{\circ}\text{C}$), bajando el gasto kWh/kg de efluente evaporado o secado; la integración con recompresión mecánica de vapor (RMV) en concentraciones masivas ofrece mejoras altas en el balance energético. Finalmente, la asociación de intercambiadores de calor con la cogeneración con biogás (o biometano) permite acercarse hacia el cierre del círculo térmico-eléctrico y aprovecha subproductos del tren biológico/anaerobio. El impacto global de estas medidas conduce a reducciones del 20 al 40 % de energía específica suministrada; poniendo de manifiesto su importancia en sistemas de biorrefinería donde los efluentes mayoritarios deben ser evaporados o secados.

Integración de etapas (modularidad “*plug-and-play*” y diseño en cascada)

En la búsqueda de biorrefinerías transversales (requieren mayor multidisciplinaridad y transversalidad para ser capaces de procesar desde cremogenados de fruta hasta astillas de arbolado urbano) la integración modular permite activar solo las operaciones necesarias y *bypasear* las prescindibles, reduciendo consumos y tiempos de cambio. En la práctica, un tren “todo en uno” con *skids* interconectables y recetas de proceso configurables estabiliza calidad entre etapas y optimiza el retorno económico. Su impacto es doble: menos energía y químicos por kilogramo de producto, y menor riesgo de cuellos de botella al adaptar el tren de proceso al volumen de la matriz a valorizar. La prioridad de implantación es alta por su efecto sistémico (marcos estándar de automatización, válvulas de desvío, manifolds sanitarios, limpieza en lugar/esterilización en lugar (CIP/SIP por sus siglas en inglés)). En el ecosistema de planta, esta modularidad facilita escalado por bloques y replicación multi-sitio, a la vez que simplifica el mantenimiento y la validación de cada una de las etapas del lineal.

CAPÍTULO 8

VENTAJAS DE LOS PRODUCTOS FINALES Y SU IMPACTO SOCIOECONÓMICO

Circularizar una actividad industrial heredada no equivale a cambiar insumos; obliga a repensar qué entra, qué sale y qué queda tras cada etapa de proceso. Con residuos agroforestales (pajas, podas, limpiezas de monte, fracciones no conformes) la cuestión es doble: reducir pasivos ambientales y transformar un coste de gestión en flujo de productos con calidad específica. Cabe recordar que el marco jurídico actual acompaña esa transición: figuras como subproducto o fin de condición de residuo resultan viables cuando existen usos posteriores definidos, contratos y trazabilidad adecuada; a ello se suman los objetivos de renovables en transporte y una fiscalidad que penaliza vertedero e incineración. Para una industria tradicional que implementa una biorrefinería, el efecto es tangible: menos riesgo sancionador por ausencia de manejo de residuos agrarios, conversión y diversificación de negocio con un relato verificable ante auditorías.

Sobre la sustitución de productos en mercado y el desplazamiento de cuotas de mercado de productos homólogos tradicionales, conviene concretar. El biometano cumple la misma especificación que el gas natural de la industria petroquímica, con mejor perfil de carbono y mayor autonomía logística; se inyecta en red o alimenta flotas sin cambios en los sistemas de suministro. El bioetanol de segunda generación es etanol convencional desvinculado de materias alimentarias o derivado de la petroquímica. El PLA no replica el

rendimiento funcional del tereftalato de polietileno (PET), aunque ofrece origen renovable y compostabilidad en condiciones industriales, útil en envase rígido, film, textil e impresión 3D; sus límites térmicos se gestionan de igual forma con mezclas, cargas de nanocelulosa y nucleantes. PHB y otros PHA aportan biodegradabilidad y resistencia a la fatiga, lo que encaja en los sectores agrícola, sanitario, cosmética sólida o envase de alto valor; sin embargo, sin la mejora del *downstream processing* actual sus contraindicaciones ambientales por uso de halogenados siguen siendo un lastre elevado. En química de plataforma, el furfural sirve como precursor renovable para resinas y solventes de menor toxicidad, mientras HMF/FDCA habilita la síntesis de furanoato de polietileno con mejores barreras a O₂ y CO₂ que PET, relevante para bebidas y alimentos sensibles. La nanocelulosa actúa como refuerzo ligero y modulador reológico a dosis bajas en papeles barrera, recubrimientos y composites. El biochar aporta superficies y funcionalidades ajustables para tratamiento de aguas y suelos, con co-beneficio de captura de carbono. En ingredientes (extractos fenólicos, pigmentos, fibra funcional, proteína unicelular) el valor procede de la función y de la trazabilidad: la cadena “residuo a recurso” permite segmentar mercado y justificar primas.

