

PLANTA DE BIOGÁS: FINCA MOURISCADÉ

Lorena Nodar Balseiro

2012



Este trabajo de fin de máster se ha elaborado con el fin de crear una guía de manejo de la planta de biogás que se está construyendo en Finca Mouriscadé. Esta guía abarcará parámetros de funcionamiento y recomendaciones de manejo de la planta así como estrategias para la gestión del digestato de la misma.

Tutores:

Salvador Calvet Sanz
María Hermida Ferro

UPV
Máster en Producción Animal
Departamento de Producción Animal
Trabajo de Fin de Máster

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	4
1.1	IMPORTANCIA SOCIOECONÓMICA Y AMBIENTAL DE LAS PLANTAS DE BIOGÁS.....	4
1.2	OBJETIVOS DE ESTE TRABAJO.....	5
1.3	FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE DIGESTIÓN.....	6
1.3.1	CONCEPTO DE BIOGÁS.....	6
1.3.2	DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	7
1.4	TIPOS DE PLANTAS Y DIGESTORES.....	11
1.4.1	CRITERIO DE DISEÑO TÍPICO.....	11
1.4.2	PRINCIPALES TIPOS DE PLANTAS.....	12
1.4.3	TIPOS DE DIGESTORES.....	14
2	CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA DE FINCA MOURISCADE.....	20
2.1	LOCALIZACIÓN:.....	21
2.2	UBICACIÓN DENTRO DE LA EXPLOTACIÓN.....	21
2.3	DISEÑO.....	22
2.4	ELEMENTOS DE LA CONSTRUCCIÓN.....	24
2.4.1	BALSA DE RECEPCIÓN:.....	24
2.4.2	DIGESTOR.....	24
2.4.3	PLATAFORMA CENTRAL.....	25
2.4.4	BALSA DE ALMACENAMIENTO DIGERIDO.....	25
2.4.5	POZO DE CONDENSACIÓN.....	25
2.4.6	CASETA DE CONTROL.....	25
2.4.7	CASETA DE GENERACIÓN.....	25
3	FUNCIONAMIENTO DEL DIGESTOR.....	26
3.1	CARACTERÍSTICAS DEL SUSTRATO A DIGERIR.....	27
3.2	PARÁMETROS DE CONTROL E INHIBICIÓN.....	28
3.2.1	PARÁMETROS AMBIENTALES Y OPERACIONALES.....	28
3.2.2	INHIBIDORES DE LA DIGESTIÓN.....	30
3.2.3	SUSTANCIAS INDESEABLES.....	32

3.3	MANEJO PRÁCTICO: CONTROL OPERACIONAL Y CAMBIO DE SUSTRATO.	32
3.3.1	FASES DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN UNA EXPLOTACIÓN DE VACUNO.	32
3.3.2	CODIGESTIÓN	34
3.3.3	CAMBIO DE SUSTRATO	35
3.3.4	PRE Y POST TRATAMIENTO	36
4	GESTIÓN DEL DIGESTATO	37
4.1	DEFINICIÓN DIGESTATO	38
4.2	VALORACIÓN DEL DIGESTATO Y CRITERIOS EXIGIBLES DE CALIDAD	38
4.2.1	CONTENIDO EN MATERIA ORGÁNICA Y EN NUTRIENTES	39
4.2.2	ESTABILIDAD Y MADUREZ	41
4.2.3	NIVEL DE HIGIENIZACIÓN	41
4.2.4	PRESENCIA DE PRODUCTOS TÓXICOS E IMPUREZAS	42
4.3	APLICACIÓN A TIERRAS DE CULTIVO	43
4.3.1	VENTAJAS DE LA FERTILIZACIÓN CON DIGESTATO	43
4.3.2	TIPOS DE CULTIVO Y FUNDAMENTOS DE LA FERTILIZACIÓN	43
4.3.3	RECOMENDACIONES A LA HORA DE APLICAR EL DIGESTATO A CAMPO	47
4.3.4	DIFERENCIAS ENTRE EL SUSTRATO DE ORIGEN Y EL DIGESTATO	48
4.3.5	EFFECTO DEL DIGESTATO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL SUELO	49
5	BIBLIOGRAFÍA	51

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 IMPORTANCIA SOCIOECONÓMICA Y AMBIENTAL DE LAS PLANTAS DE BIOGÁS.

En la producción ganadera existe un gran interés en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente: metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y óxido nitroso (N_2O). Paralelamente, resulta necesario promover un desarrollo sostenible de las actividades agrarias. La producción de rumiantes y el cultivo de suelos arables con uso de fertilizantes minerales u orgánicos son las mayores fuentes de metano y óxido nitroso respectivamente, y por tanto, la producción ganadera intensiva en Galicia puede suponer un elevado nivel de emisión de estos gases.

En la producción de vacuno lechero, tanto la fermentación entérica como los sistemas de almacenamiento de purines constituyen una fuente muy significativa de metano. Este potencial de producción de metano puede ser aprovechado promoviendo la generación de biogás a través de sistemas de digestión anaerobia. Esta tecnología está incrementando su reconocimiento y resulta prometedora en la agricultura para producir energía renovable y reducir las emisiones medioambientales (Kaparaju, 2003 y Zapata, 2012).

La economía a escala de la granja, en materia del sistema de biogás, depende del valor de la energía producida y materia digerida para su uso como fertilizante.

1.2 OBJETIVOS DE ESTE TRABAJO.

Durante mis prácticas de fin de máster en **Finca Mouriscade** (Lalín, Pontevedra), donde una de sus dependencias es una explotación de vacuno de leche de aproximadamente 90 cabezas, se ha estado construyendo una planta de biogás, donde se pretende digerir el purín de los animales de la explotación.

Este trabajo de fin de máster está estructurado como una **guía de manejo**, donde se pretenden definir los parámetros de funcionamiento y recomendaciones de manejo en el proceso de digestión anaerobia de purines.

Se va a valorar la **codigestión** del purín de vacuno con otros residuos (restos de alimentos, subproductos de industria alimentaria...) para mejorar la eficiencia energética del proceso. Hablaremos también de

los **parámetros** a tener en cuenta para valorar el proceso y de las sustancias que puedan inhibirlo.

Finalmente, en cuanto a la gestión del residuo resultante, el **digestato**, es un sustrato que puede ser utilizado como **fertilizante** en campos de cultivo, tal cual sale del digestor o por separación sólido-líquido. Valoraremos, entonces, el uso agrícola del digestato en función del tipo de cultivo y de las superficies en las que se prevea utilizar.

1.3 FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE DIGESTIÓN

1.3.1 CONCEPTO DE BIOGÁS.

La digestión anaerobia es un proceso bioquímico en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de microorganismos específicos, se descompone en productos gaseosos o "**biogás**" y en **digestato**, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc) y compuestos de difícil degradación.

El biogás contiene un alto porcentaje en **metano**, CH_4 (entre 50-70%), por lo que es susceptible de un aprovechamiento energético mediante su combustión en motores, turbinas o calderas, bien sólo o mezclado con otro combustible (véase Figura 1). El otro componente mayoritario es el CO_2 , aunque también contiene hidrógeno (H_2) y pequeñas cantidades de otros gases como sulfuro de hidrógeno (H_2S).

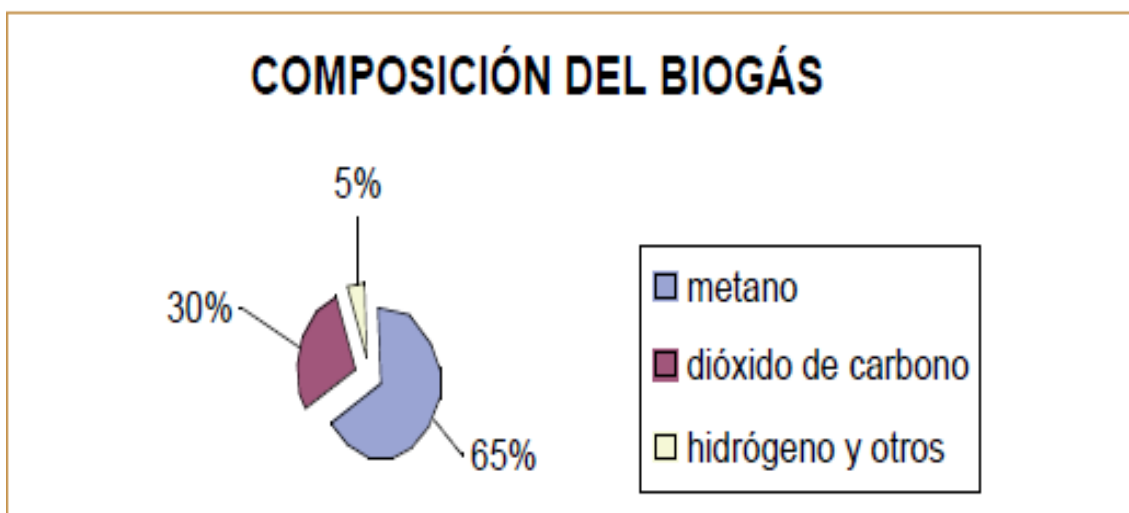


Figura 1. Composición habitual del biogás obtenido por digestión anaerobia.
Fuente: Delgado y col (2003).

1.3.2 DIGESTIÓN ANAEROBIA

Este proceso bioquímico consiste en la descomposición de la materia orgánica presente en la biomasa en ausencia de oxígeno. Los sustratos que se pueden digerir son: estiércoles, purines, restos de cosechas, residuos agrícolas... tanto de forma independiente como conjunta (**co-digestión**). Se obtiene una mezcla de productos gaseosos (biogás) y un residuo semisólido (digestato), tipo lodo o fango, que tendrá una mayor concentración en nutrientes que la biomasa inicial.

Este tipo de proceso se está utilizando desde hace muchos años con el objetivo de someter a los residuos a un proceso de **estabilización**, sin que se prestara atención al tipo de producto obtenido. Sin embargo, en los **últimos años**, la situación ha cambiado. Se ha estudiado en profundidad el proceso con el objetivo simultáneo de conseguir estabilizar el residuo y obtener unos productos con un alto **contenido energético**, intentando que la obtención de metano a partir de biomasa resulte competitiva. El potencial calorífico de 1 m³ de biogás es de 23000 kJ aproximadamente.

El tipo de **biomasa** que es tratada en un proceso de digestión anaerobia puede ser, entre otros, biomasa residual procedente de ganaderías y granjas, sobre todo estiércol de los animales. En general, este tipo de biomasa presenta un alto grado de **humedad** (menor producción de biogás), la materia orgánica se encuentra principalmente en forma de: azúcares, celulosa, hemicelulosa, proteínas y lignina. Hay que señalar, sin embargo, que no todas las sustancias orgánicas mencionadas presentan la misma predisposición a la descomposición bioquímica. Las más **aptas** para este tipo de proceso, y en orden decreciente, son: **monosacáridos, celulosa, proteínas y lignina** (véase la tabla 1), verificándose que la misma sustancia en diferentes sustratos, presenta comportamientos diferentes frente a la digestión anaerobia, y el resultado es que la fracción transformada varía.

Tabla 1. Tiempo de digestión de diversos compuestos (Steffen y col., 1998).

TIEMPO DIGESTIÓN	
LIGNINA	Prácticamente indegradable
CELULOSA	Varias semanas
HEMICELULOSA	Pocos días
GRASA	
PROTEÍNAS	
AZÚCAR DE BAJO PESO MOLECULAR	Pocas horas
ÁCIDOS GRASOS VOLÁTILES	
ALCOHOL	

a) **Etapas de la digestión anaerobia:**

La digestión o fermentación anaerobia de compuestos orgánicos es un proceso complejo en el que se producen un gran número de **reacciones químicas** y donde se presentan una gran variedad de **microorganismos**. No es fácil conocer la secuencia exacta en la que suceden todos los pasos del proceso. Sin embargo, sí se sabe que la fermentación anaerobia se desarrolla en tres etapas (Figura 2):

Primera etapa o hidrólisis: en esta etapa, los microorganismos, principalmente celulolíticos, actúan sobre la materia orgánica transformándola en monómeros, de fórmula molecular más simple y solubles.

Segunda etapa o acetogénica: los monómeros obtenidos son atacados por otro tipo de microorganismos, produciendo ácidos orgánicos de cadena corta, principalmente: ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno (también algunos alcoholes y aldehídos). Esta etapa se produce generalmente en la fosa de homogenización de los digestores.

Tercera etapa, metanogénica: las sustancias producidas en etapas anteriores son atacadas por microorganismos metanogénicos, que necesitan encontrarse en una atmósfera con ausencia de oxígeno. Como resultado se producen metano y dióxido de carbono.

