



# Beta

Biodiversitat, Ecologia,  
Tecnologia Ambiental i Alimentària



UNIVERSITAT DE VIC  
UNIVERSITAT CENTRAL  
DE CATALUNYA

# Digestión Anaerobia

Pedro F. Rizzo  
Zoé Palmes Flitt  
*CT BETA*

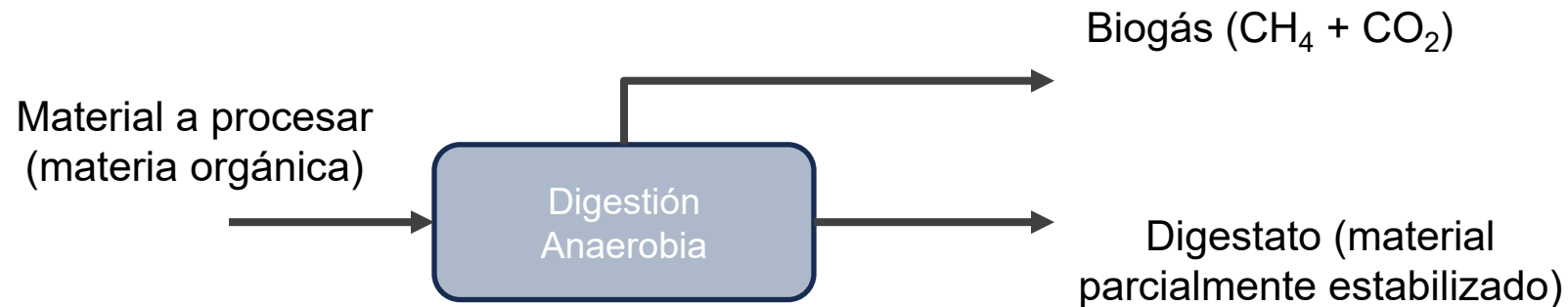
ACCIÓ  Generalitat  
de Catalunya

**T** tecno  
catalonia

Vigència: 30/12/2024

## Definición:

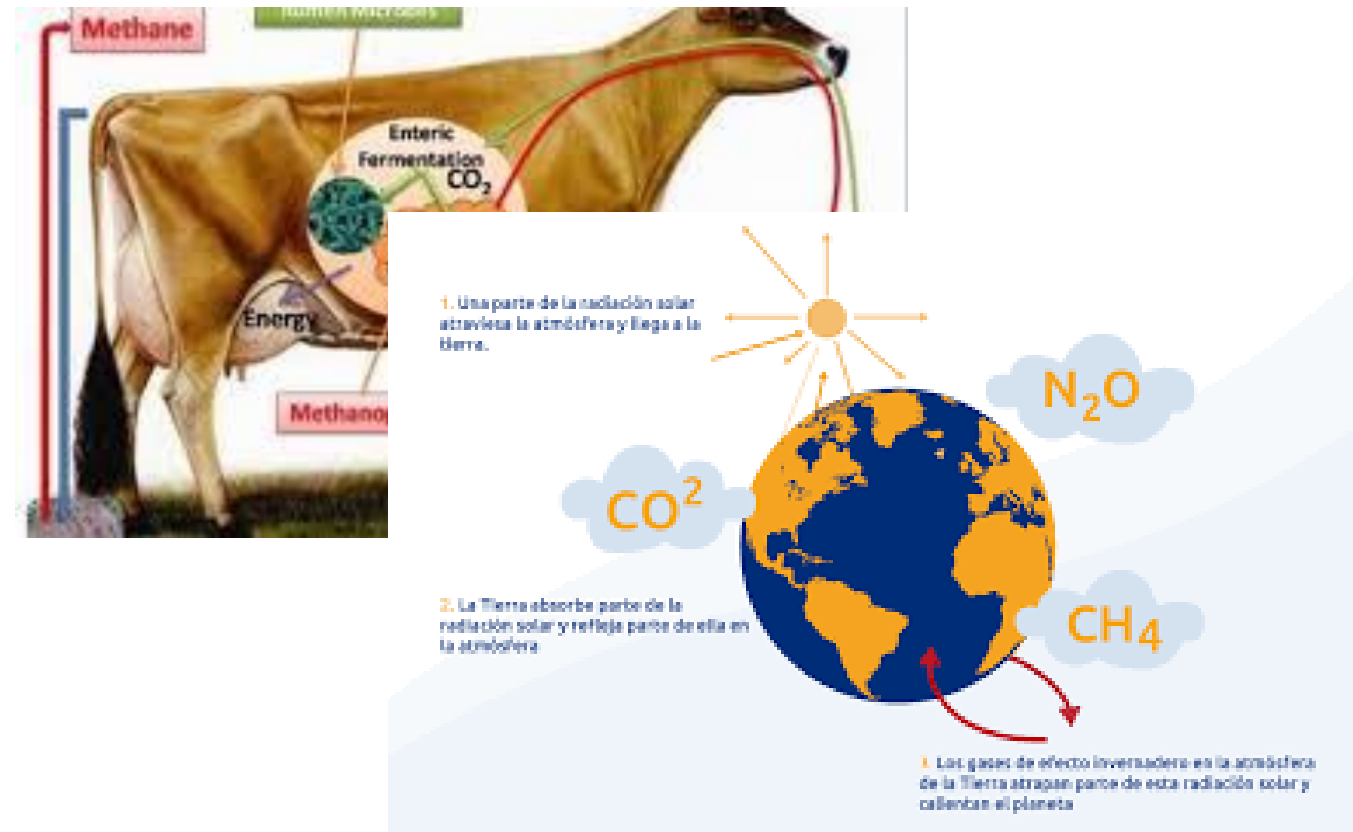
Proceso biológico en el cual la **materia orgánica biodegradable** se degrada (o descompone) en **ausencia de oxígeno** gracias a la acción de microorganismos capaces de producir **biogás** (**metano + dióxido de carbono** principalmente).



La digestión anaerobia permite obtener una corriente gaseosa (biogás) y una mezcla sólido-líquido (digestato)

- Bajo condiciones anaerobias, ciertos microorganismos son capaces de degradar la materia orgánica.
- Microorganismos conviviendo en serie y en paralelo en etapas sucesivas.
- Cuatro etapas establecidas (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis, metanogénesis).
- Diferentes velocidades de crecimiento y sensibilidad a compuestos intermedios.

Ocurre naturalmente en pantanos, sedimentos de lagunas, océanos y en algunos tractos digestivos.