En este punto, la ingeniería de proceso se puede contemplar como bisagra entre normativa, mercado e impacto territorial. El diseño por etapas permite una modularidad amplia de productos de salida: energía renovable mediante digestión y *upgrading* a biometano, química de plataforma basada en furfural y compuestos C6, materiales avanzados como nanocelulosa o biochar, y polímeros de origen biológico como PLA, PHA o PHB. La consecuencia organizativa es directa: operación estable durante todo el año evitando la estacionalidad asociada a muchos residuos agroindustriales, siempre y cuando se considere desde inicio una elevada transversalidad de las tecnologías seleccionadas para el lineal. Un flujo heterogéneo pero planificado de procesamiento de biomasas anuales fuerza a cumplir la necesidad de contar con plantillas cualificadas, fijando personal técnico en áreas eminentemente rurales. No puede perderse de vista que esta continuidad también ordena la logística rural, reduce quemas en campo y retira combustible del monte.

Por tanto, la lógica empresarial se apoya en ofrecer una diversificación de productos con una cartera mucho más flexible. Esa elasticidad reduce exposición a volatilidad y a cambios regulatorios. Cuando los flujos dejan de ser residuo por

contrato y control de calidad, el transporte se simplifica, las auditorías se acortan y los compradores sujetos a metas de contenido biobasado encuentran una vía clara para acreditar cumplimientos normativos.

En síntesis, la bioeconomía y economía circular aplicada a industrias lineales convierten pasivos en productos bancables, alinean la operación con exigencias legislativas vigentes/futuras y mejoran métricas de planta sin sacrificar empleo estable y cualificado ni calidad ambiental. Esta situación invita a considerar que la evaluación exclusivamente financiera pierde matices frente a los beneficios de una aplicación exitosa de la economía circular: la seguridad del territorio frente a incendios, la continuidad del trabajo cualificado y la resiliencia de la cadena de suministro forman parte del rendimiento real. Un proyecto diseñado con estas piezas no se limita a cambiar de materia prima; redefine cómo producir con rigor técnico y continuidad económica.

CAPÍTULO 9

EJEMPLO DE BIORREFINERÍA TRANSVERSAL: DISEÑO, CRITERIOS Y RESULTADOS ESPERADOS

El capítulo final aplica los criterios desarrollados en el catálogo a un ejemplo de diseño industrial. Se propone un lineal capaz de procesar paja de arroz, residuos de poda o bagazos bajo un arquetipo I de biorrefinería orientado a bioplásticos y química de plataforma, complementado con procesos sumidero para asegurar el cierre de biomasa y energía. La figura 11 resume el lineal propuesto, desde la recepción y el pretratamiento de la biomasa hasta las valorizaciones principales, los módulos de *downstream processing* y los sistemas auxiliares de cierre energético.

Diseño del lineal

El diseño parte de una premisa desarrollada a lo largo del catálogo: el pretratamiento se selecciona en función de la cartera de productos objetivo y de la necesidad de evitar corrientes sin salida. Esta decisión se traduce en seleccionar tecnologías de ventana operativa amplia, con equipos estandarizados y derivaciones que permitan reconfigurar la planta sin rehacerla.