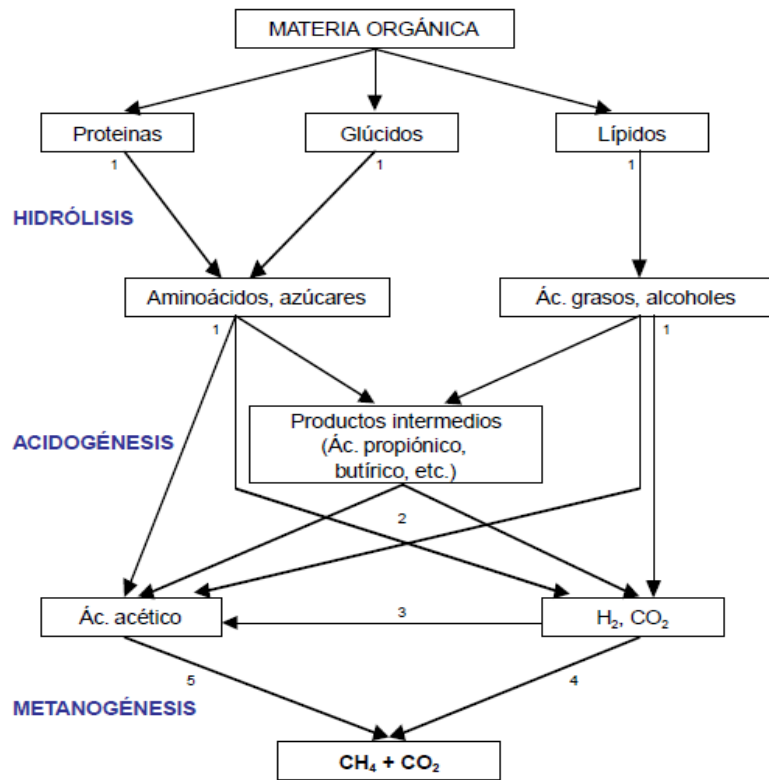


Figura 2. Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones de microorganismos: 1) Bacterias hidrolíticas-acidogénicas; 2) Bacterias acetogénicas; 3) Bacterias homoacetogénicas; 4) Bacterias metanogénicas hidrogenófilas; 5) Bacterias metanogénicas acetoclásticas. Fuente: IDAE (2007).

Los microorganismos **metanogénicos** son organismos claves en el digestor, su desarrollo es muy lento y son extraordinariamente **sensibles a las variaciones** que se producen en el medio que las alberga. Está comprobado que la digestión de los sustratos se realiza a diferentes **temperaturas**; sin embargo, el **tiempo** que se tarda en completar la digestión es variable y está en relación con ella. En este sentido, existen dos grandes clases de bacterias metanogénicas, cuyas temperaturas de desarrollo son muy diferentes:

- Las **bacterias mesófilas**, cuya temperatura óptima está entre **35 y 45 °C**.
- Las **bacterias termófilas**, para las que la temperatura oscila entre **50 y 60 °C**.

Se puede obtener metano también a partir del hidrógeno y dióxido de carbono, producidos en la segunda etapa, pero en cualquier caso, hay que señalar que la producción de metano está principalmente controlada por las bacterias metanogénicas.

Además de la temperatura, hay otras condiciones en las que se realiza el proceso que tienen una gran influencia sobre el desarrollo del mismo. Las variables más influyentes son la **acidez (pH)**, **el contenido en sólidos**, **el tipo de sustancias y el tiempo de retención**.

El **pH** tiene que estar muy controlado, debe mantenerse entre **6,5 y 8**. Fuera de este rango las bacterias no se desarrollan. El rango trabajo más adecuado es de 6,6 a 7,6. El pH influye sobre la cantidad de biogás producida y sobre la proporción de metano (IDAE, 2007).

c) Planta de biogás en una explotación ganadera.

Actualmente, las grandes explotaciones ganaderas tienen un volumen de estiércol y camas de ganado excesivo para verter en los terrenos de la propia explotación sin causar **daños medioambientales**. Por este motivo, los **residuos** generados por sus vacas son distribuidos a diferentes agricultores, con el último beneficio (sin dejar de ser importante) de la reducción de la carga contaminante. La aplicación de deyecciones ganaderas a los cultivos debe cumplir ciertos condicionantes que son:

- No superar la dosis máxima establecida en el Decreto 261/1996, del 16 de febrero, sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias. En el mismo se establece con carácter general una dosis máxima de 170 kg N por hectárea y año.
- Realizar las aplicaciones de deyecciones a campo, siguiendo criterios agronómicos que incluyan las dosis adecuadas de distintos nutrientes (especialmente nitrógeno, fósforo y potasio), según el calendario de aplicación más adecuado a cada cultivo.

La construcción de plantas de biogás en las explotaciones ha generado una serie de **ventajas**:

- Reducción significativa de malos olores.
- Eliminación de patógenos.
- Mineralización de los nutrientes presentes en las deyecciones.
- Producción de energía renovable.
- Reducción de la emisión de gases de efecto invernadero (reduciendo las emisiones descontroladas de metano y ahorrando la liberación de CO₂ al utilizar fuentes de energía fósiles).

A pesar de estas ventajas, las plantas de biogás también presentan una serie de **inconvenientes** (Predavanj, 2007; Flotats y col., 1997):

- El elevado contenido en agua del sustrato limita la digestión anaerobia centralizada en zonas con gran producción de purines.
- Los purines poseen sustancias que pueden resultar tóxicas para la digestión anaerobia.
- Elevada inversión inicial.
- No se elimina el N, de modo que se limita la aplicación del digestato a campo.
- Impactos al medio social como generación de ruido o impacto visual.

1.4 TIPOS DE PLANTAS Y DIGESTORES.

1.4.1 CRITERIO DE DISEÑO TÍPICO

El **espacio** determina principalmente la decisión de si el fermentador se sitúa por **encima del suelo o subterráneo**, si es que se construye como un cilindro en posición vertical o como una planta horizontal (se suelen usar digestores horizontales cuando hay sustratos ricos en materia seca como la cama de los animales).

Las estructuras existentes en la explotación ganadera pueden ser utilizadas, como un depósito de estiércol líquido, una sala vacía o un recipiente de acero. Para **reducir los costes**, puede ser necesario ajustar el diseño de la planta a estas estructuras.

Minimizar los costes puede ser un parámetro de diseño importante, especialmente cuando los beneficios monetarios se espera que sean bajos. En este caso una cubierta flexible del digestor es generalmente la solución más barata. La minimización de los costes a menudo se opone a maximizar el rendimiento del gas.

El **sustrato disponible** determina no sólo la **forma** del recipiente de mezcla, sino también, el **volumen del digestor** (tiempo de retención) y los dispositivos de calentamiento y agitación. La **agitación** a través de **inyección de gas** sólo es factible con un sustrato homogéneo y un contenido de materia seca por debajo del 5%. Sin embargo, la agitación **mecánica** puede ser problemática en sustratos con más del 10% de materia seca.

1.4.2 PRINCIPALES TIPOS DE PLANTAS.

a) Fixed-dome plants (plantas de cúpula fija):

Este tipo de planta contiene un **depósito de gas fijo** que se sitúa en la cima del digestor, el sustrato en digestión se desplaza al tanque de compensación. La presión del gas aumenta con el volumen de gas almacenado y con la diferencia de altura entre el digestor y la suspensión en el tanque de compensación.

Este tipo de digestores se sitúa **bajo el suelo**, es más **barato** ya que no tiene piezas móviles y además de **larga duración** (hasta 20 años) porque no está expuesto a daños físicos, sol y temperatura extremas. Además, permite el mejor aprovechamiento del espacio.

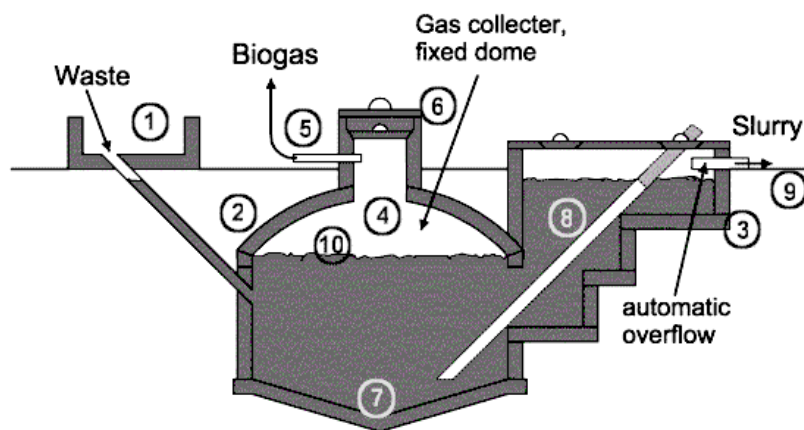


Figura 3. Fixed-dome plant: 1) Tanque de mezcla con tubería de entrada y trampa de arena; 2) Digestor; 3) Tanque de compensación y de eliminación; 4) Gasómetro; 5) Tubería de gas; 6) Escotilla de entrada con sello hermético; 7) Acumulación de fango espeso; 8) Tubería de salida; 9) Nivel de referencia; 10) Sobrenadante escoria interrumpido por diferentes niveles.

b) Floating-drum plants (plantas de tambor flotante):

Consiste en un digestor **bajo tierra** y una **campana de gas móvil**. La camisa de gas flota, ya sea directamente sobre la suspensión de fermentación o sobre una camisa de agua propia. El gas se recoge en el tambor que se levanta o se mueve hacia abajo, de acuerdo con la cantidad de gas almacenado. Un bastidor de guía impide la inclinación del tambor de gas. Si el tambor flota sobre una camisa de agua no puede atascarse, incluso si el sustrato tiene alto contenido en sólidos.

En este tipo de plantas la presión de gas se mantiene constante y el volumen de gas es fácilmente perceptible por la posición del tambor.

No hay problemas de estanqueidad siempre y cuando el gasómetro se desoxide y se pinte con regularidad. Los principales inconvenientes son que el tambor de acero es **caro** y requiere un **mantenimiento intensivo**, además, el **tiempo de vida** es relativamente **corto** en función del clima de la zona y con el uso de sustratos fibrosos pueden producirse **atacos**.

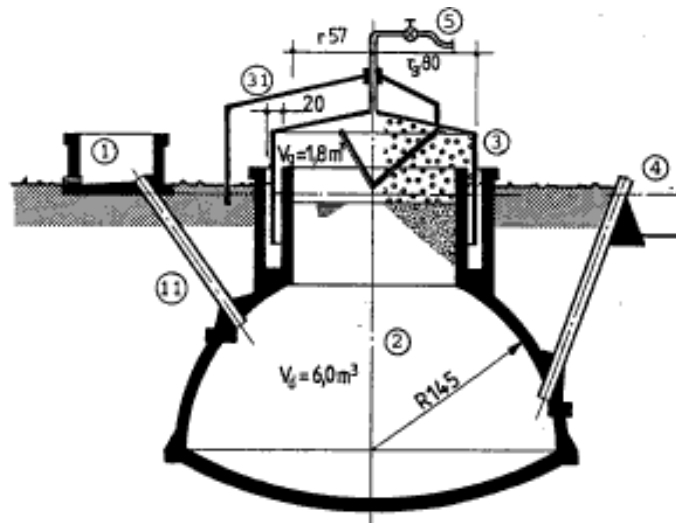


Figura 4. Floating-drum plant: 1) Pozo de mezcla; 11) Tubo de llenado; 2) Digestor; 3) Gasómetro; 31) Guía de encuadre; 4) Depósito de la suspensión; 5) Tubería de gas.

c) Tubo digestor de polietileno de bajo coste:

Se trata de un digestor de bajo coste muy común en países en desarrollo.

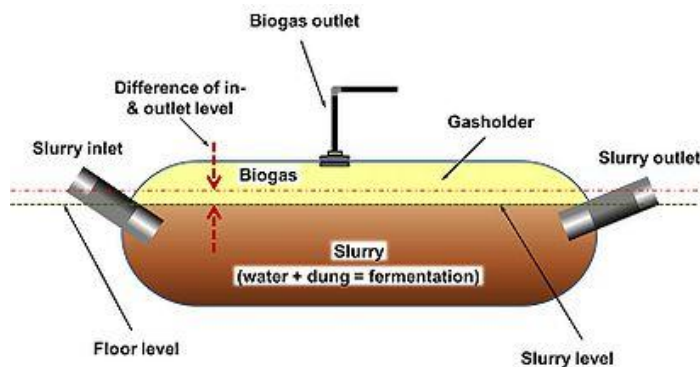


Figura 5. Low cost polyetylen tube digester

1.4.3 TIPOS DE DIGESTORES

El digestor es la parte de la planta de biogás donde es fermentado el sustrato por las bacterias anaerobias. Los principales tipos de digestores de una planta de biogás a escala de granja son los siguientes (Fischer y col., 2002 e IDAE, 2007):

SEGÚN EL TIPO DE CONSTRUCCIÓN:

a) Digestor horizontal:

Las principales **plantas de biogás a pequeña escala** son construidas con este tipo de digestores. El material que se suele utilizar es acero y aunque hace años se aprovechaban antiguos tanques para su construcción, actualmente no es común este proceso de reciclaje.

El **tiempo de retención** en este tipo de digestores es de entre **30 y 50 días**, dependiendo del tipo de sustrato que entre en el mismo. El sustrato en primer lugar se calienta gracias a **brazos calefactores** (Figura 6) y cuando se alcanzan temperaturas mesófilas, la mezcla se remueve mediante brazos estándar. Este tipo de digestores es apropiado para estiércol de pollo, ya que tiene muy buenas condiciones de mezcla, incluso para sustratos sólidos. Este tipo de digestores es **económico** pero no puede ser transportado cuando es de gran tamaño.