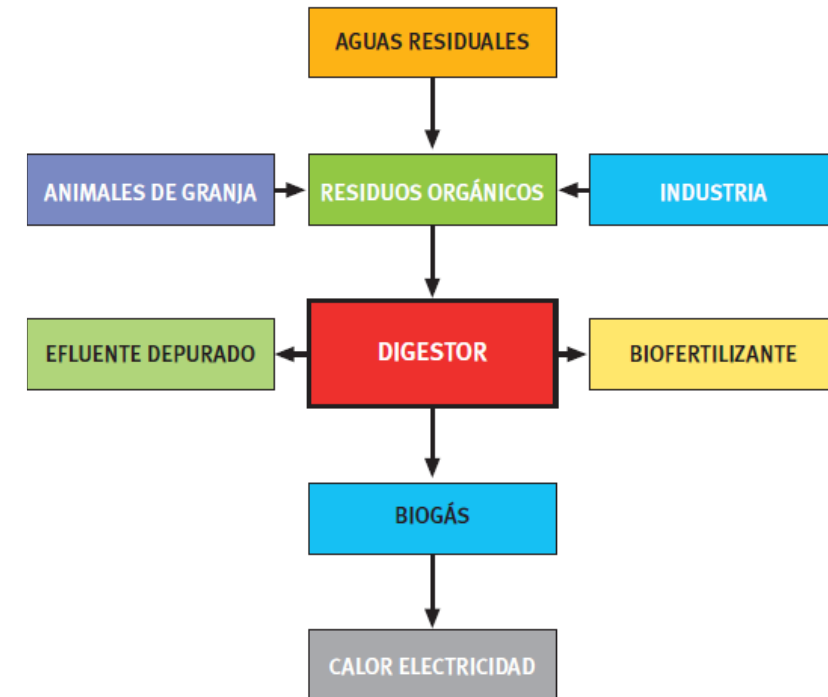


## Fuente de energía renovable (CH<sub>4</sub>)



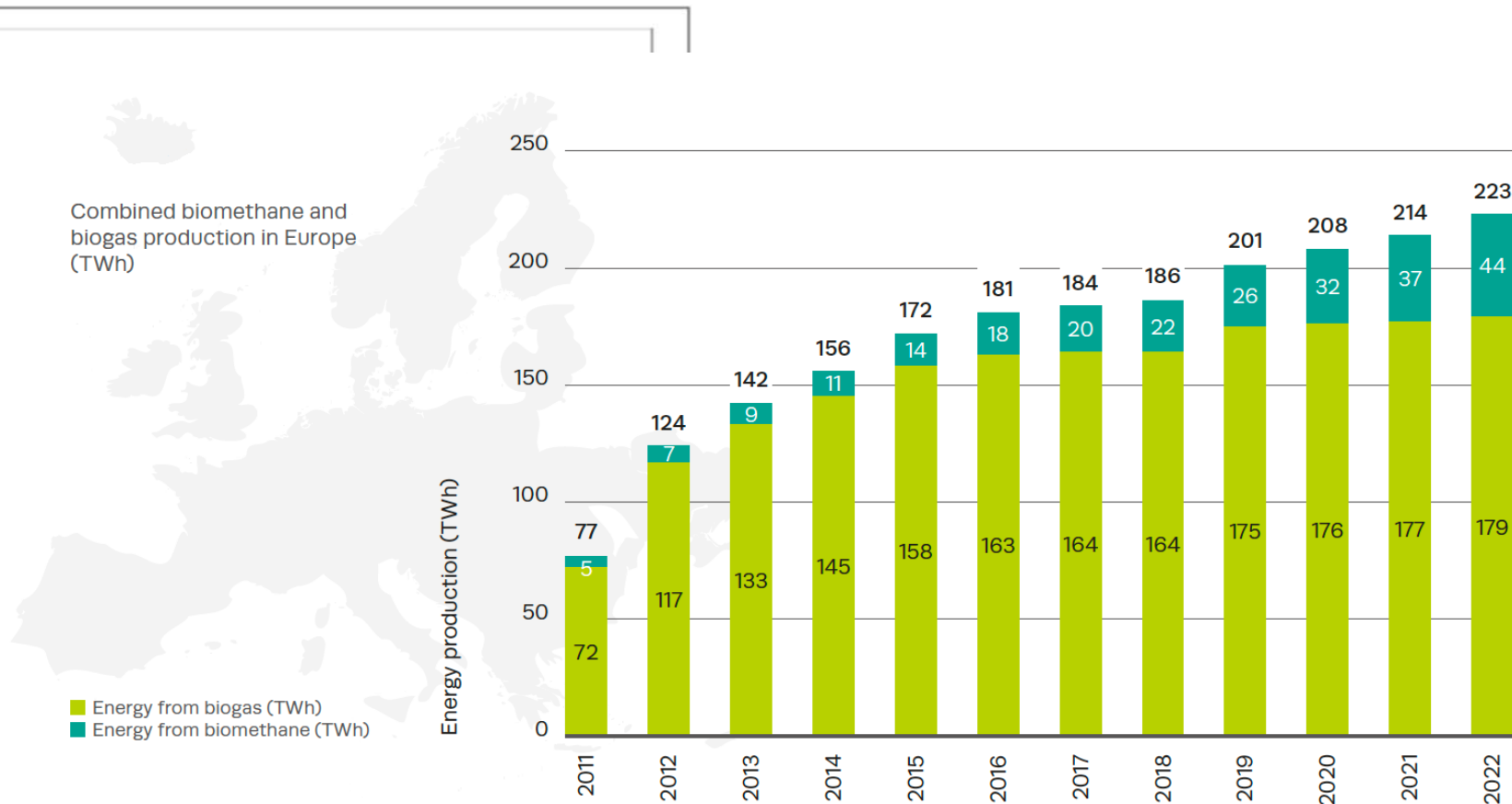
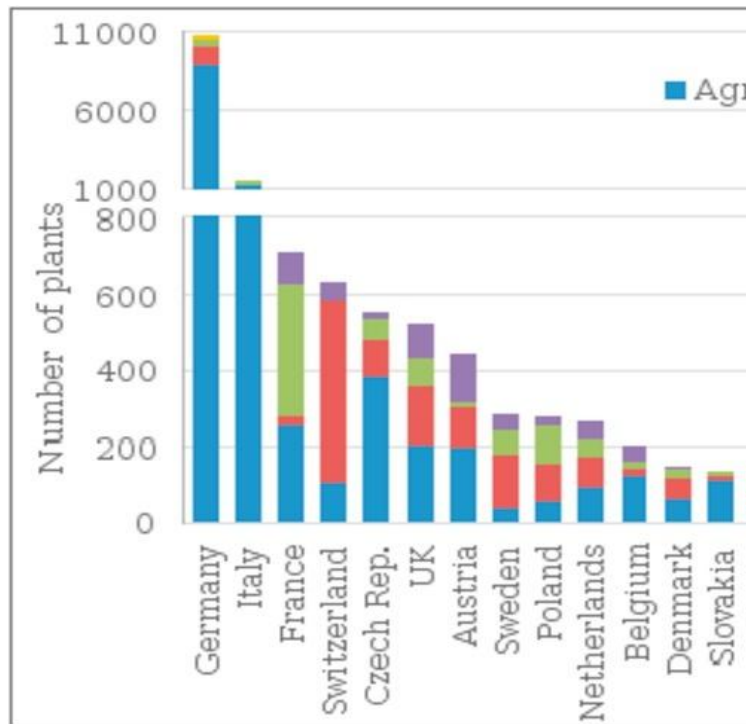
- Dependencia de importaciones
- Conflictos mundiales

## Estrategia de valorización residuos orgánicos

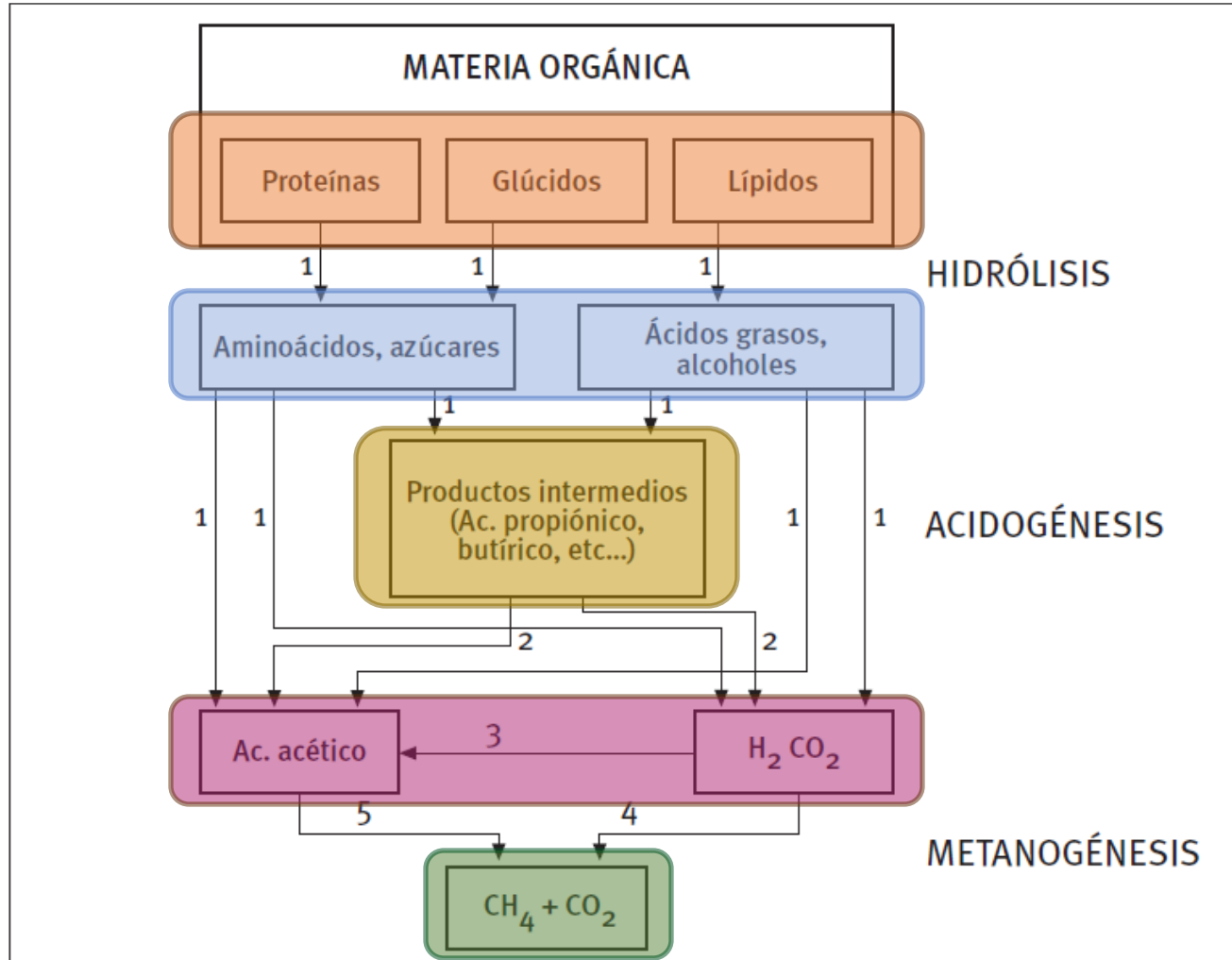


- Emisión gases efecto invernadero
- Recuperar nutrientes (P, N)

