



Agencia Andaluza de la Energía
CONSEJERÍA DE ECONOMÍA, INNOVACIÓN Y CIENCIA

ESTUDIO BÁSICO DEL BIOGÁS

Septiembre 2011



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. <i>Objetivos y Promoción del Documento.....</i>	7
1.2. <i>Justificación</i>	7
1.3. <i>El proceso de biometanización.....</i>	11
2. ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA	19
2.1. <i>Residuos aprovechables para la producción de biogás.....</i>	19
2.2. <i>Estudio de los pretratamientos existentes</i>	21
2.2.1. <i>Residuos ganaderos.....</i>	23
2.2.2. <i>Residuos de matadero y pesqueros.....</i>	23
2.2.3. <i>Residuos hortofrutícolas</i>	24
2.2.4. <i>Cultivos energéticos</i>	24
2.2.5. <i>Lodos EDAR</i>	24
2.2.6. <i>Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos.....</i>	25
2.3. <i>Técnicas de higienización para materiales que pueden producir contaminación biológica</i>	25
2.4. <i>Reactores. Tipos de reactores existentes.....</i>	26
2.4.1. <i>Reactores sin Retención Interior de Biomasa</i>	27
2.4.2. <i>Reactores con retención de biomasa.....</i>	31
2.4.3. <i>El mercado de digestores anaerobios</i>	36
2.5. <i>Técnicas de codigestión.....</i>	37
2.5.1. <i>Codigestión de Residuos Ganaderos y Agroindustriales.....</i>	39



2.5.2.	Codigestión de residuos ganaderos y residuos de matadero	48
2.5.3.	Codigestión de Residuos ganaderos y residuos pesqueros	49
2.5.4.	Codigestión de residuos ganaderos y residuos de la industria láctea	53
2.5.5.	Codigestión de residuos ganaderos y residuos de la fabricación de biodiésel.....	53
2.5.6.	Codigestión de residuos ganaderos y lodos de tratamiento de aguas residuales.....	54
2.5.7.	Codigestión de residuos ganaderos y FORSU	55
2.5.8.	Codigestión de gallinaza y restos vegetales	55
2.5.9.	Codigestión de lodos de EDAR y FORSU	58
2.5.10.	Plantas industriales con codigestiones óptimas.....	60
2.6.	<i>Técnicas de depuración de biogás.....</i>	68
2.7.	<i>Técnicas de tratamiento del digestato para distintos usos.....</i>	71
2.8.	<i>Técnicas de valorización energética.....</i>	72
2.8.1.	Producción de electricidad y calor.....	73
2.8.2.	Redes de gas.....	78
2.8.3.	Empleo en vehículos	79
2.8.4.	Posibilidades de Almacenamiento.....	80
2.9.	<i>Expectativas en el sector</i>	80
3.	SITUACIÓN ACTUAL DEL BIOGÁS EN EUROPA. MODELO DE NEGOCIO... 81	
3.1.	<i>Generalidades.....</i>	81
3.2.	<i>Situación del Biogás en Alemania.....</i>	87
3.3.	<i>Situación del Biogás en el Reino Unido.....</i>	88
3.4.	<i>Situación del Biogás en Dinamarca.....</i>	91



3.5.	<i>Situación del Biogás en Austria</i>	92
3.6.	<i>Situación del Biogás en Italia</i>	94
3.7.	<i>Situación del Biogás en otros países no europeos</i>	94
4.	SITUACIÓN ACTUAL DEL BIOGÁS EN ESPAÑA	95
4.1.	<i>Marco Legal y retributivo</i>	95
4.1.1.	Planes y políticas que definen las pautas a seguir	95
4.1.2.	Normas de aplicación básicas.....	102
5.	ASPECTOS ECONÓMICOS PARA LA OPERATIVIDAD E INSTALACIÓN DE PLANTAS	106
5.1.	<i>Modelo de negocio</i>	106
5.1.1.	Desarrollo de nuevas plantas	106
5.1.2.	Volatilidad de sustratos: Disponibilidad y coste de sustrato. (residuo, subproducto).	107
5.1.3.	Modelos de negocio.....	108
5.2.	<i>Rentabilidad</i>	110
5.2.1.	Costes de inversión.	111
5.2.2.	Ingresos de explotación (volatilidad de los ingresos).....	113
5.2.3.	Gastos de explotación	115
5.2.4.	Rentabilidad económica	115
5.2.5.	Estudio de planta tipo de 500 kW.....	116
5.3.	<i>Aspectos clave para la rentabilidad</i>	116
5.4.	<i>Generación de Empleo</i>	117
6.	PLANTAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA EXISTENTES EN ANDALUCÍA	118
6.1.	<i>Inventario de Plantas de Digestión Anaerobia en Andalucía</i>	118



7. IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE ELEVADO POTENCIAL PARA LA INSTALACIÓN DE NUEVAS PLANTAS EN ANDALUCÍA	119
7.1. <i>Metodología y condicionantes analizados</i>	119
7.1.1. Información Disponible. Datos de partida	119
7.1.2. Registro IPPC	120
7.1.3. Instalaciones de producción de biodiésel en Andalucía.....	121
7.1.4. Estudio del potencial energético de la biomasa residual	121
7.1.5. Proyecto Probiogás	124
7.2. <i>Determinación de núcleos de elevada potencialidad.....</i>	127
8. PROPUESTA DE NUEVAS PLANTAS	134
8.1. <i>Proposición de nuevas plantas.....</i>	134
9. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO	135

ANEXOS

ANEXO I	BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN CONSULTADAS
ANEXO II	FICHAS DE PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN EUROPA



ABREVIATURAS Y ACRÓNOMOS

A lo largo del documento se han utilizado varias abreviaturas de la terminología utilizada en el sector, utilizadas principalmente en la descripción de los parámetros del proceso, así como de las características de los sustratos utilizados.

<u>ABREVIATURA O ACRÓNIMO</u>	<u>SIGNIFICADO</u>
AD	Digestión Anaerobia (<i>Anaerobic Digestion</i>)
AF	Filtro Anaerobio (<i>Anaerobic Filter</i>)
Alc	Alcalinidad
AS	Lodos anaerobios (<i>Anaerobic Sludge</i>)
CH₄	Metano
CO₂	Dióxido de Carbono
COD	Demanda química de oxígeno (<i>Chemical Oxygen Demand</i>)
CSTR	Reactor de mezcla continua (<i>Continuous Stirred Tank Reactor</i>)
DA	Digestión Anaerobia
DQO	Demanda química de oxígeno
EGSB	Lecho de lodos granulares expandidos (<i>Expanded Granular Sludge Bed Digestion</i>)
GW	Gigawatio
GWh	Gigawatio hora
Kg	Kilogramo
kW	Kilowatio
kWh	Kilowatio hora
m³	Metro cúbico
MO	Materia Orgánica
MW	Megawatio
MWh	Megawatio hora
NKT	Nitrógeno Kjeldahl Total
Nm³	Metro cúbico en condiciones normales (para gases)
N-NH₄⁺	Nitrógeno amoniacal
PL	Gallinaza
PM	Purín de cerdo (<i>Pig Manure</i>)
ST (ó TS)	Sólidos Totales
SV (ó VS)	Sólidos Volátiles
t	Tonelada
TRH	Tiempo de Retención Hidráulica
UASB	Reactor de manta de lodo anaerobio de flujo ascendente (<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>)
VPW	Restos vegetales



1. INTRODUCCIÓN

La energía es un bien escaso, especialmente en los últimos tiempos. La posibilidad de aprovechamiento de cualquier fuente energética, especialmente si se trata de un recurso renovable, es una obligación de la sociedad.

La energía es un bien escaso, especialmente en los últimos tiempos. La posibilidad de aprovechamiento de cualquier fuente energética, especialmente si se trata de un recurso renovable, es una obligación de la sociedad.

En este contexto la producción de biogás responde a este modelo, siendo además un método de reciclaje de residuos orgánicos biodegradables y, cuando se aprovecha como combustible, un importante consumidor de gases de efecto invernadero al retirar el metano (gas con un efecto invernadero 21 veces superior al CO_2 ¹.) de la atmósfera.

En el presente documento se procederá a analizar la coyuntura y perspectivas en el sector de la producción de biogás mediante la digestión anaerobia de diferentes tipos de residuos.

1.1. Objetivos y Promoción del Documento

El objeto que se persigue con la realización de este Estudio es el de obtener una visión global de las limitaciones y potencialidades existentes en la Comunidad Autónoma Andaluza para la implantación de plantas de aprovechamiento del biogás, mediante el análisis de los siguientes condicionantes:

- Estado del arte: Análisis de los residuos aprovechables y de las técnicas empleadas en el sector.
- Situación del sector del biogás en Europa, España y Andalucía, desde el punto de vista tecnológico y legal.
- Aplicación para Andalucía: Análisis de los residuos generados en la comunidad susceptibles de ser aprovechados para la generación de biogás, y determinación de zonas con elevada potencialidad para su implantación.
- Propuesta de nuevas plantas en Andalucía, y estudio de su viabilidad económica y social. de las mismas.

Con ello se pretende obtener conclusiones relevantes sobre la previsión del desarrollo posible del sector en Andalucía, mediante el estudio de los condicionantes particulares de los procesos de generación y de la situación andaluza.

1.2. Justificación

El imperativo ético y legal de mantener el medio ambiente en unas condiciones adecuadas, garantizando el desarrollo sostenible, ha favorecido en los últimos años la aparición de nuevas fuentes de aprovechamiento energético, a base de energías renovables, así como de políticas por parte de las diferentes administraciones fomentando el uso de estas tecnologías.