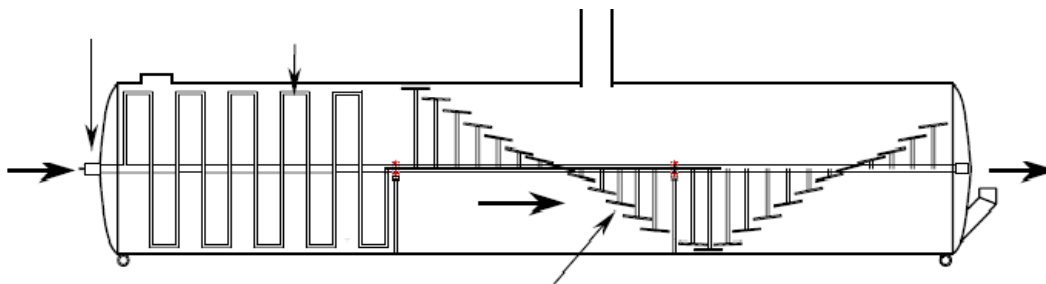


Figura 6. Digestor horizontal

b) Digestor vertical estándar agrícola:

La altura de este tipo de digestores varía entre 5 y 6 metros y el diámetro entre 10 y 20. Estos tanques tienen en sus paredes **tuberías** por las que **circula agua caliente**, como sistema calefactor. El digestor (figura 7) dispone de **mezcladores** y una **doble membrana** en la parte superior del mismo, la membrana interna actúa reteniendo el gas y la externa como protección. Entre las dos membranas hay un soplador que mantiene la presión constante. El **tiempo de retención** es de entre **40 y 80 días**

dependiendo del sustrato. Este tipo de digestores se puede usar con **cualquier sustrato** siempre que el flujo sea lento.

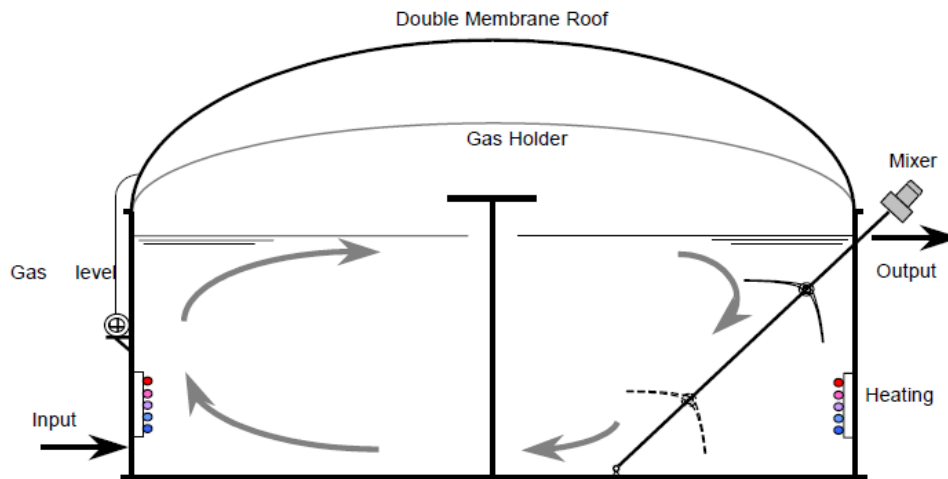


Figura 7. Digestor vertical estándar agrícola (10000 m³ de sustrato al año).

c) Gran digestor vertical:

Se usa este tipo de digestor cuando las **cantidades de sustrato** al año son **elevadas**. El material con el que suele estar construido es acero resistente a la corrosión. La altura es de entre 15 y 20 m y el diámetro de entre 10 y 18 m. Hay un **mezclador** que funciona **continuamente** y el sustrato entra **precalentado** en el digestor. El **tiempo de retención** es de entorno a **20 días**.

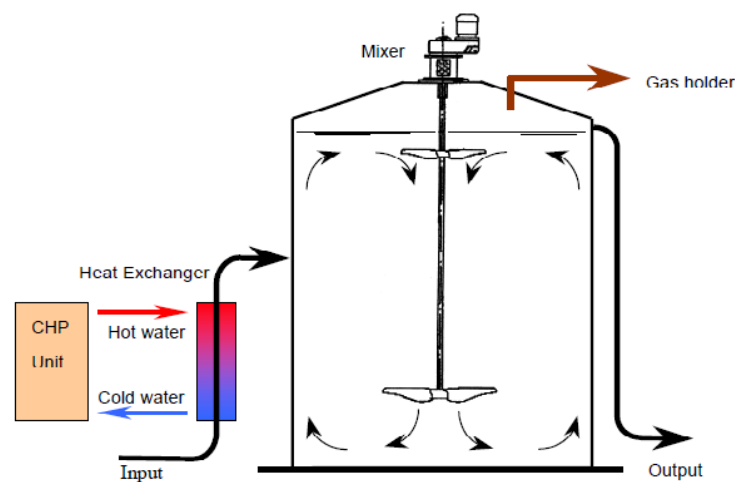


Figura 8. Gran digestor vertical (30000 m³ de sustrato al año).

SEGÚN LA CAPACIDAD DE MANTENER ALTAS CONCENTRACIONES DE MICROORGANISMOS EN EL REACTOR:

a) Reactor de mezcla completa (RMC) sin recirculación:

Consiste en un reactor (Figura 9 y 10) en el que se mantiene una distribución uniforme de concentraciones, tanto de sustrato como de microorganismos. Esto se mantiene mediante un sistema de agitación mecánica o neumática. El tiempo de retención necesario es alto en comparación con otro tipo de reactores.

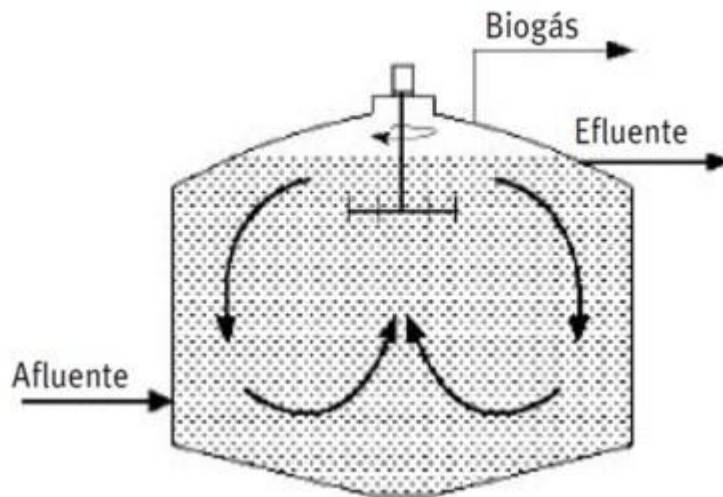


Figura 9. Reactor de mezcla completa sin recirculación.



Figura 10. Reactor de mezcla completa sin recirculación de Finca Mouriscade.

b) Reactor de mezcla completa (RMC) con recirculación:

Este reactor (Figura 11) también se denomina reactor anaerobio de contacto. El digestor regula la recirculación de modo que se consiguen tiempos de retención más bajos, gracias al confinamiento de microorganismos en el sistema mediante la separación de los mismos en el decantador. Dado su mecanismo de actuación solo es aplicable a aguas residuales de alta carga orgánica.

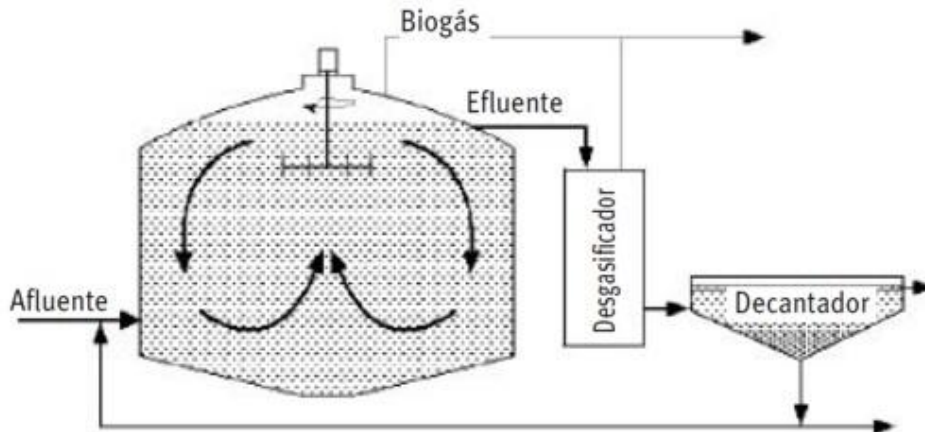


Figura 11. Reactor de mezcla completa con recirculación.

Se consigue retener bacterias en el interior del reactor, evitando la configuración de reactor de mezcla completa, es posible reducir el tiempo de retención por debajo del reactor RMC tomado como referencia. Los métodos de retención de biomasa son:

- **Inmovilización sobre un soporte** (filtros anaerobios y lechos fluidificados):

Filtros anaerobios: en este sistema (Figura 12) las bacterias están fijadas en un soporte inerte de plástico o cerámico. Es usado en el tratamiento de aguas residuales de industrias agroalimentarias y el principal factor limitante es el alto coste del mismo.

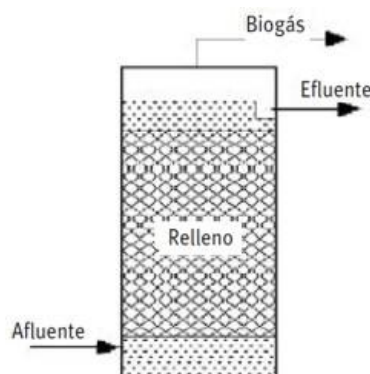


Figura 12. Reactor de filtros anaerobios.

Lechos fluidificados: en este sistema las bacterias se encuentran fijadas, formando una biopelícula, sobre pequeñas partículas de material inerte que se mantienen fluidificadas mediante el flujo ascendente adecuado del fluido. Para mantener el caudal adecuado, que permita la expansión y fluidización del lecho, se recurre a la recirculación (ver Figura 13)

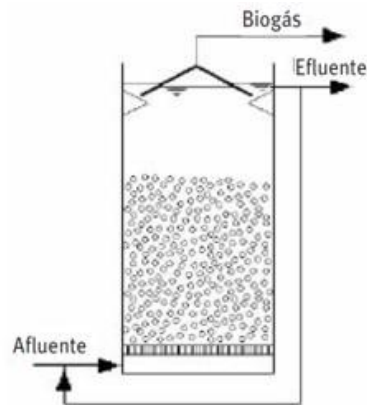


Figura 13. Reactor de lechos fluidificados.

- **Agregación o floculación de biomasa y su retención por gravedad** (reactores de lecho de lodos).

En este sistema (Figura 14) se favorece la floculación o agregación de bacterias entre ellas, formando gránulos o consorcios, de forma que por sedimentación se mantienen en el interior del reactor, con la velocidad ascendente adecuada del fluido, siempre que en la parte superior exista un buen separador sólido/líquido/gas.

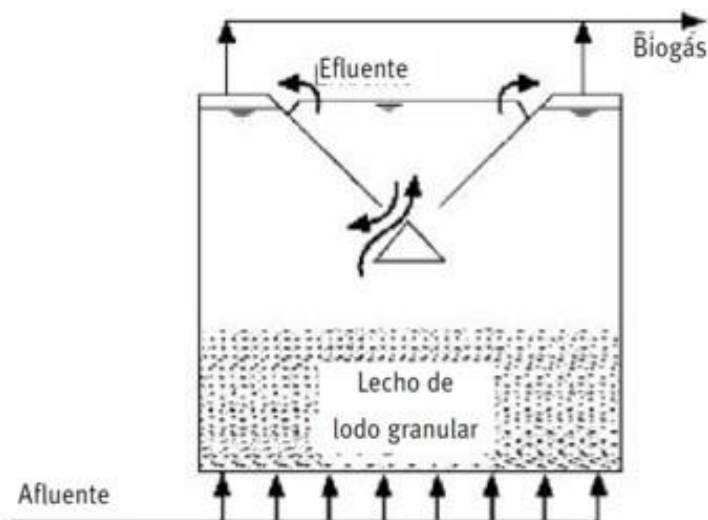


Figura 14. Reactor de lecho de lodos

Aunque los **reactores de flujo de pistón** (Figura 15) no están encuadrados en este apartado, el hecho de que la tasa de crecimiento de microorganismos sea más elevada a la entrada del reactor (donde la concentración de sustrato también es más elevada) hace que la concentración media en el reactor sea superior a la correspondiente a mezcla completa, o en todo caso superior a la de salida, con lo cual, el tiempo de retención será inferior. Este tipo de reactor ha sido aplicado a diferentes tipos de residuos orgánicos, como fracción orgánica de residuos municipales (configuración vertical y flujo ascendente) y residuos de porcino y bovino. Una de las dificultades es la debida a la falta de homogenización en la sección transversal a la dirección del flujo en las configuraciones horizontales, lo cual se puede evitar mediante un sistema de agitación transversal.

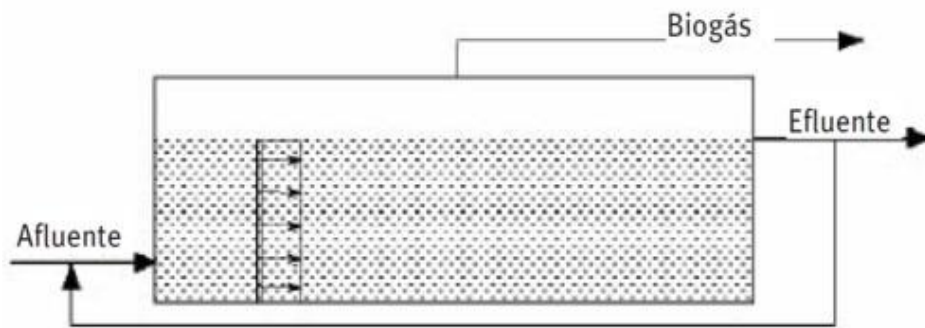


Figura 15. Reactor de flujo de pistón.

d) Sistemas discontinuos:

En un sistema discontinuo, la curva de evolución temporal de la producción de biogás sigue la misma tendencia que la curva típica de crecimiento de microorganismos (latencia, crecimiento exponencial, estacionalidad y decrecimiento). Aquí el concepto de tiempo de retención no tiene sentido y se habla de tiempo de digestión. Para conseguir una producción de biogás cercana a la continuidad hay que combinar varios reactores discontinuos.