## Instalaciones de DA en Europa (2015)



Dinamarca: 40% demanda de gas, 100% para 2030.  
Alemania, Francia, Italia, Países bajos

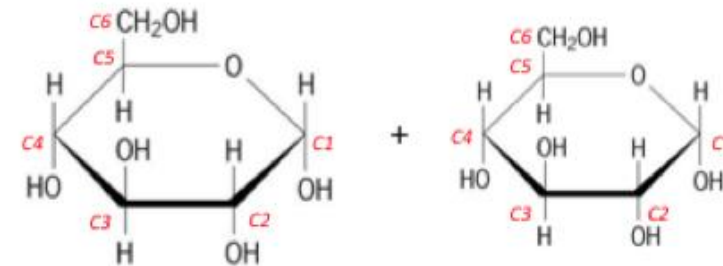
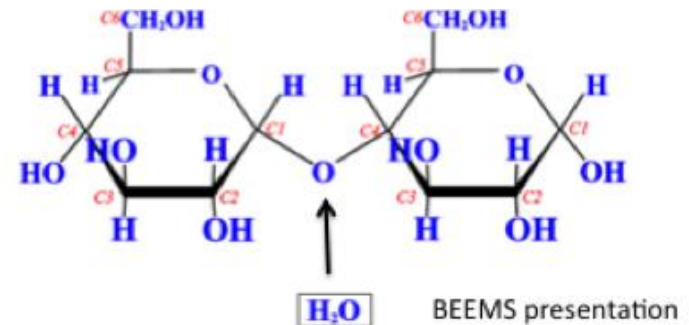


1. Hidròlisi
2. Acidogènesis
3. Acetogènesis
4. Metanogènesis

- Materia orgànica compleja
- Moléculas solubles
- Intermedios (AGVs)
- Productos e intermedios
- Biogás

## ¿Qué ocurre?

- Moléculas poliméricas se degradan
- Celulosa a azúcares o alcoholes
- Proteínas a péptidos o aminoácidos
- Enzimas de diversa índole (lipasas, proteasas, celulasas, amilasa, etc.) secretadas por los microorganismos.



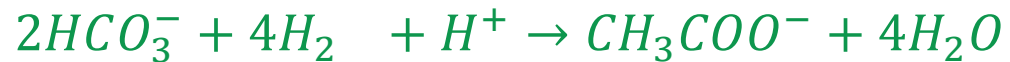
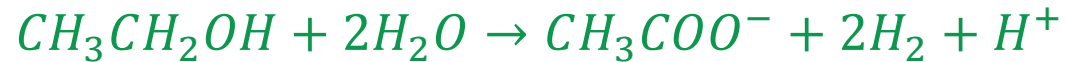
<http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Glucose>



- Microorganismos en esta etapa son principalmente bacterias facultativas y proteolíticas.
- Suelen crecer más rápido que otros grupos de microorganismos.

- Hidrolizados se transforman en ácidos grasos volátiles, alcoholes y cetonas.
- Producción de amonio, hidrógeno y dióxido de carbono.

*Propionbacterium, Clostridium, Bacteroides, Ruminococos, Streptococos y Enterobacterias*



- Los productos de la acidogénesis son consumidos por bacterias acetogénicas.
- Producción de ácido acético, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>.

*Syntrophobacter wolinii*  
*Syntrophomonos wolfei*  
*Clostridium spp.*  
*actinomyces*



- Degradación de ácido acético (metanógenosacetoclásticos)
- Anabolismo con  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}_2$  (metanógenoshidrogenotrofos)
- Bacterias metanogénicas suelen crecer más lento que las demás, siendo las limitantes del proceso.

*Methanobacterium, Methanococos,  
Methanobrevibacter, Methanogenium*



## Temperatura:

Mesofílica (30-37°C)

Mayor estabilidad

Termofílica (38-55°C)

Mayor requerimiento energético

Velocidades de degradación mayores

Mejor higienización de patógenos

## Relación C/N:

- Óptimo entre 20-30
- C/N altos indica un rápido consumo de N (↓ biogás)
- C/N bajos causa acumulación de  $\text{NH}_4$  (↑ pH, ↑ toxicidad a las metanogénicas)

## pH:

- Funciona idealmente en un rango neutro (6,5-7,5)

## Tiempo de retención:

- Usualmente entre 10-40 días
- Tiempos elevados, mayor degradación, superar inhibición.

## Ácidos grasos volátiles:

- Medida de la estabilidad del sistema

## Velocidad de carga orgánica:

- Cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo.
- Valores bajos (↓ concentración, ↓ TR)
- Incrementos OLR (↓ biogás)

## Materiales a degradar:

	Residuos ganaderos	Lodos depuración	FORM	Residuos industria alimentaria
Micro y macronutrientes	↑	↑	↓	↓
Relación C/N	↓	↑ ↓	↑	↑
Capacidad tampón (alcalinidad)	↑		↓	↓
Materia orgánica biodegradable	↓	↑ ↓	↑	↑

Parámetro	Valor Ideal para DA	Características del Alperujo	Ajustes necesarios para optimizar DA
<b>Temperatura</b>	<b>Mesofílica:</b> 30-40°C o <b>Termofílica:</b> 50-60°C	Típicamente tiene temperaturas en el rango adecuado	Controlar la temperatura para evitar fluctuaciones.
<b>pH</b>	Entre 6.8 y 7.2	Generalmente es ácido, alrededor de 5.5 a 6.5	Ajustar el pH para acercarse a 7.
<b>Relación C/N</b>	25:1 a 30:1	Alta relación C/N (alrededor de 45:1)	Mezclar con residuos ricos en nitrógeno (estiércol, restos de cultivos) para alcanzar la relación ideal de 25:1 a 30:1.
<b>Carga Orgánica</b>	Ajustada según capacidad del digestor	Alta carga orgánica debido a la cantidad de sólidos y lípidos	Controlar la carga de alperujo para evitar sobrecargas y mejorar la eficiencia de descomposición.
<b>Contenido de Sólidos</b>	Menos del 20% (húmeda) o más del 20% (seca)	Alto contenido de sólidos (más del 20%)	Si es muy alto, usar digestión seca o semi-seca. Si es bajo, optar por digestión húmeda.
<b>Compuestos Fenólicos</b>	Baja presencia, no inhiben procesos	Alta presencia de compuestos fenólicos que inhiben microorganismos	Realizar pre-tratamientos (lavado, tratamientos físicos) para eliminar los compuestos inhibitorios.
<b>Tiempo de Retención</b>	15-30 días (dependiendo del tipo de digestor)	Adecuado si la carga y contenido de sólidos se ajustan	Ajustar el tiempo de retención según la carga orgánica y el tipo de digestor seleccionado.

## Cómo mejorar la digestión del alperujo: manejo y pre-tratamientos

### **Manejo inicial del alperujo:**

- Importancia de tratarlo rápidamente tras su extracción (cuanto más fresco mayor potencial energético).
- Técnicas de almacenamiento para evitar fermentación indeseada.

### **Pre-tratamientos recomendados:**

- Triturado, homogeneización, y calentamiento a 60-80°C.
- Mezcla con otros residuos, como estiércoles, para mejorar la relación C/N.

## Digestión por vía Seca:

- Recomendable cuando el contenido de sólidos es superior al 20%, es el caso del Alperujo.
- Sistemas patentados: VALORGA, DRANCO.
- Sistemas específicos de homogeneización y agitación.