Por otro lado, el actual modelo de consumo y economía social implica que la generación de residuos por parte de una población creciente sea, en consonancia, cada vez mayor. Ello implica la necesidad de aplicar medidas estratégicas y de planificación para reducir el volumen

¹ 022.MMARM.2009.PNIR 2008-2015 BOE



de residuos que se producen por parte de las diferentes actividades antrópicas, y que generan, en mayor o menor medida, un perjuicio sobre el Medio Ambiente.

El crecimiento desproporcionado en la generación de residuos exige la realización de tratamientos de los residuos generados, de cara a reducir el impacto ambiental. En el gráfico que se muestra a continuación se aprecia el aumento en la generación de residuos que se ha producido en Andalucía en los últimos 25 años.

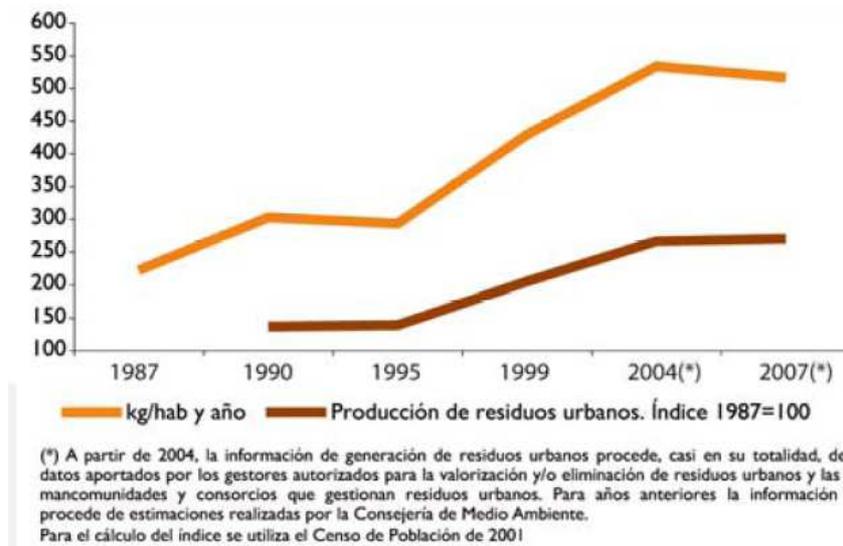


Figura 1. Evolución de la Producción de residuos urbanos en Andalucía, 1987-2007²

Este aumento en el volumen de los residuos generados exige el desarrollo de tratamientos para la gestión de los mismos, evitando los perjuicios ambientales que se ocasionan con motivo de:

- Lixiviados producidos por la fermentación de los residuos, que pueden producir afecciones sobre los acuíferos y cauces cercanos a los núcleos de almacenaje de los residuos.
- Volumen de vertedero (y superficie de suelo) necesario para establecer los residuos
- Emisiones a la atmósfera por parte de las reacciones naturales que se producen por la fermentación de los residuos.
- Molestias a la población (olores, etc.)

Pero, además de evitar estos efectos, se ha planteado realizar un aprovechamiento de los residuos producidos de cara a optimizar las Reducción de la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEIs)³, no sólo por la mencionada minimización de las emisiones de gases de fermentación, sino también por la realización del aprovechamiento de fuentes energéticas diferentes a las derivadas de combustibles fósiles. Así pues, el planteamiento de utilizar los residuos como una fuente energética (renovable), supone aprovechar un recurso que, de otro modo, se perdería, reduciéndose a consecuencia de esta utilización:

- Emisiones de GEIs derivadas de la quema de combustibles fósiles

² 030.CMA.2009.INFORME MEDIO AMBIENTE 2008

³ 024.MMARM.2009.PLAN BIODIGESTION PURINES



- Emisiones de GEIs producidas por los procesos de fermentación de los residuos
- Importaciones energéticas desde el extranjero, y por tanto la dependencia de los mercados energéticos externos, evitándose así crisis similares a la del petróleo acontecida en 1973, o la crisis del gas ruso que se ha producido en los últimos años.
- El impacto ambiental derivado de los olores de los residuos.

Como se ha mencionado, es un imperativo ambiental el considerar seriamente la reducción de las emisiones de GEIs, para evitar el efecto del calentamiento global sobre el planeta. En el siguiente gráfico se puede apreciar la relación entre la concentración de CO₂, uno de los principales responsables del efecto invernadero (aunque recordemos que el potencial contaminante del metano en este sentido es 21 veces superior al del dióxido de carbono) en la atmósfera, y la temperatura media global:

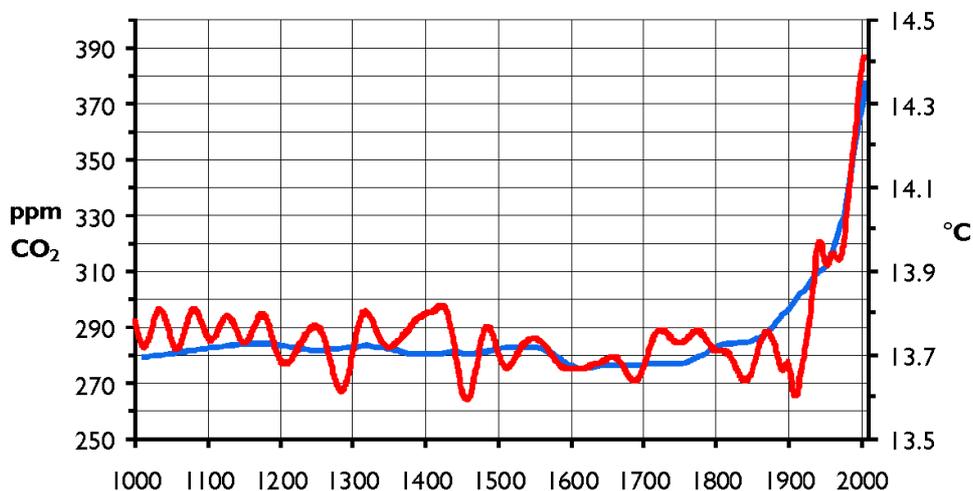


Figura 2. Gráfico en que se muestra la correlación existente entre la concentración de CO₂ atmosférica en partes por millón (azul) y la temperatura de la Tierra (rojo)

Así pues, la tendencia en los últimos años ha sido la de mejorar la gestión de los residuos, disminuyéndose el vertido, controlado e incontrolado, así como fuentes de valorización contaminantes (particularmente, la incineración), para pasar a utilizar los residuos como un recurso, mediante otras fuentes de valorización o métodos como el compostaje. Este hecho se muestra en el siguiente gráfico:



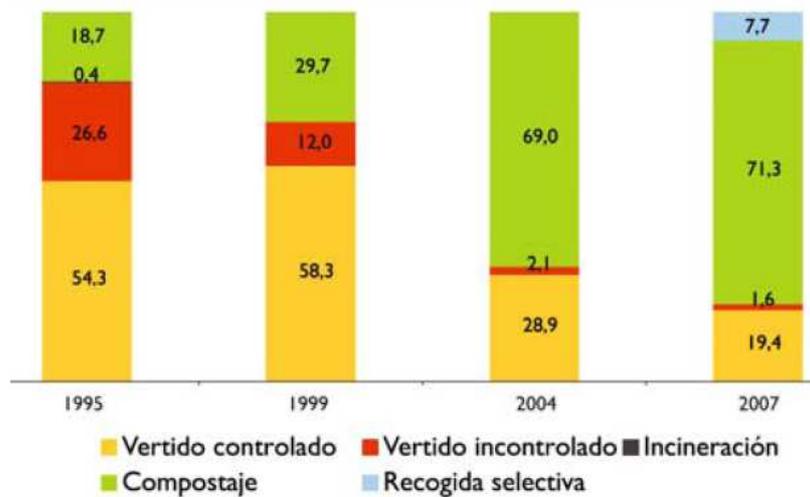


Figura 3. Tratamiento de residuos urbanos en Andalucía, 1995 – 2007⁴

En la Directiva Marco de Residuos⁵ se establece una prelación respecto a las prioridades de actuación sobre los residuos, estableciéndose la siguiente jerarquía (Artículo 4):

- a) *prevención;*
- b) *preparación para la reutilización;*
- c) *reciclado;*
- d) *otro tipo de valorización, por ejemplo, la valorización energética; y*
- e) *eliminación.*

Además, en el artículo 22 se indica lo siguiente:

Biorresiduos

Los Estados miembros adoptarán medidas, en la forma conveniente, y con arreglo a los artículos 4 y 13, para impulsar:

- a) *la recogida separada de biorresiduos con vistas al compostaje y la digestión de los mismos;*
- b) *el tratamiento de biorresiduos, de tal manera que se logre un alto grado de protección del medio ambiente;*
- c) *el uso de materiales ambientalmente seguros producidos a partir de biorresiduos.*

La Comisión realizará una evaluación sobre la gestión de biorresiduos con miras a presentar, si procede, una propuesta. La evaluación examinará la pertinencia de establecer requisitos mínimos para la gestión de biorresiduos y criterios de calidad para el compost y el digestato procedentes de biorresiduos, con el fin de garantizar un alto nivel de protección de la salud humana y el medio ambiente.

Queda clara por tanto, la predisposición de la normativa europea para que se gestionen los residuos valorizables mediante mecanismos biológicos, encaminados a los objetivos anteriormente relacionados.

⁴ 030.CMA.2009.INFORME MEDIO AMBIENTE 2008

⁵ 033.UE.2008.Directiva 2008_98_CE directiva marco residuos



1.3. El proceso de biometanización

La biometanización, o digestión anaerobia, es un proceso microbiológico de fermentación de la materia orgánica, en condiciones de ausencia de oxígeno, transformándose por la acción bacteriana los compuestos orgánicos en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2).