Estos reactores han sido aplicados a residuos con una alta concentración de sólidos que dificultan la adopción de sistemas de bombeo, tales como residuos de ganado vacuno con lecho de paja.

e) Otros sistemas: sistemas de dos etapas, sistemas de dos fases...

2. CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA DE FINCA MOURISCADE

2.1. LOCALIZACIÓN:

La obra se ubica en un pequeño espacio de una subparcela de la actual granja de Mouriscade, más concretamente:

Tabla 2. Ubicación de la parcela donde se sitúa la planta de biogás.

PROVINCIA	PONTEVEDRA
MUNICIPIO	LALÍN
POLÍGONO	265
PARCELA	1998 (donde se incluye la actual granja)
RECINTO	9
SUPERFICIE	8,8102 Ha
PENDIENTE MEDIA	11,40
USO ACTUAL	PASTIZAL

2.2. UBICACIÓN DENTRO DE LA EXPLOTACIÓN

Las instalaciones de la planta de biogás se consideran un anexo de la actual granja, debido al tratamiento de purines que se genera en dicha instalación para la reducción de olores y generación de energía eléctrica. Se adjuntan diversas tablas con las coordenadas exactas (Tabla 3), ocupación concreta del terreno (Tabla 4) y ubicación de cada elemento de la planta (Tabla 5).

Tabla 3. Coordenadas de la instalación y del centro de actividad.

COORDENADAS DE LA INSTALACIÓN	
X	570.468
Y	4.718.683
HUSO	29
COORDENADAS GEOGRÁFICAS DEL CENTRO DE ACTIVIDAD	
LATITUD	42° 36' 51 N
LONGITUD	8° 08' 26 O

Tabla 4. Ocupación exacta del terreno por la planta de biogás.

OCUPACIÓN DE TERRENO			
POLÍGONO	PARCELA	RECINTO	SUPERFICIE m²
265	1998	9	
TOTAL SUPERFICIE (m²)			88.102
SUPERFICIE AFECTADA POR LA ACTIVIDAD (m²)			87,17
OCUPACIÓN DEL RECINTO (%)			0,09894 %

Tabla 5. Ocupación de los diferentes elementos de la planta de biogás.

OCUPACIÓN DE LOS DIFERENTES ELEMENTOS DE LA PLANTA					
	FORMA	BASE	ALTURA	SUPERFICIE OCUPADA	VOLUMEN TOTAL
		m	m	m²	m³
BALSA DE ALIMENTACIÓN	RECTANG	3,00 x 1,6	2,5	4,8	12
DIGESTOR	CIRCULAR	9,05 ø	4	64,33	257,30
POZO DE CONDENSADOS	CIRCULAR	0,6 ø	3	0,28	0,85
CASETA CONTROL	RECTANG	4,00 x 2,44	2,87	9,76	28,01
ZONA DE GENERACIÓN	RECTANG	5,0 x 3,0	2,8	8,00	22,40
TOTAL				87,17	230,56

2.3. DISEÑO

En el entorno rural, las explotaciones ganaderas presentan un potencial alto de aprovechamiento de sus residuos que además reduce el impacto ambiental de esta actividad. El centro Tecnológico Energylab, en convenio con la **Xunta de Galicia**, está desarrollando un proyecto de instalación de una Planta Piloto de Biogás en una explotación ganadera con el fin de evaluar la viabilidad energética, medioambiental y económica de este tipo de valorización, además de fomentar el uso de biogás como fuente de energía renovable. A través de la construcción de la planta piloto y su posterior monitorizada por **EnergyLab**, se podrá testear el funcionamiento de la misma, así como realizar un estudio de las potencialidades energéticas de la mezcla de diferentes tipos de residuos (purines, restos de silo y piensos) para su co-digestión. El biogás producido será utilizado para la generación eléctrica mediante una microturbina.

La planta produce el biogás a partir de los **purines y residuos agroalimentarios** de la explotación ganadera y del laboratorio de análisis de alimentos para animales, ubicados ambos en la Finca Mouriscade, perteneciente a la Diputación de Pontevedra. La potencia del diseño se corresponde con el tamaño de la explotación ganadera, 100 cabezas de ganado, que además representa una granja de vacuno típica de Galicia. Esta región se caracteriza por el gran número de explotaciones ganaderas de pequeño tamaño: unas 47.000

explotaciones que suman un total de 500.000 cabezas de ganado lechero, según datos de la Xunta de Galicia.

El digestor de mezcla completa se ha construido en hormigón e incorpora una cubierta flexible para la acumulación del Biogás. Mediante un sistema de agitación se obtiene una mejor distribución de los nutrientes, para las bacterias metanogénicas. El equipo de cogeneración es un motor alternativo de combustión interna, CHP. Los residuos se almacenan en una balsa de premezcla para su homogenización antes de ser introducidos en el digestor. El digestato se utilizará como fertilizante en la propia explotación.

La **generación eléctrica** prevista es de más de 116.800 Kw/h/año (consta de un generador eléctrico de 30 kw), que debido al cambio legislativo del RD 1/2012, se auto consumirá en la granja aportando hasta un 60% de la energía consumida en la misma.

La planta estará en pleno funcionamiento a finales del mes de septiembre, iniciando en ese momento los ensayos planificados por EnergyLab en el proyecto. La monitorización continua de la planta permitirá además caracterizar su funcionamiento bajo distintas condiciones de operación.

El **acceso** para la actual planta se realizará a través de un camino existente desde la granja.

Se prevé la realización de un **cierre perimetral** de la planta de biogás, con un muro de mampostería de 20 cm y un vallado de malla de torsión simple, sujeto con postes y tensores galvanizados, anclados a un cimiento de hormigón de 2 m de altura.

Así mismo, se proyectará una **iluminación** exterior con fluorescentes en la zona de oficina, de recepción de material y de cogeneración.

Se colocarán los **carteles** pertinentes de advertencia y peligro para el personal y visitas.

Dentro de la planta el **movimiento de vehículos** se realizará por un camino de tierra que finalizadas las obras se rellenará con grava, este camino es de 4 metros de ancho.

2.4. ELEMENTOS DE LA CONSTRUCCIÓN

2.4.1. Balsa de RECEPCIÓN:

En la planta se reciben las materias primas provenientes exclusivamente de la granja. El transporte de las materias primas se realizará por gravedad a excepción de los restos de alimentos para lo que se utilizará un tractor existente en la misma. En esta balsa se homogenizan los sustratos antes de entrar en el digestor.

Se trata de un depósito rectangular hecho de hormigón armado que se sitúa a 1 m de altura sobre el nivel del suelo (dimensiones en la Tabla 5).

2.4.2. DIGESTOR.

Reactor de mezcla completa sin recirculación (RMC) (Figura 16) construido de hormigón, equipado con un mecanismo de agitación, se trata de un reactor con una cubierta de plástico (las dimensiones del mismo se encuentran ilustradas en la Tabla 5). El acabado está hecho con placa metálica de color verde y lona de color negro. La capacidad del digestor es de 240 m³.



Figura 16. Digestor en construcción de la explotación.

2.4.3. PLATAFORMA CENTRAL.

Plataforma de acero inoxidable de 1 m de largo x 0,8 m de ancho con barandillas reglamentarias para acceder a la parte superior del digestor y al agitador.

2.4.4. Balsa de Almacenamiento Digerido.

Se utilizará la misma balsa de almacén de digerido existente en la granja (anteriormente se trataba de una fosa de purín) y a 4 metros del nuevo depósito.

2.4.5. POZO DE CONDENSACIÓN.

Pozo de condensación circular (dimensiones en Tabla 5) que incluye tapa en la parte superior de la rejilla. Realizado en hormigón prefabricado. La base del pozo está realizada en hormigón e incluye pintura para evitar la corrosión.

2.4.6. CASETA DE CONTROL.

La planta presenta una caseta prefabricada que se encuentra dentro del complejo de la planta de producción (dimensiones en Tabla 5). Dentro de ella se situará la zona de valoración de biogás, se usará como centro de control y oficina.

2.4.7. CASETA DE GENERACIÓN

La caseta de cogeneración no dispone de paredes. En ella, se encontrará el generador eléctrico de 30 kw.

3. FUNCIONAMIENTO DEL DIGESTOR

3.1. CARACTERÍSTICAS DEL SUSTRATO A DIGERIR

El sustrato principal a digerir, en este caso el **purín de vacuno**, es un sustrato cuya composición es variable (Tabla 2). Los factores que más influyen son es el tipo de alojamiento de las vacas y su alimentación (Steffen y col., 1998). El purín de bovino se caracteriza por su alta humedad, **baja concentración en materia orgánica** y alto tiempo de retención en el digestor (mayor cuanto más grandes sean las partículas). Esto imposibilita el transporte rentable del mismo desde zonas lejanas para producir biogás (Yadvika y col., 2004).

El **alto contenido en agua** del purín es la causa de que sea necesario un gran volumen en el digestor y de que el calor necesario por m³ sea mayor. La materia orgánica, cuyo principal elemento es el carbono, es la fuente de producción de metano. Al ser reducida la cantidad de éste (el ratio C:N es de 6 cuando lo indicado es que el ratio C:N:P sea 100:5:1) en los purines, el rendimiento energético del mismo no es muy elevado (Tabla 3). Este problema junto con el de presencia de inhibidores como nitrógeno amoniacal y el desequilibrio de pH se pueden contrarrestar mediante procesos de **co-digestión**.

Tabla 6. Composición general del purín de vacuno (Steffen, 1998).

COMPOSICIÓN DEL PURÍN DE VACUNO	
GRASA	3,5 – 7,5
PROTEÍNA	13,7 – 15,6
HIDRATOS DE CARBONO	59,9 – 62,1
CELULOSA	14,5 – 25,0
HEMICELULOSA	2 – 19,3
LIGNINA	6,8 – 9
RESIDUOS INORGÁNICOS	16 - 29

Tabla 7. Características del purín de vacuno como sustrato de una planta de biogás (Steffen, 1998).

CARACTERÍSTICAS DEL PURÍN DE VACUNO	
Sólidos totales (%)	5 – 12 %
% de Sólidos Volátiles en función de los Sólidos Totales	75 - 85%
C:N	6 - 20
Producción de Biogás	0,2 – 0,3 m ³ / kg
Tiempo de Retención	20 – 30 días
Contenido de CH₄ (%) del biogás obtenido	55 – 75 %
Sustancias No Deseadas	Pelo, suelo, agua, amoníaco, paja y madera
Sustancias Inhibidoras	Antibióticos y desinfectantes
Problemas Frecuentes	Capas de espuma y reducción de producción de biogás.

3.2. PARÁMETROS DE CONTROL E INHIBICIÓN.

3.2.1. PARÁMETROS AMBIENTALES Y OPERACIONALES

Existen una serie de parámetros ambientales y operacionales que deben controlarse en cualquier proceso de digestión anaerobia para asegurar el buen funcionamiento del mismo, estos son (IDAE, 2007):

- **pH:** tiene que estar muy controlado, debe mantenerse entre **6,5 y 8**. Fuera de este rango las bacterias no se desarrollan. El rango de trabajo más adecuado es de 6,6 a 7,6. El pH influye sobre la cantidad de biogás producida y sobre la proporción de metano.
- **Alcalinidad** superior a 1,5 g/L CaCO₃ y **potencial redox** con valores recomendables inferiores a -350 Mv.
- **Nutrientes:** con valores que aseguren el crecimiento de los microorganismos. La materia orgánica presente en un sustrato se expresa normalmente en términos de sólidos volátiles (SV) o demanda química de oxígeno (DQO).
- **Tóxicos e inhibidores:** su concentración debe de ser la mínima posible.