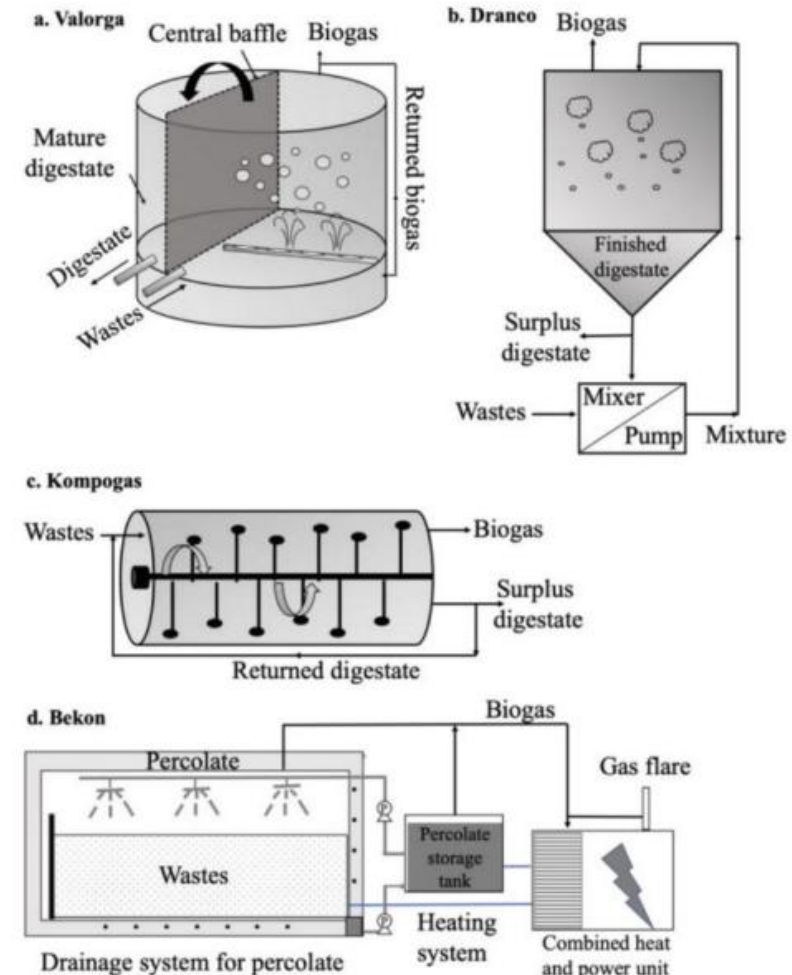
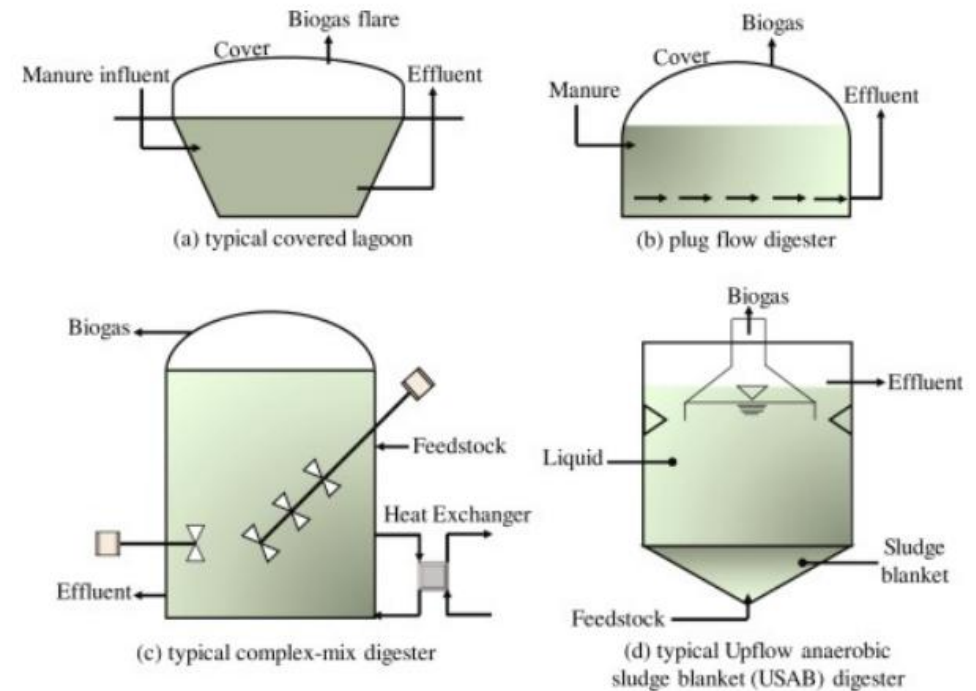


Figura 9. Digestores anaerobios de via seca. Fuente: Riya et al. 2019.

## Digestión por vía Húmeda:

- Cuando el contenido de sólidos es inferior al 20%. Ejemplo: CSTR (Reactor de Mezcla Completa).
- Sistemas de alimentación y agitación más sencillos.
- Entrada continua y semi continua.
- Homogeneización previa de la mezcla
- Ventajas de la digestión en dos etapas (hidrólisis y metanogénesis separadas).



**Figura 10.** Sistemas de digestión anaerobia convencionales para la valorización de sustratos líquidos o semi-líquidos. Fuente: O'Connor, et al. 2021.



*Deyecciones ganaderas*



*Cultivos energéticos*



*Residuos agroindustriales*

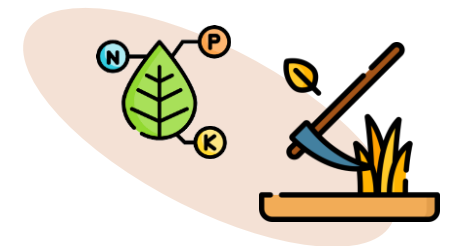
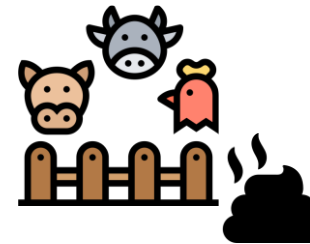


*Fracción orgánica residual municipal*



*Lodos de depuradora*

Efluentes orgánicos con potencial de producción de biogás

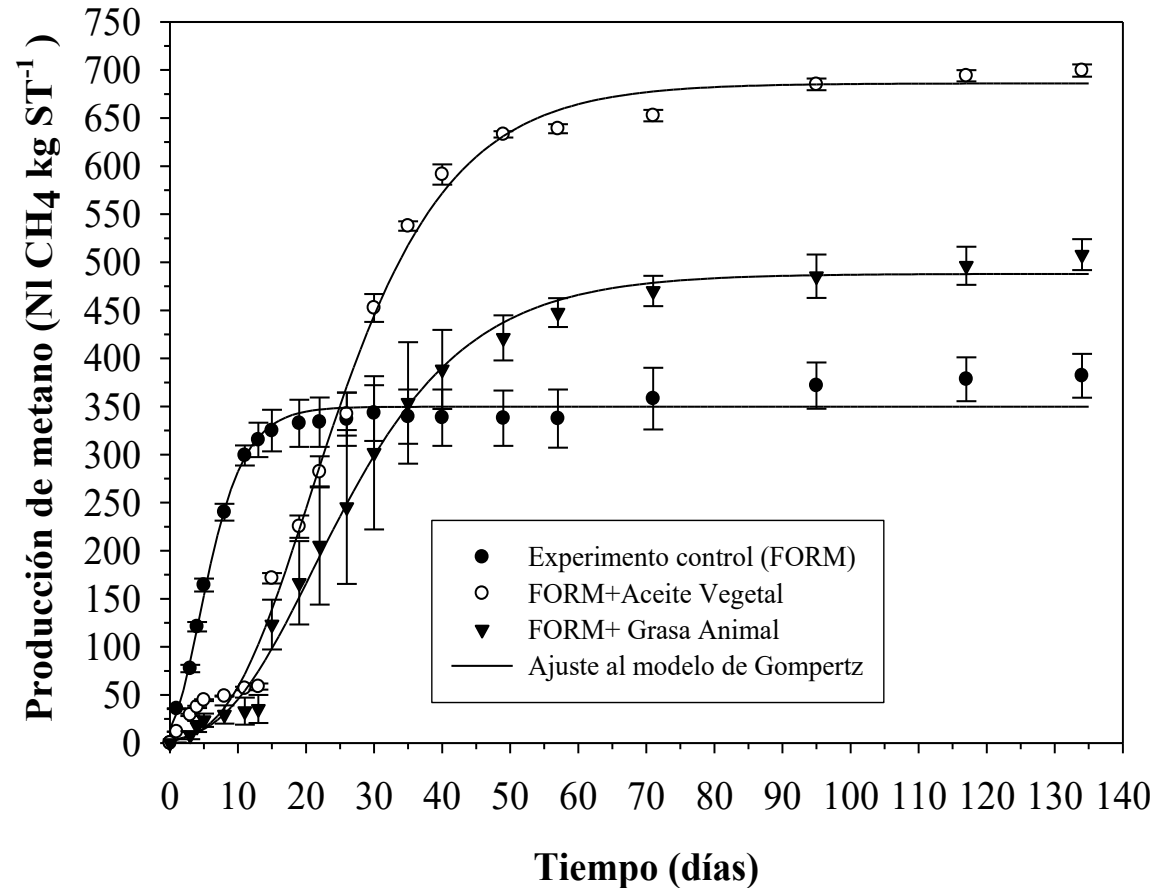


Sustrato	Rendimiento biogás (m <sup>3</sup> /Ton)	Sustrato	Rendimiento biogás (m <sup>3</sup> /Ton)
Deyección ganadera	15-25	Patatas	270-400
Deyección porcícola	15-25	Grano de centeno	280-500
Gallinaza	300-100	Colza	300-350
Ensilaje de hierba	160-200	Alfalfa	340-500
Trigo	180-190	Cebada	350-650
Ensilaje de maíz	200-220	Hojas	410-450
Glicerina cruda	580-1000	Guisantes	380-400
Grasas	1000-1200	Girasol	150-400
Remolacha	236-381	Miscantus	180-220