Este proceso se condiciona en gran medida por las condiciones en las que se desarrolla el proceso, por lo que resulta de especial importancia el control de dichas condiciones. A continuación se procede a describir los parámetros de control más relevantes que conllevan una influencia reseñable en el proceso:

Temperatura: Lo más habitual es que las reacciones se desarrollen en una temperatura mesofílica (en torno a 35°C), pues en este rango la actividad de las bacterias hidrolíticas, acetogénicas y metanogénicas es máxima y similar. No obstante, existen técnicas de digestión anaerobia aplicadas en condiciones termófilas (en torno a $50 - 55^\circ\text{C}$) e incluso psicrófilas (menos de 20°C , aplicable a casos de aguas residuales con baja carga orgánica).

pH: Las bacterias metanogénicas son muy sensibles a las variaciones de pH, por lo que las condiciones óptimas para que se desarrolle el proceso se dan con un pH estable de alrededor de 7.0-7.2.

Compuestos presentes en el medio: Las bacterias metanogénicas son sensibles a la presencia de determinados compuestos en alta concentración: Metales pesados, fenoles, amonio, compuestos aromáticos... Asimismo, la presencia de ácidos volátiles (como el ácido acético) influye en el metabolismo de las metanogénicas, optimizándolo cuando estos ácidos se encuentran a pequeñas concentraciones, e inhibiendo su actividad en concentraciones superiores a 2000 ppm.

Además, existen otros parámetros, propios del digestor y de los residuos empleados, que influyen en el desarrollo del proceso⁶:

- Velocidad de Carga Orgánica (VCO): Describe la máxima cantidad de materia orgánica por unidad de volumen y tiempo, que puede introducirse en el digestor para su transformación en biogás sin que provoque una distorsión en el proceso. Se suele expresar en kg DQO/m³ día.
- Tiempo de retención hidráulico (TRH) o Tiempo de Retención de Sólidos (TRS): Es el tiempo de permanencia de un determinado residuo (líquido o sólido, respectivamente) en el digestor para que toda la sustancia orgánica se transforme en metano. Estos tiempos de retención son cruciales en el desarrollo del proceso, por lo que resulta conveniente determinar los tiempos de retención de la biomasa.
- Contenido en Materia Orgánica del Vertido: Si el proceso de biometanización se desarrolla de manera adecuada, el contenido en MO del efluente debería de ser muy bajo, señal de que se ha transformado en biogás la mayoría de los nutrientes disponibles. Si la carga orgánica es alta o, por ejemplo, existe una alta proporción de ácidos volátiles en el efluente, el proceso no se ha desarrollado convenientemente.
- Caudal de metano: La relación entre este parámetro y el contenido en materia orgánica del vertido -por ejemplo, como DQO- da una medida bastante exacta del coeficiente de rendimiento del digestor.

Todas estas características del proceso son propias de los residuos introducidos en el digestor, que por su propia naturaleza presenta unas u otras propiedades. En este sentido, existen residuos con características contrapuestas que “compensan” mutuamente sus carencias o excesos, al digerirse anaeróbicamente de manera conjunta, optimizándose así la producción de biogás. Esta técnica es lo que se conoce como **co-digestión**, que trataremos en profundidad más adelante.

Hay tres vías esenciales de producción de biogás a partir de residuos:

⁶ 034.CSIC.2008.La Experiencia del biogás en Andalucía_Rafael Borja.



- Biogás de vertedero: En los vasos de vertido de las instalaciones de eliminación se puede implantar un sistema de desgasificación, aprovechando la fermentación natural de los residuos en condiciones anaerobias (se produce en las capas inferiores). En cuanto al biogás de vertedero, se indica en el PNIR⁷ lo siguiente:

“En condiciones de laboratorio una tonelada de residuos urbanos mezclados (cuyo contenido en materia orgánica rápidamente biodegradable, como media en España, es un 45% del peso), puede producir de 150 a 250 m³ de biogás. En condiciones normales, no es esperable recuperar más de 80 o 100 m³ por tonelada, a lo largo de la vida útil del vertedero, y ello mediante el empleo de tecnologías de diseño y explotación complejas y solamente viables en grandes vertederos. De forma que indefectiblemente, y en el mejor de los casos, unos 100 m³ de biogás por cada tonelada vertida escapará a la atmósfera.

El gas de vertedero tiene un Poder Calorífico Inferior (PCI) de 5000 kcal/m³, es decir, 1 m³ de biogás tiene un PCI equivalente a 0,6 m³ de gas natural.”