- **Temperatura:** existen tres rangos operacionales de temperatura: **psicrófilo** (temperatura ambiente), **mesófilo** (temperaturas en torno a 35°C) o **termófilo** (temperaturas en torno a 55°C). Las tasas de crecimiento y reacción aumentan conforme lo hace el rango de temperatura, pero también la sensibilidad a algunos inhibidores como el amoníaco. En el rango termófilo se aseguran tasas superiores de destrucción de patógenos.
- **Agitación:** mediante este sistema se permite poner en contacto el sustrato con las bacterias, eliminar metabolitos producidos por bacterias, favorecer la salida de gases, prevenir la formación de una capa superficial (costra), de espumas, así como la sedimentación en el reactor.
- **Tiempo de retención hidráulico (TRH):** es el cociente entre el volumen del digestor y el caudal de entrada del sustrato al mismo. Es decir, el tiempo medio de permanencia del sustrato en el reactor, donde está sometido a la acción de los microorganismos. Existe un tiempo mínimo por debajo del cual el reactor no presenta actividad. Éste, en un sistema de mezcla completa, deberá ser como mínimo el correspondiente a la velocidad de crecimiento de los microorganismos. El tiempo de retención usual en el rango mesófilo para residuos ganaderos y lodos de depuradora está entre 15 y 30 días, aunque depende del tipo de reactor utilizado. Es importante destacar que cuanto mayor es el tiempo de retención, mayor es la **producción de biogás** y menor la cantidad de **materia orgánica en el digestato**.

$$THR = \frac{V_d(L)}{C_d(L)}$$

Donde:

V_d : volumen del digestor en litros,

C_d : volumen diario de purín introducido en el digestor en litros,

- **Velocidad de carga orgánica (VLR):** es la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo, expresada en kg de SV o DQO por m³ y día. Valores bajos implican baja concentración de materia orgánica en el influente y/o elevados tiempos de retención hidráulica. El incremento en la VLR implica una reducción en la producción de gas por unidad de materia orgánica introducida, debiendo encontrar un valor óptimo

técnico/económico para cada instalación y residuo a tratar. Un aumento repentino de la carga orgánica puede provocar una sobrecarga. Los valores normales para residuos ganaderos y fracción orgánica de residuos sólidos están entre 1 y 4 kg SV/m³ /día.

- **Inóculo:** los estiércoles y purines poseen las bacterias anaerobias implicadas en el proceso de digestión anaerobia, sin embargo la digestión anaerobia de estos sustratos sin la adición de inóculo produce bajas tasas de metano que incrementan al introducir lodo anaerobio. Durante la puesta en marcha de los digestores anaerobios la biomasa debe aclimatarse a las nuevas condiciones ambientales, es decir, al sustrato, a temperatura y características del reactor. Un nuevo equilibrio se establece gradualmente entre las diferentes poblaciones bacterianas hasta que el sistema se estabiliza y puede degradar eficientemente la materia orgánica. Por tanto encontrar un ratio inóculo/sustrato óptimo, resulta fundamental.
- El **contenido en sólidos** debe de ser bajo, entre el **10 %** y el **12 %**, por lo que el grado de humedad será alto. Las bacterias necesitan un medio fluido para su desarrollo pero con una concentración adecuada de nutrientes. Es necesario que, aproximadamente, el **10% del total** de biomasa seca esté constituida por **nitrógeno**, y que un **2% sea fósforo**. Además, deberá haber potasio y sales minerales.

3.2.2. INHIBIDORES DE LA DIGESTIÓN.

Existen una serie de sustancias que inhiben la digestión, éstas pueden ser:

a) Amoniaco:

El amoniaco es un producto final de la digestión que en altas cantidades (>1-2 g/l) produce **efectos inhibitorios en los microorganismos**, aunque estos presentan cierta capacidad de adaptación al mismo. Se ha estudiado la inhibición en los cultivos mesófilos mixtos debido a la presencia de amoniaco en el purín de animales. La tasa de crecimiento bacteriano y la tasa específica de absorción de acetato se vieron afectadas por la concentración de amoniaco sin ionizar (Poggi-Varaldo y col., 2007; Angelidaki y col., 2003).

b) Ácidos grasos:

La presencia de **ácidos grasos de cadena larga** (se suelen encontrar en residuos de mataderos) genera un retraso en la producción de metano a partir de acetato, así como de la degradación de ácidos grasos de cadena larga y butirato. Los ácidos grasos neutros de la leche son fácilmente hidrogenados a largas cadenas de ácidos grasos que afectan a la digestión. La adición de cloruro de calcio reduce el efecto inhibitorio de estos ácidos grasos siempre y cuando la exposición del cultivo no se haya llevado a cabo durante muchas horas (Hanaki y col., 1981).

La concentración de **ácidos grasos volátiles (AGV)**, productos intermedios mayoritarios del proceso anaerobio (es normal su aparición en concentraciones normales), es uno de los parámetros que más eficazmente pueden indicar la evolución del proceso. De hecho, este parámetro es uno de los más utilizados en los sistemas de control debido a su rápida respuesta ante variaciones del sistema. Un ejemplo de ello, es la acumulación de ácidos grasos volátiles que tiene lugar en el sistema cuando la velocidad de degradación de éstos, por parte de las bacterias responsables, disminuye por alguna causa adversa. Por tanto, un aumento excesivo en la concentración de ácidos volátiles en el sistema, significa una desestabilización del proceso y, en consecuencia, una disminución de la producción de biogás. Altos contenidos en AGV son más nocivos cuando le **pH es bajo**.

c) Sulfatos y sulfuros:

La presencia de elevadas concentraciones de sulfato en el sustrato puede producir la inhibición del proceso anaerobio, especialmente de la metanogénesis. En presencia de sulfatos, las bacterias metanogénicas compiten con las sulfo-reductoras por los mismos sustratos (acetato e hidrógeno), mostrando estas últimas, ventajas termodinámicas y cinéticas sobre las primeras. El resultado de esta competición determinará la proporción de sulfhídrico y metano en el biogás producido.

Por tanto, la inhibición tiene dos etapas, la primera debida a la competición por el sustrato entre los microorganismos metanogénicos y sulfato-reductores y la segunda es una inhibición directa de crecimiento metanogénico por la presencia de sulfuros solubles.

- d) **Antibióticos y desinfectantes.** Matan los microorganismos, entre ellos los encargados de la digestión anaerobia.
- e) **Metales pesados:** no suelen encontrarse en cantidades tan elevadas como para resultar nocivos. Al diluirse con otros sustratos pierden toxicidad.

La toxicidad de los **AGV, H₂S y NH₃** está asociada a las formas no disociadas. La cantidad de ácido/base libre depende del grado de disociación (**pK**), **pH** (mayor toxicidad del NH₄⁺ y H₂S a pH elevados y de los AGV a pH bajos) y **concentración** total en disolución (Martí, 2006).

3.2.3. SUSTANCIAS INDESEABLES

Steffen y col. (1998) afirma que la presencia de ciertas sustancias es indeseable ya que pueden ocasionar modificación de la dinámica de fluidos, del comportamiento de degradación y de la producción de biogás. Algunas de estas sustancias son: **paja** (aunque de pequeño tamaño es favorable para el proceso de digestión), **virutas de madera** y **material inorgánico** (materiales poliméricos, arena, vidrio, metales, plástico...). Estas sustancias pueden ocasionar fallos en el proceso de digestión, tales como: separación de fases, sedimentación, flotación...

3.3. MANEJO PRÁCTICO: CONTROL OPERACIONAL Y CAMBIO DE SUSTRATO.

3.3.1. FASES DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN UNA EXPLOTACIÓN DE VACUNO.

La producción de biogás en una explotación ganadera (Figura 17) se compone de las siguientes fases:

- En primer lugar se **recogerán los sustratos:** el purín se transportará por gravedad y los restos de alimentos y productos agrícolas serán transportados a la planta por el tractor de la explotación.
- Se conducirá por canalización inclinada (por gravedad), prevista de una malla en la entrada para tamizar, con el fin de **retener los sólidos** mal digeridos por las vacas o material de cama que se pueda colar. Estos residuos **no** son **metanizables**, por lo que no afecta al rendimiento energético.

- Se almacenará en una **fosa de homogenización y trituración previa**. Funcionará intermitentemente el sistema de homogenización y trituración, y de esta fosa se alimentará el **digestor anaeróbico** por tuberías de acero inoxidable y amplio diámetro para evitar atascos.
- El residuo líquido será **sometido a calor**, en este caso gracias a una caldera de gasoil al principio. De este modo el digestato se calentará a 40° aproximadamente, de modo que será el ambiente ideal para los microorganismos fermentadores.
- En el digestor se producirá el biogás debido a la transformación por metanogénesis que realizan unas bacterias específicas. También se obtendrá un efluente con una **carga de N mayor** al contenido inicial, y con una composición adecuada para su uso como fertilizante o abono.
- El biogás se extraerá mediante bomba, y será conducido por tuberías de acero inoxidable a un **gasómetro**, intercalando antes unos filtros para eliminar humedad y absorber el ácido sulfhídrico.
- Al biogás se le eliminará el vapor de agua en un **pozo de condensados** ya que la presencia de este y del ácido sulfhídrico son indeseables.
- El biogás sufrirá un proceso de **lavado y secado**.
- Es muy importante que se realice una **análisis de la composición del biogás**: CH₄, SH₂, O₂, CO₂... de modo que se mejore la eficiencia y capacidad de funcionamiento.
- El biogás almacenado será conducido hasta el equipo de cogeneración donde un generador se encarga de la producción de **energía eléctrica**.
- La electricidad se aprovechará en la granja, en la planta de transformación de biomasa, en el resto de las instalaciones y se cederá a la compañía suministradora.

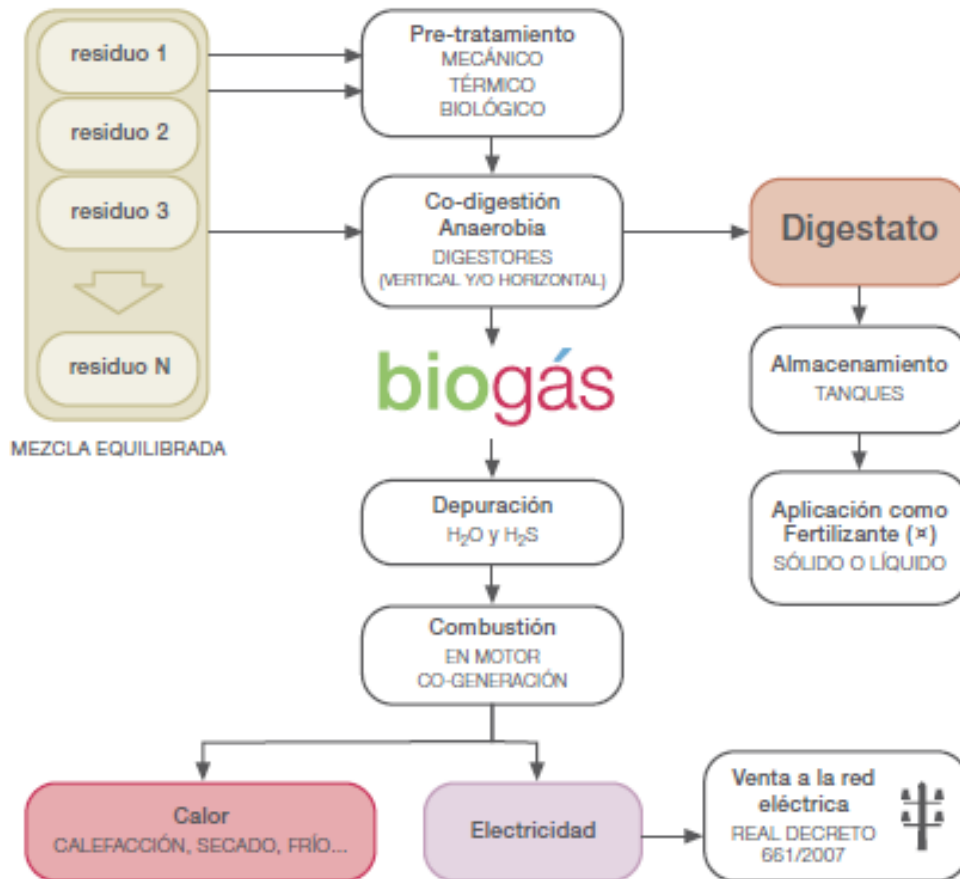


Figura 17. Esquema de la producción de Biogás en una explotación ganadera. Fuente: AINIA (2007).

3.3.2. CODIGESTIÓN

La codigestión es la digestión conjunta de sustratos diferentes que tiene varios objetivos como son: aprovechar la complementariedad de las composiciones, compartir instalaciones, amortiguar variaciones de composición y producción, así como reducir los costes de inversión y de la explotación.

La ventaja principal de la co-digestión radica en el aprovechamiento de la **sinergia de las mezclas**, compensando las carencias de cada uno de los sustratos, aunque también son conocidas otras **ventajas** como (Braun y col., 2001 y Ramón y col., 2001):

- Mejora el balance de nutrientes para una digestión óptima y una buena calidad de fertilizantes.
- Homogeneización de las partículas, flotación o sedimentación de desechos a través de la mezcla de estiércol de animales.
- Incrementar la producción de biogás.

- Producción de mayores ingresos gracias a la entrada de tratamientos de residuos.
- Obtención de un fertilizante adicional.
- Favorece el desequilibrio de pH y la inhibición de la digestión anaerobia por la presencia de purín en el digestor.

La codigestión de residuos orgánicos es exitosa en régimen termófilo y mesófilo. Se han conseguido muy buenos resultados mezclando purines con restos de mataderos e industrias cárnicas, gracias a su riqueza en ácidos grasos, mejorando así la producción de metano. También, estudios recientes afirman que es muy eficiente la codigestión de purines con ensilado de maíz, mejorando de forma relevante la producción de metano.

Sin embargo, la codigestión de diferentes sustratos puede generar **problemas de digestión**, como deficiencia de nutrientes necesarios para el desarrollo de microorganismos anaerobios, baja alcalinidad o excesivo contenido en sólidos que provoquen problemas mecánicos (IDAE, 2007). Los **residuos ganaderos** pueden ser una buena base para la co-digestión ya que, generalmente, presentan un contenido en agua elevado, una alta capacidad tampón y aportan una amplia variedad de nutrientes necesarios para el crecimiento de microorganismos anaerobios.