I. Pretratamientos

La primera decisión del lineal es incorporar un bloque de recepción y acondicionamiento capaz de amortiguar la variabilidad de la biomasa de entrada: humedad, cenizas, granulometría e impurezas. En residuos con alta carga

mineral, como la paja de arroz (sílice), se contempla una estrategia de lavado/descenizado y separación de fracción mineral para minimizar abrasión, incrustaciones y penalización en procesos térmicos. Esta etapa no “genera producto”, pero determina la estabilidad del conjunto y evita cuellos de botella desde el inicio. A continuación, se plantea un pretratamiento hidrotermal con agua caliente presurizada como columna vertebral, por su robustez frente a mezclas de pajas, podas y fracciones vegetales diversas. La severidad (temperatura, tiempo, relación S/L) se ajusta asistido por dinámica de fluidos computacional para aumentar accesibilidad y fraccionamiento sin disparar la formación de inhibidores y coste energético.

II. Valorizaciones

Seguido se dispone un fraccionamiento sólido-líquido (p. ej., clarificación/centrifugación) para ordenar el proceso en tres destinos principales: (i) licores C5/C6 hacia fermentación, (ii) corrientes recalcitrantes hacia rutas termoquímicas y (iii) derivaciones hacia una línea de extractos vegetales o materiales (extracciones S/L o L/L) que capture fracciones de alto valor sin interferir con el cierre global. Esta forma de “ordenar pronto” el residuo replica la lógica de compatibilidad y encadenamiento descrita en el capítulo de valorizaciones.

La fracción azucarada se transforma mediante fermentación de precisión en metabolitos objetivo: moléculas plataforma (p. ej., ácido láctico), biopolímeros microbianos (PHB/PHA) y/o SCP. En paralelo, los gases secundarios de la fermentación (especialmente CO₂) se canalizan a fotobiorreactores, los cuales cumplen una doble funcionalidad: (1) generación de biomasa y compuestos de interés (p. ej., pigmentos) y (2) sumidero de gases de efecto invernadero, reforzando la coherencia ambiental del conjunto y aportando resiliencia al portafolio.

Cuando el producto de fermentación es un precursor (ácido láctico), el licor se somete a purificación y alimenta una etapa de polimerización para producir PLA. Cuando el objetivo es un polímero ya “formado” como PHB/PHA, la polimerización se bypassea y el efluente se conduce a recuperación y conformado. En ambos casos, se prioriza la salida en formatos industriales (film, filamento o pellet) mediante extrusión, porque reduce fricción comercial, facilita logística y habilita rutas posteriores como impresión 3D cuando proceda.

En el extremo de cierre del lineal se integra una ruta termoquímica de carácter “sumidero”, basada en gasificación de fracciones recalcitrantes y rechazos inevitables generados a lo largo del lineal. El syngas resultante se destina preferentemente a usos térmicos internos (y, cuando lo justifique la economía de planta, a síntesis), de modo que la instalación evita acumulación de corrientes sin valorización y estabiliza su balance energético.

III. *Downstream processing*

Las operaciones de separación y purificación se proponen con la misma regla expuesta en el capítulo de *downstream processing*: la especificación del mercado “tira” del proceso. Para mantener consumos controlados y operatividad de planta continua, se combinan clarificaciones (decantación/centrifugación de discos) y reducción de volumen de efluentes por evaporización seguido de etapas de purificación por filtración por membranas (UF/NF) y/o cristalización como métodos de purificación para alcanzar pureza, formato y estabilidad de productos finales.

IV. Sistemas auxiliares

Finalmente, la energía se trata como un circuito propio: integración térmica en cascada, recuperación de condensados, bombas de calor y, cuando exista metano/biogás generado en la instalación, microcogeneración para cerrar el círculo térmico-eléctrico. Este andamiaje no solo reduce consumo específico por tratamiento, también valoriza corrientes difíciles: la conversión térmica de rechazos evita puntos muertos y devuelve energía en forma de calor útil para alimentar los distintos procesos de la biorrefinería.