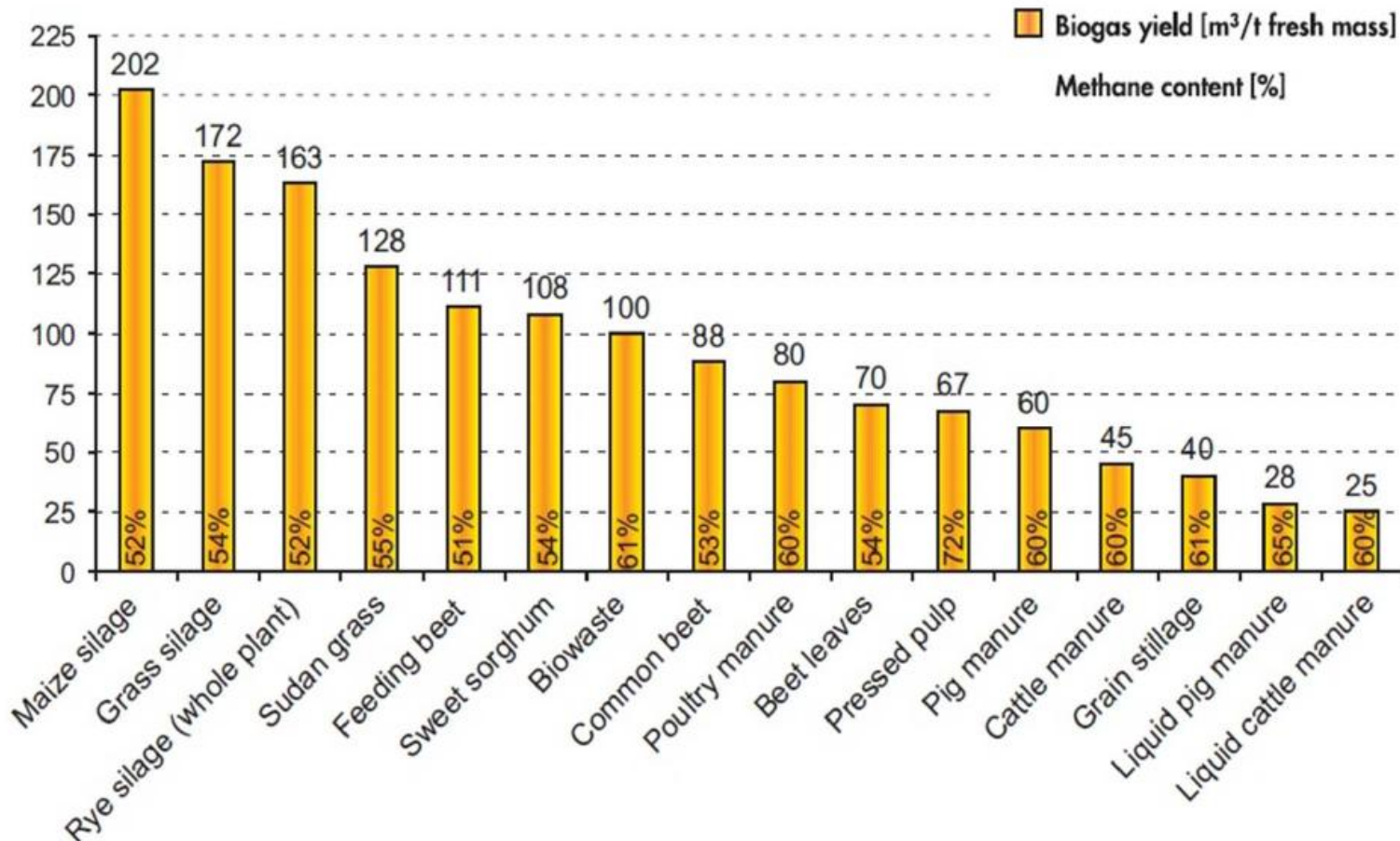
- Materia seca
- Materia orgánica
- Presencia de tóxicos
- Tiempo de residencia
- Tipo de digestor y condiciones de planta

## Potencial Bioquímico de Metano (Biochemical Methane Potential)

- Estimar la máxima producción de biogás a partir de un sustrato dado.
- Proceso en lotes.
- Producción acumulada durante un tiempo definido (21 días).
- Temperatura representativa (34-37°C).
- Inóculo suficiente para degradar toda la materia orgánica disponible.



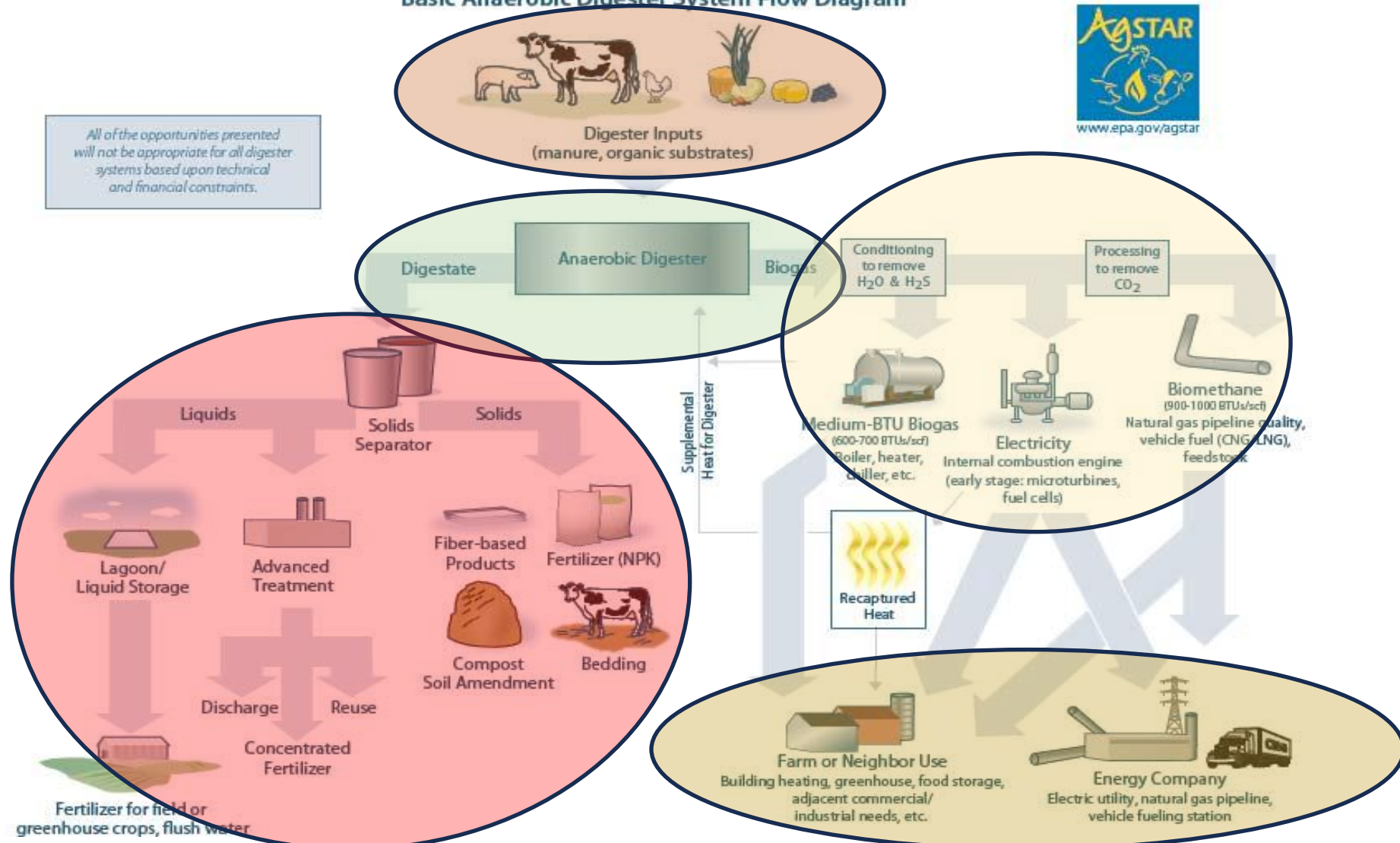
## Biochemical Methane Potential



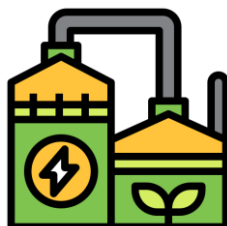
- No toda la materia orgánica se degrada de la misma manera.
- Es una medida inicial para definir si un material puede ser digerido solo o en combinación con otro(s) – **Co-digestión.**