3.3.3. CAMBIO DE SUSTRATO

El cambio de alimentación de un digestor en funcionamiento es una circunstancia que puede darse con relativa frecuencia en la práctica. Es habitual que los digestores anaerobios no sean alimentados con la misma mezcla durante todo el periodo anual, sino que alternativamente son alimentados con residuos estacionales, por ejemplo, los provenientes de la industria agroalimentaria (Angelidaki y col., 2003). En estos cambios de alimentación, si el nuevo sustrato posee características muy diferentes al anteriormente utilizado, el digestor vuelve a sufrir un nuevo **proceso de “arranque”** o adaptación de las bacterias al nuevo sustrato, de forma que la producción de biogás se verá temporalmente afectada. Hay que considerar que la alimentación del digestor puede asemejarse a la de una vaca, es decir, hay que realizar los cambios de sustrato de forma gradual, aportarle energía (en el caso del digestor materia orgánica) y no sustancias tóxicas.

Ante un arranque o cambio de sustrato en el proceso de digestión anaerobia, existen dos **estrategias de adaptación** para que los microorganismos puedan amoldarse al cambio de sustrato:

-Adaptación gradual al sustrato: consiste en mezclar el nuevo sustrato con el antiguo o el inóculo utilizado, incrementando gradualmente la proporción del nuevo sustrato en la mezcla hasta llegar al 100%.

-Feedless: interrupción de la alimentación del reactor durante un periodo previo al cambio de sustrato. Se esperan así cambios en la estructura de la población microbológica, de modo que sobrevivan sólo las bacterias más resistentes y eficaces en la degradación de la materia orgánica.

3.3.4. PRE Y POST TRATAMIENTO

El **pre-tratamiento** consiste en la separación de partículas pero es un proceso poco común (Kaparaju y col., 2003).

El **pos-tratamiento** es un proceso que consiste en la separación sólido-líquido o por tamaño de partículas. Una vez que se separan las dos fases obtenemos agua y el digestato (sólido); para su posterior uso hay que tener en cuenta la legislación en materia de vertidos y composiciones de los efluentes del proceso (IDAE, 2007). Muchas veces no se puede utilizar el subproducto resultante tal y como sale del digestor, por lo que se han de aplicar una serie de tratamientos. Las partículas mayores de 2 mm (de menor digestibilidad) pueden ser sometidas a tratamientos que mejoran su digestibilidad: maceración, congelación-descongelación, aplicación de calor, tratamiento químico, aireación...

Kaparaju y Rintala (2006) estudiaron la posible optimización del metano y nitrógeno cuando se produce una separación sólido-líquido del digestato y llegaron a la conclusión de que el potencial metanogénico es igual en la fracción sólida y líquida. Cuando el material se acumula en un tanque de almacén, el potencial metanogénico se concentra en la fracción sólida. Del mismo modo, el contenido de N se distribuye homogéneamente entre la fracción sólida y líquida del digestato. Según Möller y Müller (2012) la separación sólido-líquida permite reducir las pérdidas de nitrógeno de la fase líquida y además controlar mejor la concentración de nutrientes del digestato.

4. GESTIÓN DEL DIGESTATO

4.1. DEFINICIÓN DIGESTATO

Digestato procede de la palabra inglesa “*digestate*” y es el material residual resultante de la digestión anaerobia.

Además de generar biogás, la fermentación anaerobia produce un residuo biodegradable cuya **composición** consta de: agua, materia orgánica parcialmente degradada junto con la biomasa microbiana y materia inorgánica (Bernal y col., 2011).

El digestato es un residuo semilíquido que puede sufrir una **separación sólido-líquido**. El manejo de la fracción sólida del digestato (más de un 15% de materia seca) es como el del estiércol sólido, mientras que la fracción líquida, puede sufrir un proceso de reciclado y reutilizado o ser almacenado para su uso agrícola (Bernal y col., 2011 y Makádi y col., 2010).

Según *Botero y Thomas* (1987) la **calidad del digestato** varía en función de varios factores entre los cuales está la cantidad de **sólidos sedimentables totales** (ST), ya que estos son el sustrato del que se alimentan los microorganismos encargados de la fermentación, por lo que una gran cantidad de sólidos totales implica una alta cantidad de nutrientes en el digestato.

4.2. VALORACIÓN DEL DIGESTATO Y CRITERIOS EXIGIBLES DE CALIDAD

El **valor fertilizante del digestato** debe evaluarse no sólo respecto a su concentración total, sino también a su disponibilidad para las plantas, que incluye los procesos de transformación que se producen en el suelo, como mineralización y nitrificación del nitrógeno, o fijación del fósforo. Las características de la materia orgánica condicionan los procesos de su degradación biológica y de humidificación del suelo; así la presencia de altos contenidos de compuestos fácilmente degradables, como ácidos grasos volátiles, les confiere una escasa estabilidad microbiológica, con la emisión de grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera tras su adición al suelo. Además, ciertas sustancias o compuestos intermedios de la degradación, pueden resultar tóxicos para las plantas, lo que precisará de una estabilización previa a su adición al suelo (Bernal y col., 2011).

Desde el punto de vista de la **valorización agrícola de los materiales digeridos**, las características químicas y biológicas que presentan un mayor interés y que por tanto definen su calidad son:

4.2.1. CONTENIDO EN MATERIA ORGÁNICA Y EN NUTRIENTES

El **valor fertilizante** más evidente que presenta el digestato se debe a la presencia de **N-NH₄**, además de este nutriente, también son destacables los contenidos de **fósforo** y **potasio**.

El método ideal de aprovechamiento agrícola de los residuos de la digestión anaerobia es definir programas de fertilización acordes con las necesidades del cultivo, teniendo en cuenta el aporte de nutrientes que realiza el digestato. Junto al contenido en elementos minerales, también cabe destacar el contenido en materia orgánica que presentan los residuos de la digestión anaerobia, lo que favorece su valoración como enmiendas del suelo.

La **composición del digestato** procedente del purín varía en función de diversos factores, entre los cuales podemos apreciar: especie animal, alimentación, aptitud, tipo de planta, estrategia operacional de la planta... pero en la tabla 8 se refleja un ejemplo de la composición del digestato y en la tabla 9 otro de la de su fracción sólida a partir de purín de vacuno.

Tabla 8. Composición del digestato de vacuno. Chadwick (2007) y Smith y col. (2007).

CARACTERÍSTICAS DEL DIGESTATO A PARTIR DE PURÍN DE VACUNO	
MS (%)	7,4
pH	8,0
N (g/kg MF)	3,9
N-NH₄ (g/kg MF)	1,5
P₂O₅ (g/kg MF)	1,4
K₂O (g/kg MF)	5,1

Tabla 9. Composición del digestato sólido de vacuno. Fuente: Sánchez y col. (2008)

CARACTERÍSTICAS DEL DIGESTATO SÓLIDO A PARTIR DE PURÍN DE VACUNO	
pH	7,5
Sales (g/IMF)	CE: 2,0 dS/m
MO (%)	72,2
N (% MS)	2,4
P₂O₅ (% MS)	3,4
K₂O (% MS)	4,4
CaO (% MS)	3,7
MgO (% MS)	1,3

El digestato sólido presenta un mayor **valor económico** ya que la concentración de nitrógeno y fósforo es mayor y además, el coste para expandir el digestato en el campo se reduce. Para valorar económicamente un fertilizante se deben tener en cuenta factores como: maquinaria, trabajo, combustible, concentración de nutrientes... (Rodhe y col, 2006).

En cuanto a las principales características del digestato como fertilizante cabe destacar que aporta una importante cantidad de **nitrógeno** en forma amónica, que se oxida rápidamente a nitrato en el suelo, siendo esta forma directamente asimilable por los cultivos, además, se puede volatilizar con mucha facilidad, de modo que, es interesante la inyección del digestato en el suelo a 5-7 cm (Alburquerque y col, 2011; Bernal y col, 2011; Makádi y col, 2010). Además, otro aspecto importante a considerar es la riqueza del digestato en **fósforo**, principalmente cuando proviene de la gestión anaerobia de estiércoles y purines, cuyo exceso puede acumularse en el suelo en formas asimilables. Ello indica la necesidad de realizar además un balance, según la concentración de fósforo y el requerimiento del cultivo, a fin de evitar acumulaciones excesivas en el suelo que puedan suponer un riesgo de contaminación (Rodhe y col, 2006).

4.2.2. ESTABILIDAD Y MADUREZ

La **estabilidad microbiana** está asociada a la presencia de compuestos fácilmente degradables que provocan una rápida activación de las poblaciones microbianas, mientras que **la madurez** se refleja por la ausencia de efectos fitotóxicos. Los diversos **parámetros** utilizados para la medición de la madurez y estabilidad son: físicos (por ejemplo el olor), identificación de constituyentes fácilmente biodegradables (presencia de ácidos orgánicos, azúcares sencillos...) estudios respirométricos (O₂ consumido o CO₂ desprendido), químicos (pH, relación C/N, DQO...) y biológicos (estudios de fitotoxicidad o ensayos de crecimiento) (Calderón y col., 2011).

Durante la digestión anaerobia, la **fracción fácilmente disponible** de la materia orgánica para los microorganismos es **degradada**, lo que conlleva a un incremento de la estabilidad del material digerido respecto al residuo original. Así, se han referenciado reducciones en el contenido de materia orgánica de entre el **50 y el 70 %** tras procesos de digestión anaerobia aplicados a diversos sustratos orgánicos (Chadwick, 2007; Gómez y col., 2007; Schievano y col., 2008), lo que conlleva directamente a importantes **reducciones** en parámetros como **DQO o DBO**, indicando una mayor estabilidad del digestato. Si el proceso anaerobio no agota en su totalidad dicha materia orgánica fácilmente degradable, se obtienen materiales finales inestables, que pueden provocar efectos negativos sobre el sistema suelo-planta. Se genera una rápida activación microbiana que desencadena la liberación de CO₂, inmovilización microbiana de nitrógeno, desnitrificación y producción de compuestos fitotóxicos, generando de este modo: inhibición de la germinación de las plantas, muerte de las mismas, reducción del crecimiento... (Alburquerque y col., 2012)

4.2.3. NIVEL DE HIGIENIZACIÓN

Desde el punto de vista higiénico-sanitario, los requerimientos que un material digerido debe cumplir son muy estrictos de acuerdo a la legislación Europea (Reglamento CE 1069/2009 y 208/2006), por el que se establecen las normas sanitarias aplicadas a subproductos animales no destinados al consumo humano.

En España, el **Real Decreto 824/2005** sobre productos fertilizantes especifica:

- a) La materia prima transformada, lista para ser usada como ingrediente de abonos orgánicos de origen animal, debe ser sometida a un **proceso de higienización** que garantice que su carga microbiana no supere los valores máximos establecidos en el Reglamento CE 1774/2002.
- b) En los productos fertilizantes de origen orgánico se acreditará que no superen los siguientes **niveles máximos de microorganismos**: Salmonella (ausente en 25 g de producto elaborado) y Escherichia coli (< 1000 número más probable por gramo de producto elaborado).

En el caso concreto de materiales digeridos, dependiendo del origen de las materias primas y de su carga contaminante, un adecuado control del proceso anaerobio de acuerdo a la normativa permite obtener productos perfectamente higienizados. En el caso contrario, es necesaria la aplicación de tratamientos adicionales.

4.2.4. PRESENCIA DE PRODUCTOS TÓXICOS E IMPUREZAS

Existen criterios de concentración de metales pesados en productos destinados a un uso agrícola que determinan su clase (Tabla 10) y sus limitaciones para su aplicación en el suelo. Además, los materiales digeridos pueden contener productos tóxicos de naturaleza orgánica tales como residuos de plaguicidas, PCBs, PAHs, etc (Quipuzco y col., 2011 y Bernal y col., 2011).

Tabla 10. Concentraciones máximas de metales pesados en productos destinados a agricultura (mg/kg MS).

CLASE	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn	Hg	Referencia
1	100	0,7	100	100	50	200	0,5	Comisión Europea 2001
2	150	1,5	150	150	75	400	1,0	
A	45	0,7	70	70	85	200	0,4	RD 824/2005
B	150	2,0	250	300	90	500	1,5	Sólidos (mg/kg MS)
C	200	3,0	300	400	100	1000	2,5	Líquidos (mg/kg MF)

La presencia en el digestato de **otros contaminantes** en forma de impurezas en estado físico (plástico, vidrio, metales, etc.) también está regulada, estableciéndose como criterio de calidad y limitando su contenido máximo (CE,2001; RD 824/2005). Una correcta separación en origen, evita la presencia de estas impurezas en los materiales digeridos.

4.3. APLICACIÓN A TIERRAS DE CULTIVO

En cuanto a la gestión de los residuos de una planta de biogás, el **Plan de Biodigestión de Purines** (Real Decreto 294/2009) indica la necesidad de que el beneficiario se comprometa a la gestión del digestato cumpliendo con el **código de buenas prácticas agrícolas** (RD 261/1996), así como la conveniencia de disponer en las plantas de sistemas de tratamiento del digestato que mejoren la gestión del nitrógeno.

Así, el destino fundamental del material digerido debe dirigirse a su **uso agrícola**, ya sea directamente o tras ser sometido a un proceso de **separación sólido-líquido**, lo que favorece el compostaje de la fracción sólida. Sin embargo, el uso inadecuado del fertilizante o la aplicación a dosis excesivas, puede suponer un riesgo de contaminación del ecosistema, incidiendo negativamente en el suelo, el agua y las plantas. De ahí que exista una legislación específica para evitar riesgos medioambientales, como la contaminación por nitratos (Directiva 91/676/CE), por metales pesados (Directiva 86/278/CE), o patógenos (Reglamento CE 1774/2002 modificado por Reglamento 1069/2009).