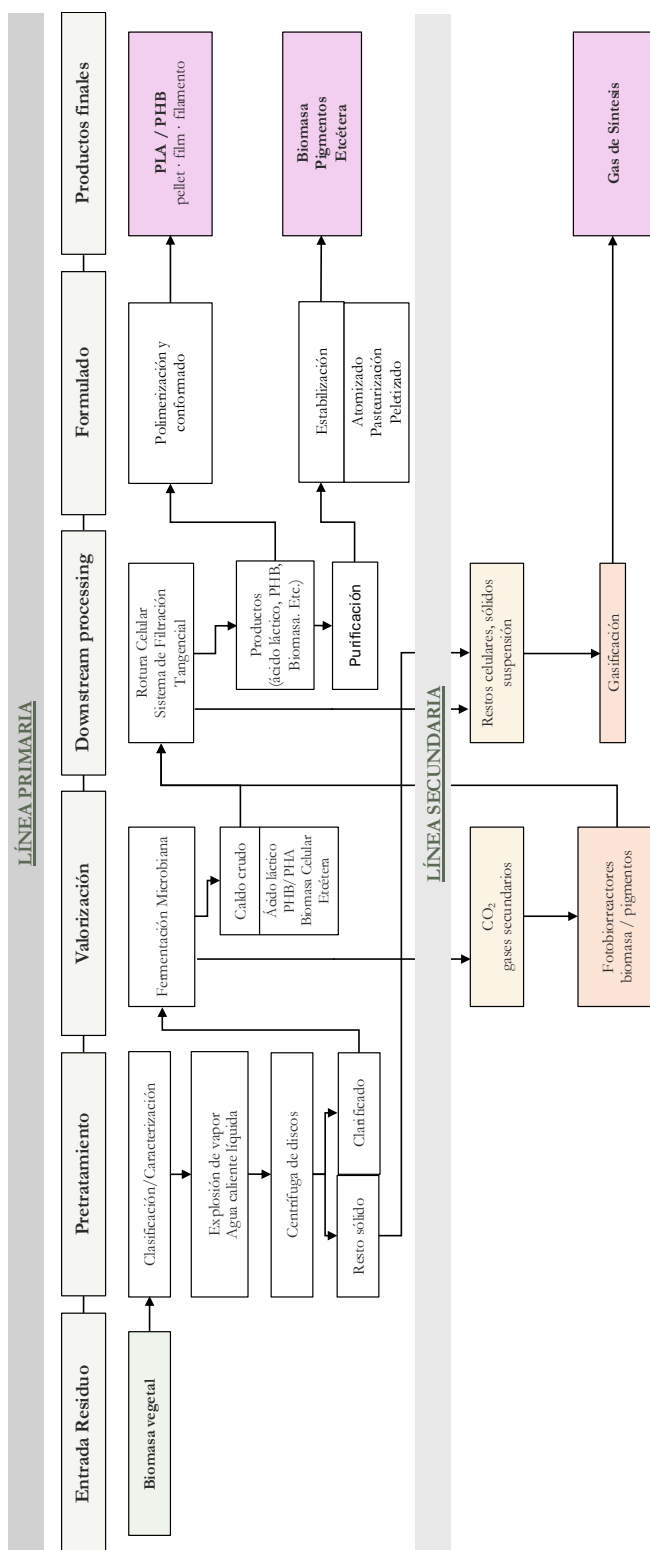


Figura 11. Esquema del lineal propuesto para una biorrefinería transversal orientada a bioplásticos y química de plataforma. El diagrama integra pretratamiento, valorizaciones, *Downstream processing* y sistemas auxiliares, mostrando las principales derivaciones y procesos sumidero del arquetipo planteado.