# Diagrama de planta

Basic Anaerobic Digester System Flow Diagram



Componente	Composición (% v/v)
Metano	50-75
Dióxido de carbono	25-45
Vapor de agua	1-2
Monóxido de carbono	0-0,3
Nitrógeno	1-5
Hidrógeno	0-3
Sulfuro de hidrógeno	0,1-0,5
Oxígeno	Trazas



20-25 MJ/m<sup>3</sup>

Sector	Aplicación
Energía	Electricidad (red) y calor
Hogares	Combustible para cocinar
Transporte	Combustible de vehículos
Agricultura	Calefacción y energía
Industria	Calefacción y electricidad

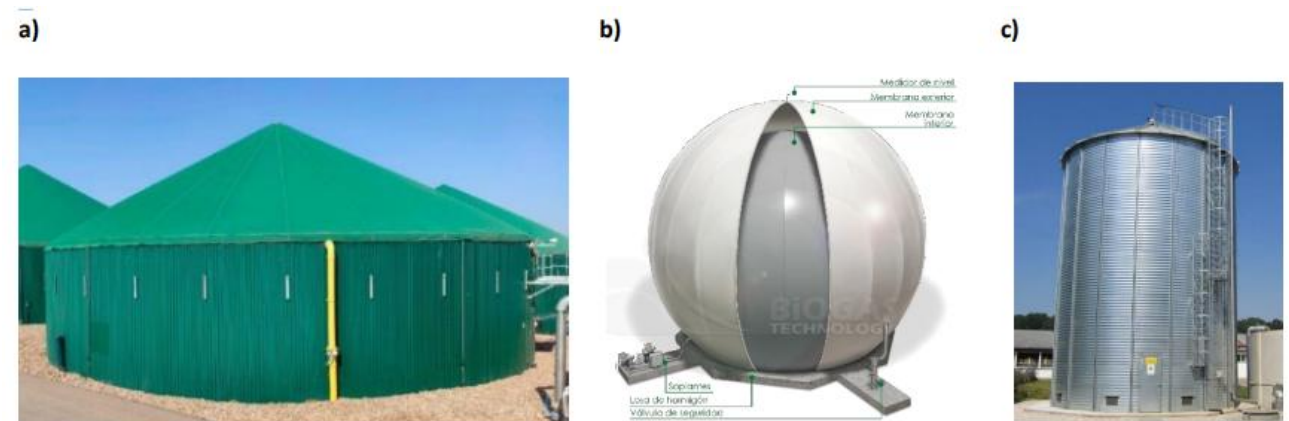


- Materia prima de otros procesos
- Créditos de carbono (incentivo a energías renovables)

Producción de biogás con un contenido de metano del 60-65%, equivalente a 4.5-5.5 MWh por cada 100 toneladas tratadas.

## Almacenamiento de biogás

- **Campanas flexibles:** Compactas, ideales para plantas pequeñas. Se expanden o contraen según el biogás almacenado. Fáciles de operar, pero menos versátiles.
- **Tanques presurizados:** Para plantas grandes, permiten transporte y uso eficiente del biogás.
- **Sistemas de doble membrana:** Almacenamiento independiente, controlado, con biogás a mayor presión y menor temperatura.



**Figura 11.** Sistemas de almacenamiento de biogás típicos; a) Almacenamiento en campana o membrana flexible (GENIA), b) almacenamiento en gasómetro de doble membrana (Biogas Technology), c) almacenamiento en tanque presurizado (Environtec).

## Purificación del Biogás

Impurezas comunes: Vapor de agua, sulfuro de hidrógeno y amoníaco.

Proceso de Purificación:

- Deshumidificación: Uso de intercambiadores de calor o filtros de carbón activo para eliminar la humedad.
- Desulfuración: Tecnologías biológicas (biofiltros) o físico-químicas (filtros de carbón) para eliminar sulfuro de hidrógeno.

## Uso del biogás purificado:

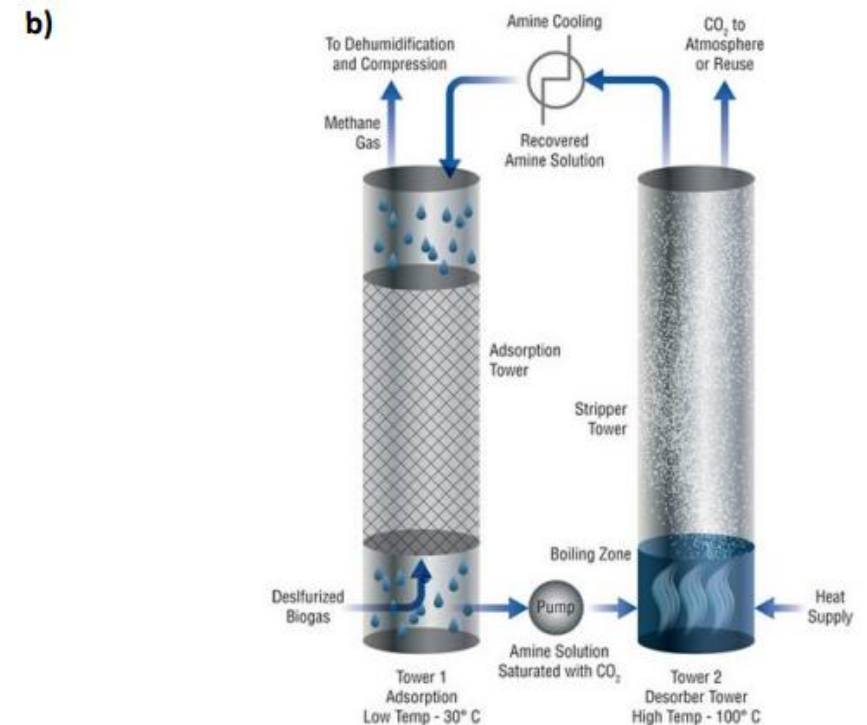
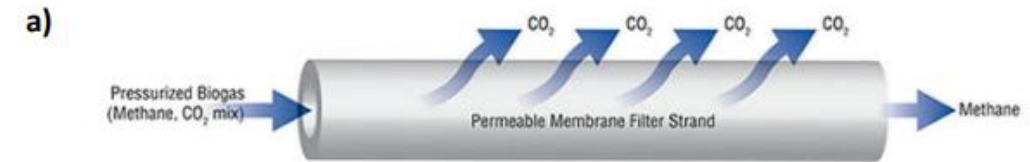
- Generación de energía eléctrica o térmica (cogeneración).
- Opción de enriquecimiento a biometano para inyección en la red o uso en vehículos.

## Enriquecimiento del Biogás

Objetivo: Separar el metano del resto de gases en el biogás para obtener un biometano de alta pureza.

## Tecnologías avanzadas:

- Absorción química: Elimina el  $\text{CO}_2$  usando aminas o álcalis.
- Membranas selectivas: Permiten separar metano de  $\text{CO}_2$ .
- Absorción por presión: Adsorbe el  $\text{CO}_2$  en materiales específicos bajo compresión.



## ¿Qué es?

Mezcla compleja de agua y multitud de sustancias orgánicas e inorgánicas particuladas, suspendidas y disueltas, incluyendo nutrientes, materia orgánica sin descomponer y contaminantes.

## ¿Por qué es relevante?

- Constituye entre el 70-90% del material de entrada
- No es completamente estable
- Riesgo ambiental (emisiones-acumulación)
- Oportunidad (recuperación nutrientes)

## Características:

- Materia seca: **4-6 %**
- **60-80 %** del nitrógeno en forma de  **$\text{NH}_4^+$**
- Los sustratos con una relación **C/N baja** (purines, estiércol, digestato líquido) tienen una **disponibilidad de nitrógeno** mucho más rápida y producen un **digestato más rico en N**
- También rico en otros **macro** y **micronutrientes**

## Características:

- Sólidos totales: 15-25%.
- Sólidos volátiles: 60-70% (materia orgánica parcialmente estabilizada).
- Relación C/N: 10-15, favorece la disponibilidad de nitrógeno amoniacal.
- Fracción líquida: Rica en nitrógeno, potasio y micronutrientes.
- Fracción sólida: Contiene carbono, fósforo y compuestos húmicos.