4.3.1. VENTAJAS DE LA FERTILIZACIÓN CON DIGESTATO

La fertilización con **digestato** frente a la aplicación directa de purín sin tratar tiene una serie de **ventajas** (Soria y col., 2001):

- El digestato posee un menor volumen y es un compuesto mucho más concentrado.
- La materia orgánica se encuentra estabilizada.
- El nitrógeno y el fósforo se encuentran mineralizados, de este modo están más disponibles para los cultivos.
- El producto es más homogéneo, y así la aplicación es mucho más sencilla.
- Ausencia o presencia mínima de bacterias patógenas.
- Carece de olor.

4.3.2. TIPOS DE CULTIVO Y FUNDAMENTOS DE LA FERTILIZACIÓN

Una forma de abaratar los costes de la nutrición en una explotación es cultivar los propios forrajes y conservarlos, esto se lleva a cabo gracias al ensilado. En la Finca Mouriscade se siembran **25 Ha de hierba** que se cortará en Mayo para ensilar. Posteriormente, al final de mayo, se sembrarán **18 Ha de maíz** que se cortará en estado lechoso – pastoso para ensilar del mismo modo, a excepción de ciertas parcelas (6 Ha) en

las que se realizará un segundo corte de la hierba para producir **heno**. En una parcela (1 Ha) de forma excepcional se ha cultivado una mezcla de **sorgo y girasol** también para ensilar. Dada la construcción de esta planta de biogás y la consecuente producción de digestato en ella a partir de purín de vacuno y restos de la ración, se utilizará éste para fertilizar las parcelas.

El oxígeno, carbono e hidrógeno constituye alrededor del 95% del peso seco de las plantas. Estos elementos son tomados del aire y del agua. El 5% restante incluye elementos tomados necesariamente del suelo. Entre ellos tienen gran relevancia elementos como el nitrógeno, fósforo y potasio, que son conocidos como macronutrientes. La fertilización debe, por tanto, aportar los nutrientes necesarios para promover el correcto crecimiento y desarrollo de las plantas (Urbano, 1999).

Lo primero que hay que tener en cuenta son las disposiciones de las Comunidades Autónomas plasmadas en los **Códigos de Buenas Prácticas Agrarias y sus Planes de Actuación** para aquellas que han declarado zonas vulnerables a la contaminación de las aguas por nitratos. Como norma general, cuando se apliquen fertilizantes orgánicos en dichas zonas no se deben superar los **170 kg de N/ha** y año (Directiva 91/676/CE; Real Decreto 261/1996).

Deben considerarse tres reglas principales a la hora de establecer la fertilización de los distintos cultivos:

- **Ley de restitución.** Enunciada por Boussignault y Deherain en el siglo XIX, indica que "si se quiere mantener la fertilidad de un suelo, es indispensable devolverle todos los elementos nutritivos que extrae la cosecha o que pueden perderse por cualquier otra causa". Esta ley asume una situación estática de los suelos que suele darse en los cultivos ya establecidos, y que suele utilizarse como balance de masas en el cálculo de la fertilización, como veremos posteriormente.
- **Ley de mínimo o de factores limitantes.** Establecida por Liebig en el siglo XIX, indica que el rendimiento de las cosechas viene limitado especialmente por el elemento nutritivo que se encuentra en menor cantidad con respecto a la necesidad del cultivo.
- **Ley de los rendimientos decrecientes.** Establecida por Mitscherlich a principios del siglo XX, indica que a medida que se incrementan los elementos fertilizantes en el suelo, el incremento del

rendimiento es cada vez menor, de forma que se alcanza un máximo de rendimiento que no se superará aunque se incremente la fertilización.

El **cálculo de las cantidades de fertilizante** (digestato) a aplicar se basa en un balance de masas de acuerdo con la ley de la restitución, según la cual el principal flujo de nutrientes corresponde a la extracción por el cultivo y debe ser compensado por la fertilización. Para ello se siguen los siguientes pasos (Urbano, 1999):

- a)** Cálculo de **las cantidades extraídas por el cultivo** de cada nutriente, que puede calcularse a partir del rendimiento en masa del cultivo (t/ha) y el contenido en dicho nutriente de la cosecha, según la ecuación:

Maíz:

$$N_{\text{extraído}} \left(\frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \right) = \text{Rendimiento} \left(\frac{\text{t cosecha}}{\text{ha}} \right) \times N \text{ cosecha} \left(\frac{\text{kg}}{\text{t}} \right) = 65 \times 2,1 = 136,5 \left(\frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \right)$$

$$P_{\text{extraído}} \left(\frac{\text{kg P}_2\text{O}_5}{\text{ha}} \right) = \text{Rendimiento} \left(\frac{\text{kg cosecha}}{\text{ha}} \right) \times P_2\text{O}_5 \text{ cosecha} \left(\frac{\text{kg}}{\text{t}} \right) = 65 \times 1,3 = 84,5 \left(\frac{\text{kg P}_2\text{O}_5}{\text{ha}} \right)$$

$$K_{\text{extraído}} \left(\frac{\text{kg K}_2\text{O}}{\text{ha}} \right) = \text{Rendimiento} \left(\frac{\text{kg cosecha}}{\text{ha}} \right) \times K_2\text{O cosecha} \left(\frac{\text{kg}}{\text{t}} \right) = 65 \times 2,75 = 178,8 \left(\frac{\text{kg K}_2\text{O}}{\text{ha}} \right)$$

Hierba:

$$N_{\text{extraído}} \left(\frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \right) = \text{Rendimiento} \left(\frac{\text{t cosecha}}{\text{ha}} \right) \times N \text{ cosecha} \left(\frac{\text{kg}}{\text{t}} \right) = 32,5 \times 2,2 = 71,5 \left(\frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \right)$$

$$P_{\text{extraído}} \left(\frac{\text{kg P}_2\text{O}_5}{\text{ha}} \right) = \text{Rendimiento} \left(\frac{\text{kg cosecha}}{\text{ha}} \right) \times P_2\text{O}_5 \text{ cosecha} \left(\frac{\text{kg}}{\text{t}} \right) = 32,5 \times 1,1 = 35,7 \left(\frac{\text{kg P}_2\text{O}_5}{\text{ha}} \right)$$

$$K_{\text{extraído}} \left(\frac{\text{kg K}_2\text{O}}{\text{ha}} \right) = \text{Rendimiento} \left(\frac{\text{kg cosecha}}{\text{ha}} \right) \times K_2\text{O cosecha} \left(\frac{\text{kg}}{\text{t}} \right) = 32,5 \times 2,75 = 89,4 \left(\frac{\text{kg K}_2\text{O}}{\text{ha}} \right)$$

- b)** Análisis de **contenido en nitrógeno del digestato**. En el caso del digestato, la mayor parte del nitrógeno se encuentra mineralizado en forma de amonio, y por tanto puede considerarse como un fertilizante de absorción rápida. Para abonos con mayor contenido de nitrógeno orgánico, el potencial fertilizante es menor, dado que deben producirse las reacciones de mineralización (paso de N orgánico a inorgánico) para que pueda ser absorbido por las plantas.

- c)** Cálculo de **dosis a aplicar**:

Maíz:

$$\text{Dosis según N} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{ha}} \right) = \frac{N_{\text{extraído}} \left(\frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \right)}{N_{\text{digestato}} \left(\frac{\text{kg N}}{\text{m}^3} \right)} = \frac{136,5}{N_{\text{digestato}}}$$

$$\text{Dosis según P} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{ha}} \right) = \frac{P_{2\text{O}_5\text{extraído}} \left(\frac{\text{kg P}_{2\text{O}_5}}{\text{ha}} \right)}{P_{2\text{O}_5\text{digestato}} \left(\frac{\text{kg P}_{2\text{O}_5}}{\text{m}^3} \right)} = \frac{84,5}{P_{2\text{O}_5\text{digestato}}}$$

$$\text{Dosis según K} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{ha}} \right) = \frac{K_{2\text{O}}\text{extraído} \left(\frac{\text{kg K}_{2\text{O}}}{\text{ha}} \right)}{K_{2\text{O}}\text{digestato} \left(\frac{\text{kg K}_{2\text{O}}}{\text{m}^3} \right)} = \frac{178,8}{K_{2\text{O}}\text{digestato}}$$

Hierba:

$$\text{Dosis según N} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{ha}} \right) = \frac{N_{\text{extraído}} \left(\frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \right)}{N_{\text{digestato}} \left(\frac{\text{kg N}}{\text{m}^3} \right)} = \frac{71,5}{N_{\text{digestato}}}$$

$$\text{Dosis según P} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{ha}} \right) = \frac{P_{2\text{O}_5\text{extraído}} \left(\frac{\text{kg P}_{2\text{O}_5}}{\text{ha}} \right)}{P_{2\text{O}_5\text{digestato}} \left(\frac{\text{kg P}_{2\text{O}_5}}{\text{m}^3} \right)} = \frac{35,7}{P_{2\text{O}_5\text{digestato}}}$$

$$\text{Dosis según K} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{ha}} \right) = \frac{K_{2\text{O}}\text{extraído} \left(\frac{\text{kg K}_{2\text{O}}}{\text{ha}} \right)}{K_{2\text{O}}\text{digestato} \left(\frac{\text{kg K}_{2\text{O}}}{\text{m}^3} \right)} = \frac{89,4}{K_{2\text{O}}\text{digestato}}$$

En cuanto a la realización de estos cálculos, el macronutriente extraído es el calculado anteriormente y dado que la composición del digestato es muy variable, es recomendable el **análisis químico** del mismo para completar los cálculos de la dosis a aplicar.

De forma preliminar, considerando los valores promedio de composición de digestato, puede preverse una dosis de unos **45 m³/ha para el maíz** y unos **25 m³/ha para la hierba**. Atendiendo a las superficies de cada cultivo, puede estimarse que la cantidad de digestato a aplicar en la parcela es de entorno a 1500 m³ al año. Sin embargo, será necesario concretar con datos productivos de los cultivos y composición del digestato para ajustar las correspondientes dosis de fertilización.

4.3.3. RECOMENDACIONES EN LA APLICACIÓN DEL DIGESTATO A CAMPO

Según Müller y Möller (2012) es recomendable seguir ciertas recomendaciones a la hora de cuando y como aplicar el digestato en campo dependiendo de las características del mismo y del tipo de plantas. Según Rodhe y col. (2006) existen dos tipos de plantas en función de la reacción al tratamiento con digestato:

- **Sensibles:** entre ellas se encuentran la alfalfa, la soja, el girasol...este tipo de plantas solo pueden ser tratadas con digestato en ciertos estados de su vida.
- **No sensibles:** trigo de invierno, tricale, maíz dulce, ensilado de maíz... en este tipo de plantas el digestato puede ser usado en cualquier estado de desarrollo.

Es recomendable **el fraccionamiento de las aplicaciones:** el fraccionamiento de la dosis total en dosis más pequeñas permite efectuar las aportaciones en momentos en que las necesidades en elementos nutritivos del cultivo son mayores. Con ello se reduce el riesgo de lavado de nitratos (también se reduce abonando en momentos de pocas lluvias) y, en consecuencia, el impacto negativo sobre las aguas por una menor salida de nutrientes hacia ellas. Se debe aplicar el digestato previamente a la siembra y ajustando la fertilización mediante aportes puntuales de fertilizantes minerales. La aplicación del digestato no es recomendable que se realice sobre la planta joven, ya que podría dar problemas de fitotoxicidad.

Cuando el digestato sólido esté fresco o poco estabilizado deberá aplicarse con suficiente **antelación a la fecha de siembra**, trasplante o plantación del cultivo, siendo necesario un periodo de antelación de al menos 3-4 semanas en verano y de 4-6 semanas en invierno (Beranal y col., 2011). En cuanto al momento óptimo de aplicación del digestato, varía mucho en función del autor, Stinner y col. (2008) afirma que se debe aplicar en invierno y primavera, de forma similar, Wulf y col. (2006) usa el 70% del digestato en primavera y el 30% en otoño. Otros autores como Makádi y col. (2008) dividen la aplicación en 2 o 3 veces en función del estado de vegetación de las plantas.

Según Pfundner y col. (2002), se pueden seguir ciertas pautas con el digestato para **disminuir las emisiones gaseosas** cuando se aplica a campo, algunas de ellas son:

- Aplicar el digestato en condiciones climáticas adecuadas, con alta humedad, baja temperatura y sin viento.
- Inyectar el digestato con inyectores de arrastre, con lo cual se reducen las pérdidas de amoníaco por encima del 95%.
- Dificultar el proceso de volatilización del amoníaco, disminuyendo el pH del digestato mediante la adición de un ácido.

4.3.4. DIFERENCIAS ENTRE EL SUSTRATO DE ORIGEN Y EL DIGESTATO

El **nitrógeno total** aumenta en el digestato debido a la degradación del carbono a CO₂ y CH₄ y a la preservación del mismo durante la digestión anaerobia. El NH₄ del digestato corresponde al 60-80 % del nitrógeno total, esto permite la inmediata utilización por parte de los cultivos al transformarse directamente en nitrato (aunque se puede volatilizar debido al pH elevado), (Makádi y col., 2011).