- Biogás de depuradora: Los tratamientos biológicos que se desarrollan durante el tratamiento de las aguas residuales generan una cierta cantidad de biogás, que se suma a la derivada de los lodos de depuradora. En general, en instalaciones pequeñas, el biogás suele quemarse en antorcha, aunque en instalaciones de mayor tamaño existen sistemas para la generación eléctrica a partir de la mezcla gaseosa.
- Digestores industriales y balsas: Los residuos obtenidos de la actividad industrial y ganadera o agroalimentaria pueden introducirse en digestores anaerobios, o en balsas de almacenamiento debidamente aisladas de la atmósfera, en los que se facilita la reacción microbiológica de metanización. Asimismo, se puede la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (en adelante, FORSU), aunque para que el proceso se produzca de manera adecuada se exige una separación de impropios óptima previamente a la realización del proceso.

En general, se puede afirmar que existen dos tipos de tratamiento posibles para los residuos orgánicos, mediante métodos biológicos, según hablemos de procesos aerobios (compostaje) o anaerobios (biometanización). A continuación se presenta una comparativa entre ambos procesos, para el caso de los lodos de depuración.

⁷ 022.MMARM.2009.PNIR 2008-2015 BOE



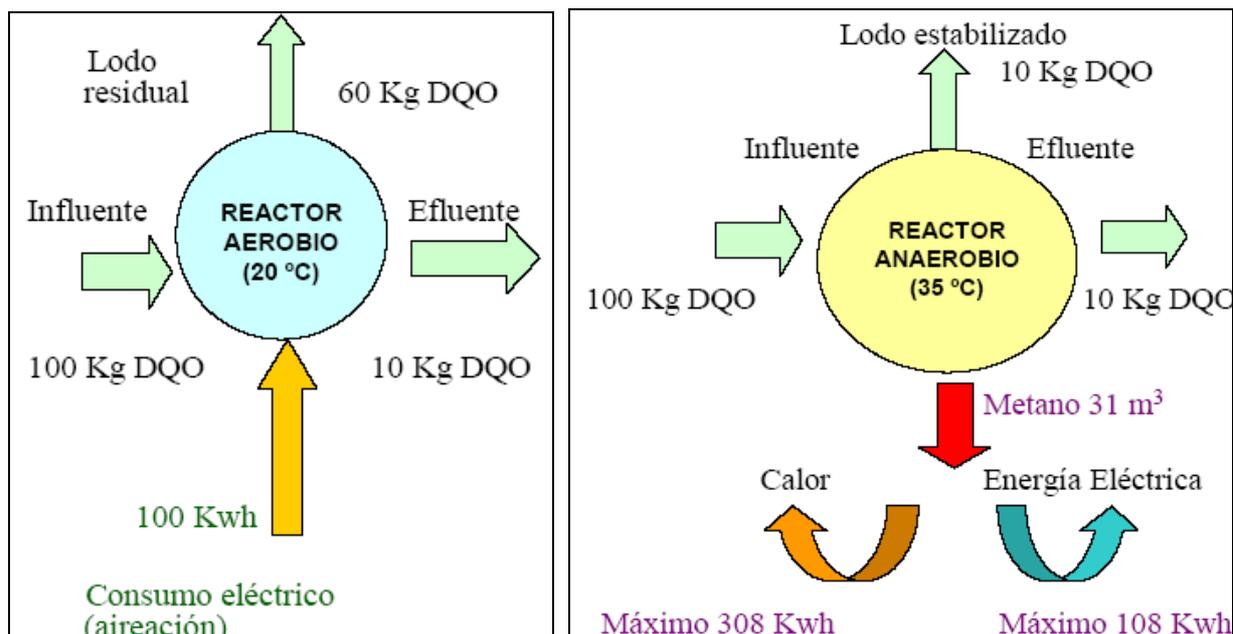


Figura 4. Balance comparativo de los procesos aerobios y anaerobios⁸

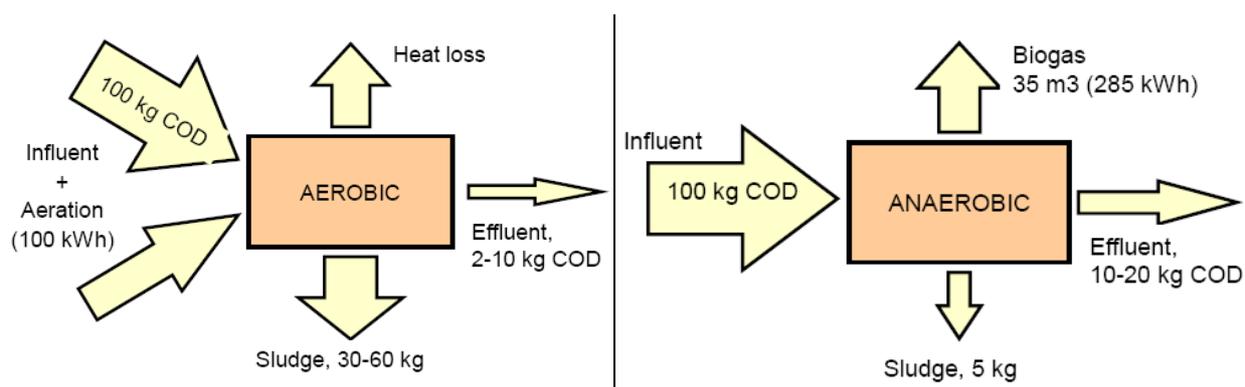


Figura 5. Balance comparativo de los procesos aerobios y anaerobios. COD: Demanda Química de Oxígeno (DQO)⁹

Como se puede apreciar, mientras el proceso aerobio exige el aporte de energía para la aireación, el anaerobio la genera en forma de biogás, además de reducir más eficientemente el volumen total de los efluentes producidos.