## Usos:

- Fracción sólida: Compostaje, mejora de la fertilidad del suelo y restauración de suelos degradados.
- Fracción líquida: Biofertilizantes líquidos, aplicados por fertirrigación en olivares y cultivos mediterráneos.

## Beneficios:

Mejora la eficiencia del nitrógeno y reducción de pérdida de carbono en el suelo.

## Aplicaciones convencionales:

- **Enmienda orgánica**
- **Recuperación de N** por stripping- scrubbing
- Post-tratamiento por **membranas**
- **Otros** (substrato para producción de biomateriales seleccionados)



D1, digestate; D2, digestate with amendments; M1, control mineral (composición nutricional equivalente al digestato, D1; M2, mineral nutrient solution designed for optimal growth. Fuente: Weimers y col. 2022

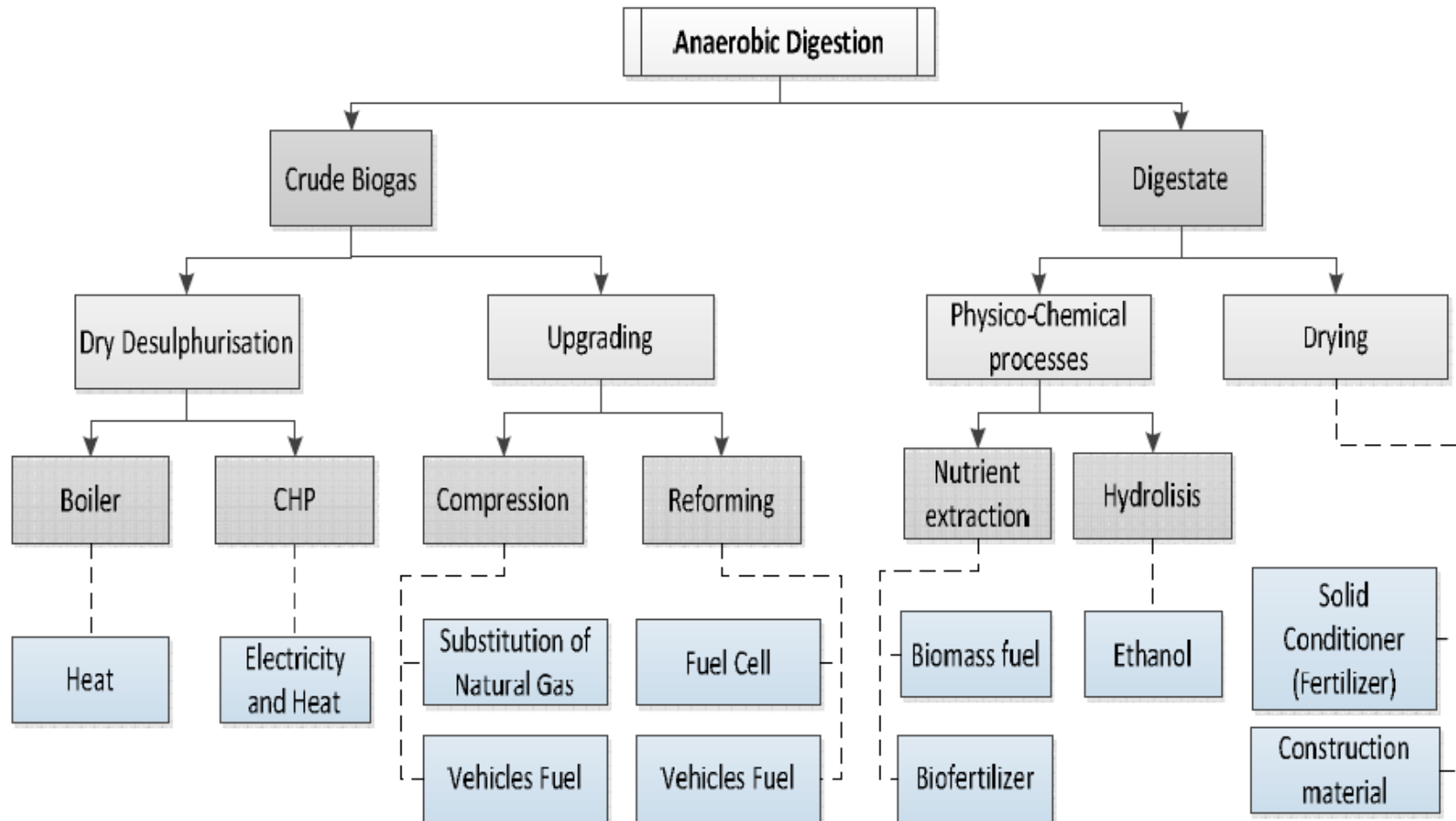
Fracción sólida digestato	Materia seca (%)	Materia orgánica kg/Ton	N (kg/Ton)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/Ton)	K <sub>2</sub> O (kg/Ton)
<b>Purín de porcino</b>	27-29	245-247	4-5	5-6	1-2
<b>85% purín vacuno</b>	24-26	209-225	5-6	2-3	2-3
<b>40% purín porcino</b>	29-30	260-270	6-7	4-5	1-2
<b>10% purín porcino</b>	22-23	168-170	10-12	10-11	0.5-1

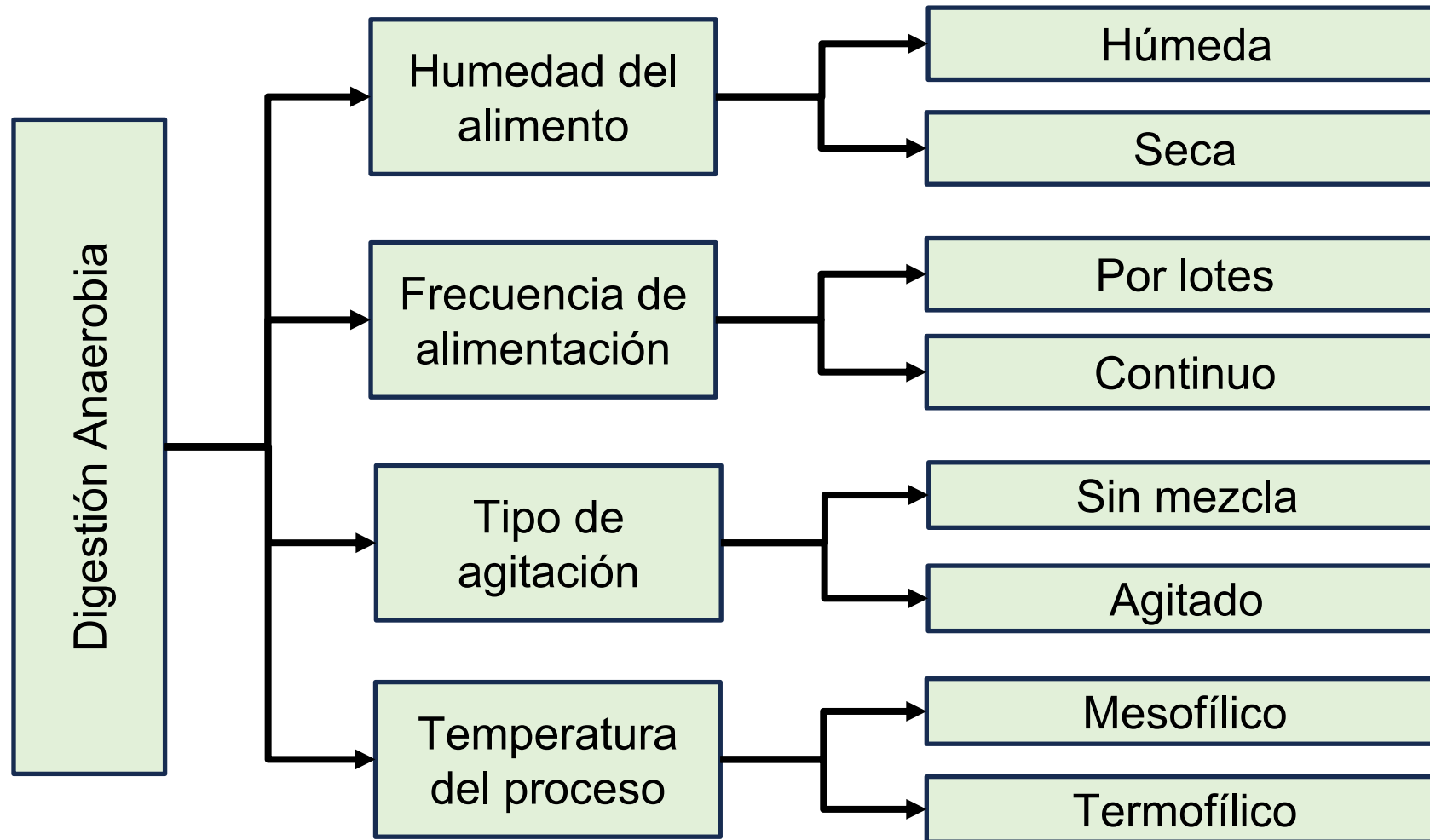
## Normativas:

- Real Decreto 999/2019 y Reglamento (UE) 2019/1009, que garantizan la calidad y seguridad del digestato para su uso agrícola.
- Límites estrictos en metales pesados, patógenos y contaminantes.
- Los digestatos que cumplen con los criterios pueden inscribirse como enmiendas húmicas, abonos orgánicos o fertilizantes organominerales.