Consideraciones de diseño

Más allá del diagrama, el rasgo definitorio de este arquetipo I es mantener un lineal reconfigurable, fácilmente bypassable, que permita activar o desactivar etapas según (i) biomasa disponible y (ii) producto final. En la práctica, esto se traduce en contemplar en el diseño modularidad “plug-and-play”, recetas de operación y automatización que faciliten transiciones sin comprometer calidad lote a lote ni incrementar de forma inasumible los tiempos de cambio. Esta flexibilidad tiene implicaciones organizativas directas: turnos de trabajo estables, mantenimiento planificado y control de calidad por etapa para que la transversalidad no se convierta en variabilidad incontrolada. Además, instalado en una localización estratégica de proximidad al punto de producción/recogida de la biomasa reduce traslados y emisiones de efecto invernadero asociadas. Esta concepción ordena la retirada continua y escalonada de subproductos de difícil manejo contribuyendo a disminuir opciones de valorización no deseables (quemar y acumulación de combustible vegetal, vertedero, combustión, lecho o alimentación en ganadería, compostaje, entre otros) reforzando el impacto territorial del modelo.

En cuanto a resultados, la instalación entrega un portafolio reconocible y comercializable: bioplásticos (PLA y/o PHB/PHA) listos para transformación, biomasa microalgal/bacteriana con posibles coproductos (pigmentos/proteína), syngas y energía útil que retorna al proceso. De este modo el valor añadido obtenido del procesado en cascada no descansa en un único producto, sino en la combinación y, sobre todo, en la consistencia de calidades y en la capacidad de absorber fracciones residuales sin convertirlas en coste.

A nivel de métricas, se persigue: reducción sostenida del consumo energético específico (por integración térmica y estrategias de eficiencia), disminución del volumen de corrientes no valorizables, cierre parcial de agua y disolventes cuando aplique, y captura/uso de CO₂ mediante el módulo fotosintético. La intersección entre las tecnologías diseñadas, su conexión y las métricas mencionadas se traducen en un diseño de biorrefinería transversal preparado para operar de forma continuada con suficiente resiliencia frente al suministro estacional y variable de la biomasa vegetal de desecho de entrada. Diseño que a su vez es capaz de pivotar con relativa facilidad. Como punto de partida prioriza producción de PLA y química de plataforma, pero si cambian precios o entra una biomasa diferente, puede migrar a hacia la producción de PHB/PHA,

proteína unicelular o un mayor peso de rutas energéticas, sin rehacer la planta. Esta es la lógica central del arquetipo I: convertir variabilidad (de biomasa y de mercado) en capacidad de adaptación, manteniendo rigor técnico y estabilidad económica.

La bioeconomía y la economía circular están aceptadas como un marco de transición transversal que permite a la sociedad enfrentarse a algunos de los retos macroeconómicos, sociales y tecnológicos asociados a la creciente presión demográfica, la degradación ambiental, el desabastecimiento de materias primas o la necesidad de desarrollar nuevos productos de alto valor, entre otros.

Un exponente de ello, son las **biorrefinerías de segunda generación** que proveen de una solución tecnológica específica que permite transformar biomasas residuales agroforestales en nuevos productos, energía, etc. Por su singularidad, su diseño no puede abordarse como un enfoque generalista, sino como una respuesta adaptada a un tipo de biomasa y objetivo productivo de una industria concreta. Por tanto, dada la dificultad que tiene la tarea de diseñar soluciones con tal especificidad, el libro busca ser una herramienta práctica de consulta para ordenar y dar respuesta a las preguntas que se generan durante el diseño de dichas biorrefinerías:

- ¿Cómo es el residuo y qué opciones realistas tiene de valorización?
- ¿Qué tecnología conviene elegir y cuáles de ellas permiten una integración eficiente en procesos encadenados?
- ¿Cómo detectar y evitar cuellos de botella?
- ¿Cómo evaluar si una solución es técnica, económica y ambientalmente viable?

Como fin último, se tiene la ambición de hacer partícipe al lector del potencial de las biorrefinerías de segunda generación como elemento transformador de industrias agroforestales, permitiendo convertir la gestión de sus residuos en oportunidades industriales reales, capaces de fijar y generar valor en el territorio; demostrando que el futuro de muchas industrias puede comenzar en aquello que hoy todavía se considera un residuo.