Por otro lado, el requerimiento de componentes de la relación Carbono / Nitrógeno / Fósforo en los procesos anaerobios es menos exigente que en los aerobios. Es decir, nitrógeno y fósforo no resultan ser factores tan limitantes en los procesos anaerobios.

En lo que respecta al punto de vista económico, para alcanzar una rentabilidad con el proceso es preciso aumentar al máximo la producción de biogás a partir de determinado sustrato.

Por ello, resulta crucial el control de los parámetros en que se desarrolla el proceso (temperatura, salinidad, pH, etc.), así como una selección adecuada del sustrato a utilizar. Del

⁸ 034.CSIC.2008.La Experiencia del biogás en Andalucía_Rafael Borja

⁹ 031.LEAF.2008.Look Hulshoof. Biogas Technology in Europe



mismo modo, la codigestión supone una ventaja según qué residuo se emplee, puesto que optimiza las características de los residuos utilizados. Así pues, la selección de una mezcla de codigestión en función de la disponibilidad y variabilidad de residuo con que se cuente, así como los porcentajes de cada tipo de residuo presentes en dicha mezcla, determinarán que la producción de biogás, el contenido en metano del mismo, y, por consiguiente, la rentabilidad económica del proceso, se maximicen.

Asimismo, el digestato resultante del proceso puede rentabilizarse económicamente, suponiendo un ingreso adicional para la explotación de este tipo de plantas.

La metanogénesis a partir de compuestos complejos se produce gracias a la acción coordinada de tres grupos de bacterias¹⁰, cada uno con su papel establecido.

El primer grupo que participa en el proceso son las bacterias hidrolíticas acidogénicas, que se encargan de destruir los compuestos complejos, de largas cadenas, en compuestos simples, de entre 1 y 4 carbonos. Así, tomando como sustrato un compuesto orgánico de cadena larga (proteínas, polisacáridos, lípidos, etc.) se obtienen multitud de compuestos orgánicos simples (ácidos fórmico, acético, propiónico, butírico, etc.).

El segundo grupo que participa es el de las bacterias acetogénicas. En este proceso se genera acetato a partir de los ácidos orgánicos simples formados en la hidrólisis acidogénica, añadiendo al proceso hidrógeno molecular (H_2) y dióxido de carbono (CO_2).

Por último, la metanogénesis se desarrolla en dos reacciones diferenciadas, por parte de las arqueobacterias metanogénicas:

- Las metanogénicas acetoclásticas (70% del total) transforman el acetato en metano (CH_4).
- Las metanogénicas hidrogenófilas (30% del total) convierten el hidrógeno molecular (H_2) y el dióxido de carbono (CO_2) en metano (CH_4).

¹⁰ No todos los organismos participantes en el proceso pertenecen al Reino Bacteria. Algunos de los grupos que intervienen pertenecen al Reino Archaea.