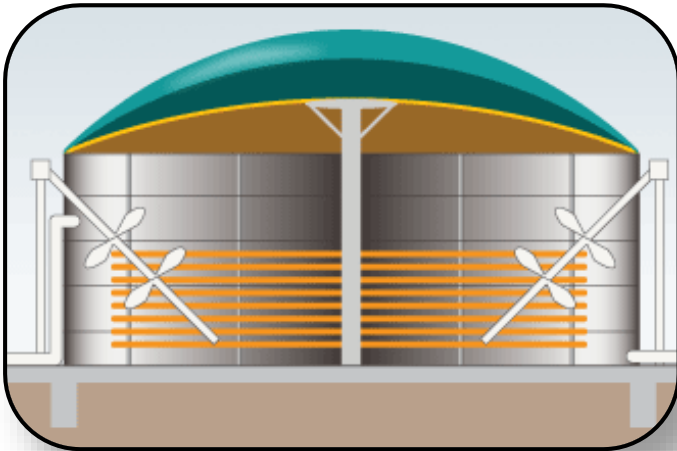
## Proyectos exitosos:

- LIFE OLIVE4CLIMATE (Italia y Grecia): Bio-enmienda húmica que mejora retención de agua y actividad microbiana.
- IFAPA (Andalucía): Fertirrigación con digestato líquido de alperujo, comparable a fertilizantes químicos.
- AgroBioGas (Portugal): Biofertilizantes líquidos a partir de digestato de alperujo y estiércol bovino.
- **Planta de Biogás de Mora la Nova (Tarragona):** Compost organomineral granulado para cultivos leñosos.





Una etapa  
Múltiples etapas

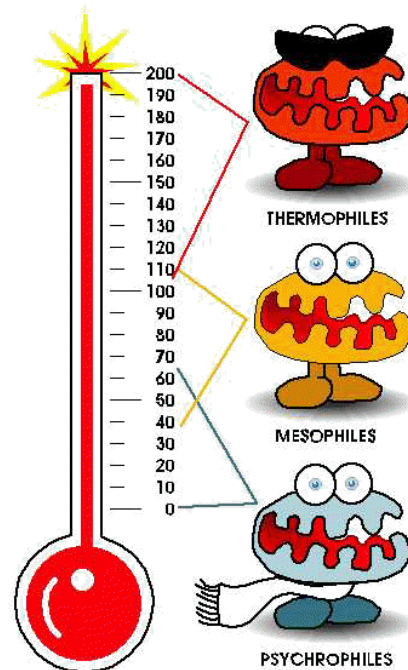


## Temperaturas

Mesofílicas	35-37 °C
Termofílicas	45-50 °C

## Contenido de sólidos

Seca	15-40%
Húmeda	< 8%



Aspecto	Compostaje	Digestión anaerobia
<b>Objetivo principal</b>	Estabilización de la materia orgánica y obtención de enmienda orgánica para el suelo.	Producción de energía renovable (biogás) y obtención de digestato.
<b>Materia prima</b>	Alperujo fresco mezclado con co-sustratos o estructurante (estiércol, poda, lodos).	Alperujo fresco (a menudo requiere pretratamiento: dilución, inoculación, mezcla con otros residuos húmedos).
<b>Relación C/N inicial</b>	Ajustada con co-sustratos ricos en N (15–30).	Baja, necesita co-digestión con residuos más ricos en N.
<b>Duración del proceso</b>	2–6 meses, según sistema y clima.	20–40 días de retención hidráulica, según reactor.
<b>Productos generados</b>	Compost maduro, estable, rico en materia orgánica.	Biogás (CH <sub>4</sub> + CO <sub>2</sub> ) y digestato semisólido/líquido.
<b>Valor agronómico</b>	Aporta carbono estable, mejora estructura, retención hídrica y fertilidad de suelos.	Digestato aporta nutrientes disponibles (N, P, K), pero menos carbono estable y alto contenido salino.
<b>Valor energético</b>	Nulo.	Elevado: producción de biogás (energía térmica y eléctrica, o biometano).
<b>Requisitos técnicos</b>	Relativamente sencillos; maquinaria agrícola común.	Tecnologías avanzadas (CSTR, UASB, digestores secos); mayor control técnico.
<b>Coste de inversión</b>	Bajo a medio, según escala.	Alto, requiere infraestructuras y mantenimiento especializado.
<b>Coste operativo</b>	Moderado (volteo, aireación, mano de obra).	Elevado (operación continua, personal cualificado, consumo energético).
<b>Impacto ambiental</b>	Reduce fitotoxicidad, mejora suelos, emisiones controlables con buenas prácticas.	Mitiga emisiones de GEI al generar energía renovable, pero riesgo de fugas de metano si no se gestiona bien.
<b>Escala de aplicación</b>	Adecuado para pequeñas y medianas almazaras, cooperativas.	Más viable en plantas centralizadas o grandes almazaras.

Escenario	Condiciones clave	Opción más adecuada	Justificación
<b>Pequeña almazara aislada (&lt;2.000 t aceituna/año)</b>	Producción limitada, baja capacidad de inversión, disponibilidad local de estiércol/poda.	Compostaje en pilas volteadas o sistemas aireados.	Bajo coste, simplicidad operativa, aprovechamiento agrícola directo en la propia finca o cooperativa.
<b>Cooperativa mediana (2.000–10.000 t/año)</b>	Capacidad de agrupar residuos, acceso a maquinaria, posibilidad de acuerdos locales.	Compostaje centralizado con co-sustratos.	Economías de escala, gestión conjunta de residuos, obtención de compost para reparto entre socios.
<b>Gran almazara (&gt;10.000 t/año)</b>	Alta capacidad de inversión, interés en energía renovable, posibilidad de venta de electricidad/biometano.	Digestión anaerobia + compostaje del digestato.	Permite producción energética y fertilización orgánica, cerrando el ciclo circular.
<b>Planta regional intercomunitaria</b>	Varios municipios/almacenes agrupados, financiación pública o privada.	Digestión anaerobia a gran escala con cogeneración y posterior compostaje del digestato.	Gestión integral de grandes volúmenes, mayor eficiencia energética, valorización agronómica del residuo final.
<b>Entornos con fuerte limitación hídrica o normativa estricta en vertidos</b>	Restricciones legales, necesidad de reducir aguas residuales.	Compostaje bifásico con residuos secos como correctores.	Menor riesgo ambiental, adaptación a normativa y optimización de recursos hídricos.

- 
- **Corto plazo (1–3 años):**
    - Abandono progresivo de prácticas de vertido en balsas.
    - Extensión del compostaje básico en pilas dentro de las propiasalmazaras o cooperativas locales.
  - **Medio plazo (3–7 años):**
    - Generalización de plantas de compostaje centralizadas, con incorporación de co-sustratos agroindustriales.
    - Primeras experiencias piloto de digestión anaerobia a escala mediana, vinculadas a cooperativas o agrupaciones de almazaras.
  - **Largo plazo (7–15 años):**
    - Integración de sistemas combinados digestión + compostaje en polos regionales de bioeconomía.
    - Producción de biometano e incorporación del compost de digestato en estrategias de mejora de suelos agrícolas y restauración ambiental



# Beta

Biodiversitat, Ecologia,  
Tecnologia Ambiental i Alimentària



UNIVERSITAT DE VIC  
UNIVERSITAT CENTRAL  
DE CATALUNYA

# Gràcies per la vostra atenció

[pedrofederico.rizzo@uvic.cat](mailto:pedrofederico.rizzo@uvic.cat)

[zoe.palmes@uvic.cat](mailto:zoe.palmes@uvic.cat)

ACCIÓ  Generalitat  
Companyes & Investment de Catalunya

**T** tecno  
catalonia

Vigència: 30/12/2024