Ya que la cantidad de **k** en digestato es muy elevada y la utilización del **P** también (casi del 100%), en ocasiones es necesario complementar el uso de digestato con otro abono mineral para evitar la acumulación de estos minerales en el suelo (Makádi y col., 2011).

En cuanto a la concentración de **materia orgánica** en el digestato, es mucho menor que en el sustrato de origen, autores como Menardo y col. (2001) encuentran la reducción de la misma de entre el 11,1% y el 38,4% mientras que Marcato y col. (2008) la sitúa en un 53%. Además, la estabilidad de la materia orgánica restante es mayor debido a moléculas recalcitrantes como lignina, cutina, ácidos húmicos, esteroides y complejos proteicos. Estas moléculas alifáticas y aromáticas son posibles precursores del humus con alta estabilidad biológica (Tambone y col., 2009).

Tabla 11. Diferencias generales entre el sustrato de origen y el digestato (Makádi y col., 2011).

DIFERENCIAS GENERALES ENTRE EL SUSTRATO DE ORIGEN Y EL DIGESTATO		
PARÁMETRO	SUSTRATO	DIGESTATO
pH	↓ (en torno a 7)	↑ (en torno a 8)
N total		↑
NH ₄	↓	↑
P y K	↑	↑
Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn	↑	↓
MO	↑	↓
Ratio C:N	↑	↓
Viscosidad	↑	↓

4.3.5. EFECTO DEL DIGESTATO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL SUELO

Diversos autores se dedican a indagar sobre el efecto de la fertilización con residuos de la digestión anaerobia (**Tabla 12**) sobre diversos factores como el pH, la materia orgánica, los nutrientes...

Odlare y col. (2008) afirma que no encuentra diferencias significativas entre el **pH** de un campo fertilizado con residuos de biogás durante cuatro años y un campo control, ya que a pesar del pH básico del digestato, este contiene ciertos ácidos como el ácido gálico.

En cuanto al efecto del digestato en los **macronutrientes del suelo**, se ha apreciado un incremento del contenido de N mineral en el suelo cuando se aplica el digestato en primavera, en cambio, cuando se aplica en otoño, en cultivos de cobertura, se compensa la elevada aplicación del mismo. De modo que de forma general, el digestato no produce cambios significativos en la cantidad de **N** total y **P** en el suelo, en cambio, se **incrementa** el contenido de **k** en el mismo.

Vágó y col., (2005) afirma que la concentración de **microelementos** del suelo a penas se ve modificada por la adición de digestato al mismo, a excepción del **Mg** que incrementa en un 40% y de la reducción del **Zn** debido a la formación de complejos con el P.

En cuanto a la concentración de **materia orgánica** en el suelo, esta se ve mermada, en el momento de la aplicación del digestato. Se produce un fuerte incremento de **AGV** que se descomponen en pocos

días, pero el ratio de mineralización es alto durante los primeros 30 días (Makádi y col., 2011).

La comunidad microbiológica del suelo es un indicador sensible de los cambios de las propiedades físico-químicas del mismo. El digestato es el mejor fertilizante para promover la **actividad microbiológica** del suelo (Makádi et al, 2011).

Tabla 12. Efecto del digestato sobre las propiedades del suelo (Makádi y col., 2011).

EFFECTO DEL DIGESTATO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL SUELO	
Ph	No se modifica
Macronutrientes	N y P igual, ↑ k
Micronutrientes	Zn ↓, Mg ↑ y el resto igual
Materia orgánica	↓
Actividad microbiológica	↑

5. BIBLIOGRAFÍA

AINIA. Biogás.

Alburquerque, J.A., Fuente, C., Ferrer-Costa, A., Carrasco, L., Cegarra, J., Abad, M., Bernal, M.P., 2012. Assessment of the fertilizer potential of digestates from farm and agroindustrial residues. *Biomass and Bioenergy* 40, 181-189.

Angelidaki, I., Ellegaard, L., 2003. Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants. Status and Future trends. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 109 (1-3), 95-105.

Bernal, M.P., Alburquerque, J.A., Bustamante, M.A. and Clemente, R., 2011. Guía de Utilización Agrícola de Materiales Digeridos por Biometanización. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura, Consejo superior de Investigaciones Científicas. 1-103.

Botero, B.M., Thomas, R. P., 1987. Biodigestor de Bajo Coste para la Producción de Combustible y Fertilizante a Partir de Excretas. Manual para su instalación, operación y utilización. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia. 353-362.

Braun, R., Wellinger, A., 2011. Potencial of Co-digestion. IEA: Bioenergy. Task 37: Energy from Biogas and Landfill Gas. 4-15.

Chadwick, D., 2007. Digestate as a fertiliser-Environmental concerns. In: Anaerobic Digestion Stakeholder Workshop. Session IV: Building the Market for Digestate. 4th September 2007. Exeter University, UK.
http://www.biogas.org.nz/Publications/Resources/Biogas-Digestate-Factsheet_Renquist-Heubeck.pdf

Cheng, Y., Cheng, J.J., Creamer, K.S., 2007. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology* 99, 4044-4064.

Comisión Europea, 2001. Working document on biological treatment of biowaste, 2nd draft. Bruselas, 12 de febrero de 2001.
<http://www.compost.it/biod.pdf>

Directiva 86/278/CE del consejo de 12 de junio de 1986 relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura. DOEU L181, 6-12.

Directiva 91/676/CE del consejo de 12 de diciembre de 1991, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en agricultura. DOUE L375, 1-8.

Fischer, T., Krieg, A., Chae, K.J., Yim, S.K., Choi, K.H., Park, W.K., Eom, K.C., 2002. Farm-scale Biogas Plant. *J. Korean Org. Waste*.

Flotats, X., Campos, E., Bonmarti, A., 1997. Aprovechamiento Energético de Residuos Ganaderos. Departamento de Medio Ambiente y Ciencias. 27-29 de Octubre 1997. Universidad de Lleida, España.

Guía IDEA, 2007. Biomasa y digestión anaerobia.

Hanaki, k., Tomoroni, M., Nagase, M., 1981. Mechanism of inhibition caused by long-chain fatty acids in anaerobic digestion process. *Biotechnology and bioengineering* 23 (7), 1591-1610.

Iglesias, M., Blanco, D., Álvarez, J.L., 2012. Valorización de residuos en el entorno rural: Planta Piloto de producción de Biogás en explotación Ganadera. Congreso nacional de medio ambiente. <http://www.conama2012.conama.org/web/generico.php?idpaginas=&lang=es&menu=257&id=97&op=view>

Kaparaju, P., 2003. Enhancing Methane Production in a Farm-scale Biogas Production System. *JYVÄSKYLÄ Studies in Biological and Environmental Science* 124,1-90.

<https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/13156/951391710X.pdf?sequence=1>

Kaparaju, P.L.N., Rintala, J.A., 2008. Effects of solid-liquid separation on recovering residual methane and nitrogen from digested dairy cow manure. *Bioresource Technology* 99, 120-127.

Keisuke, H., Tomoroni, M., Michihiko, N., 1981. Mechanism of inhibition caused by long-chain fatty acids in anaerobic digestion process. *Biotechnology and bioengineering* 23, 1591-1610.

<https://energypedia.info/index.php/>

Makádi, M., Tomócsik, A., Orosz, V, 2011. Digestate: A New Nutrient Source-Review. Research Institute of Nyíregyháza, RISF, CAAES, University of Debrecen, Hungary. 14, 295-310.

Makádi, M., Tomócsik, A., Márton, A., 2008. Problems and successess of digestate utilization on crop. *Proceeding of the Internationale Conference ORBIT 2008, Wageningen, 13-18 October, 2008.*

Marcato, C.E., Pinelli, E., Pouech, P., Winterton, P., Guiresse, M., 2008. Particle size and metal distribution in anaerobically digested pig slurry. *Bioresource Technology* 99 (7), 2340-2348.

Martí, N., 2006. Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process. Universal Publisher.

Menardo, S., Gioelli, F., Balsari, P., 2011. The methane yield of digestate: Effects of organic loading rate, hydraulic retention time and plant feeding. *Bioresource Technology* 102 (3), 2348-2351.

Möller, K., Müller, T., 2012. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Eng. Life Sci.* 12 (2), 242-257.

Odlare, M., Pell, M., Svensson, K., 2008. Changes in soil chemical and microbiological properties during 4 years of application of various organic residues. *Waste Management* 28 (7), 1246-1253.

Pedavanj, Z., 2007. Simposio internacional: tecnología del biogás y del medio ambiente. *Tecnología y Medio Ambiente.* 25

Pfundtner, E., 2002. Limits and Merits of Sludge Utilisation – Land Application. European workshop: Impact of Waste Management Legislation on Biogas Technology, Tulln, Austria, September 12-14.

Poggi-valardo, H.M., Tingley, J., Olesziewicz, J.A., 1991. Inhibition of growth and acetate uptake by ammonia in batch anaerobic digestion. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 52 (1), 135-143.

Quipuzco, L., Baldeon, W., Tang, O., 2011. Quality Evaluation of Biogas and Biol from Two Mixtures of Cow's Manure in Tubular Bio-digesters of PVC.

Ramón, J.A., Romero L.F., Simanca, J.L., 2010. Diseño de un Biodigestor de Canecas en Serie para Obtener Gas Metano y Fertilizante a Partir de la Fermentación de Excrementos de Cerdo. Grupo de Investigaciones Ambientales Agua, Aire y Suelo (GIAAS). Programa de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona 1-9.

Real Decreto 824/2005, de 8 de julio, sobre productos fertilizantes. BOE 171, 25592-25669.

Reglamento (CE) nº 1774/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo de 3 de octubre de 2002 por el que se establecen las normas sanitarias aplicables a los subproductos animales no destinados al consumo humano. DOUE L 273, 1-95.

Reglamento (CE) nº 208/2006 de la Comisión de 7 de febrero de 2006 por el que se modifican los anexos VI y VIII del Reglamento (CE) nº 1774/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo, en lo que se refiere a las normas de transformación para las plantas de biogás y compostaje y las condiciones aplicables al estiércol. DOUE L36, 25-31.

Reglamento (CE) nº 1069/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de octubre de 2009 por el que se establecen las normas sanitarias aplicables a los subproductos animales y los productos derivados no destinados al consumo humano y por el que se deroga el Reglamento (CE) nº 1774/2002 (Reglamento sobre los subproductos animales). DOUE L300, 1-33.

Rodhe, L., Salomon, E., Edström, M., 2006. Handling of digestate on farm level. JTI (Institutet för jordbruks-och miljöteknik).

Sánchez, M., Gomez, X., Barricand, G., Cuetos, M.J., Morán, A., 2008. Assessment of the stability of livestock farm wastes treated by anaerobic digestion. *International Biodeterioration and Biodegradation* 62, 421-426.

Schievano, A., D'Imporzano, G., Adani, F., Substituting energy crops with organic wastes and agro-industrial residues for biogas production. *Journal of environmental Management* 90, 2537-2541.

Smith, K.A., Metcalfe, P., Grylls, J., Jeffrey, W., Sinclair, A., 2007. Nutrient value of digestate from farm-based biogas plants in Scotland. Report for Scottish Executive Environment and Rural Affairs Department-ADA/009/06.

<http://www.scotland.gov.uk/Resource/Doc/1057/0053041.pdf>

Soria, M. J., Ferrera, R., Etchevers, J., Alcántar, G., Santos J. T., Bórges, L., Pereyda, G., 2001. Producción de Biofertilizantes Mediante Biodigestión de Excreta Líquida de Cerdo. *TERRA Latinoamericana* 19, 353-362.

Steffen, R., Szolara O., Braun, R., 1998. Feedstocks and Anaerobic Digestion. Institut for Agrobiotechnology Tulh. University of Agricultural Sciences Vienna.

Stinner, W., Möller, K., Leithold, G., 2008. Effect of biogas digestion of clover/grass-ley, cover crops and crop residues on nitrogen cycle and crop yield in organic stockless farming system. *European Journal of Agronomy* 29 (2-3), 125-134.

Tambone, F., Genevini, P., Adani, P., 2007. The effect of short-term compost application on soil chemical properties and on nutritional status of maize plant. *Compost Science & Utilization* 15 (3), 176-183.

USOS DEL BIOGÁS Y LA COGENERACIÓN. Jornada Técnica. Instituto Catalán de Energía (2011)

Vágó, I., Kátai, J., Makádi, M., Balla Kovács, A., 2009. Effects of biogás fermentation residues on the easily soluble macro- and microelement content of soil. Trace elements in the food chain. Vol 3. Deficiency or excess of trace elements in the environment as a risk of health. 252-256. Publ.: Working Committee of Trace Elements and Institute of Materials and Environmental Chemistry of the Hungarian Academy of Sciences, Budapest. Eds.: Szilágyi M, Szentmihályi K.

Wulf, S., Jäger, P., Döhler, H., 2006. Balancing of greenhouse gas emissions and economic efficiency for biogas-production through anaerobic co-fermentation of slurry with organic waste. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 112 (2-3), 178-185.

Yadvika, Santosh, T.R. Sreekrishnan, Sangeeta Kohli, Vineet Rana. Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques: A review. Vol 95, 1:1-10 (2004).

Webseite: <http://www.biodisol.com>

Zapata F. Recuperación y Aprovechamiento Energético de Metano en un Sistema de Codigestión para la Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Máster de Ingeniería Ambiental y de Procesos Químicos y Biotecnológicos. Cartagena, 16 de Abril de 2012.