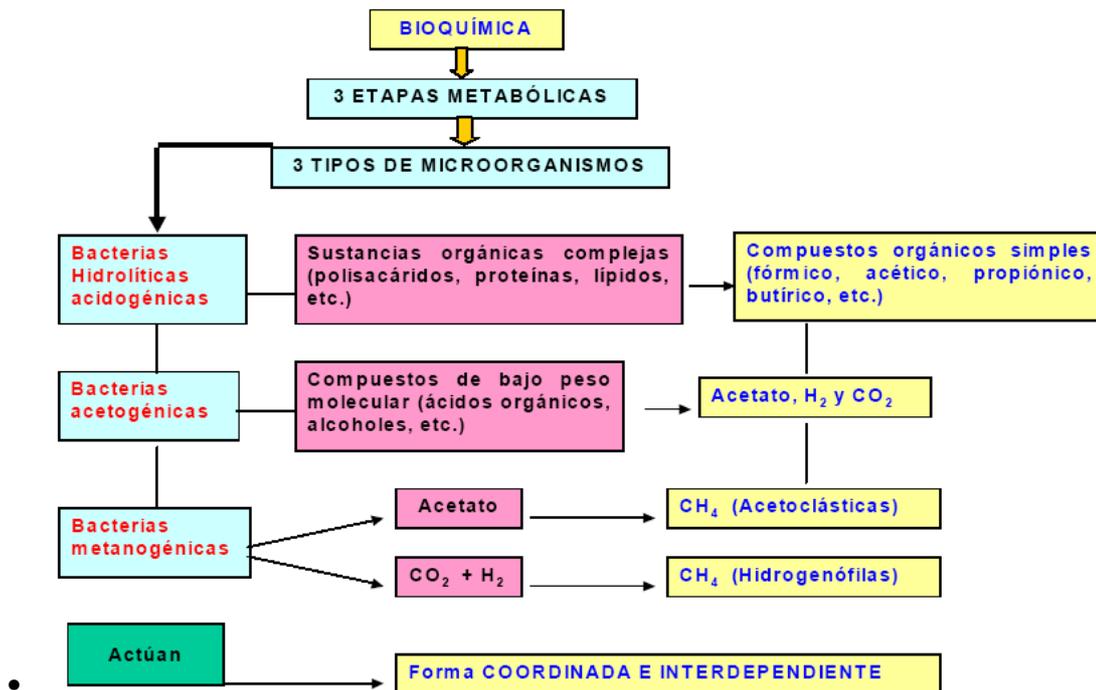


Figura 6. Esquema del proceso de biometanización¹¹

En el proceso completo se produce lo que se conoce como **sintrofismo**, ya que la aparición de un grupo de bacterias posibilita que acontezcan las otras reacciones. Es decir:

- La fragmentación de los compuestos de cadena larga a cargo de las hidrolíticas acidogénicas posibilita que se desarrolle la reacción de acetogénesis.
- La existencia de acetato, H₂ y CO₂ posibilita la existencia de sustrato para la actividad de la metanogénesis.
- La retirada del hidrógeno molecular del medio por parte de esta reacción impide que se inhiba la reacción de acetogénesis.

Así pues, la actividad de cada grupo de bacterias resulta interdependiente de las del resto de los grupos, configurándose como una especie de **ecosistema microbiano** en el que el papel de cada grupo influye en la actividad del resto de la biota microbiana.

¹¹ 034.CSIC.2008.La Experiencia del biogás en Andalucía_Rafael Borja



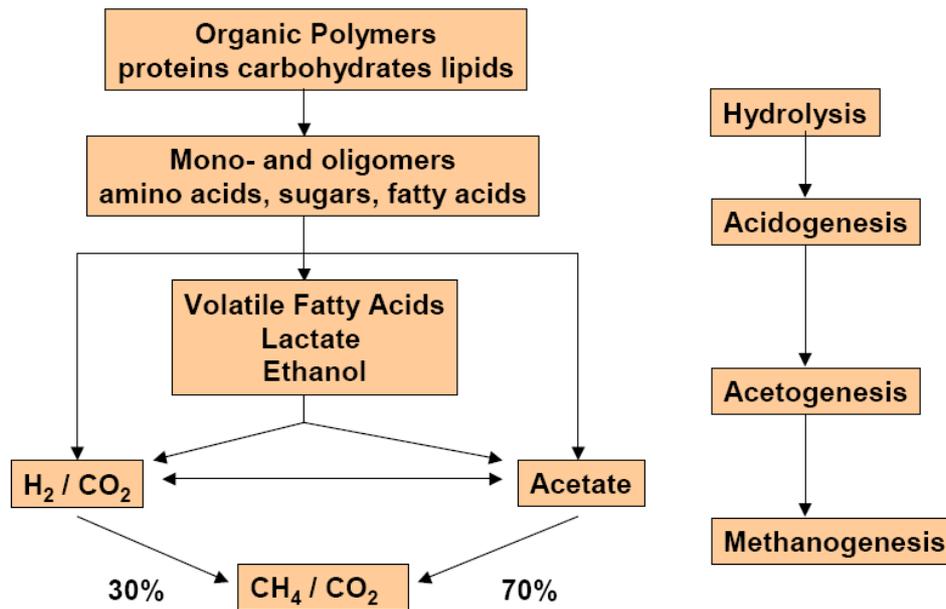


Figura 7. Esquema de las reacciones de biometanización. Los polímeros orgánicos se transforman mediante las reacciones sucesivas de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis en metano y dióxido de carbono¹²

Todo el proceso se da en unas condiciones de anaerobiosis pues los microorganismos que desarrollan la metanogénesis son, en general, anaerobios estrictos, y, en su mayoría, mesófilas (rango de temperatura de actuación de en torno a 35°C). No obstante, el arco de temperatura en que puede producirse la reacción va desde el rango psicrófilo (en torno a 15°C) hasta el termófilo (en torno a 55°C), aunque el rendimiento difiere en función de esta temperatura.

El producto final del proceso de biometanización es una mezcla de gases generados por las reacciones microbiológicas, compuesto de:

- Metano: Entre un 50% y un 75%.
- Dióxido de Carbono: Entre un 25% y un 50%.
- Otros gases: Nitrógeno, Hidrógeno, Sulfuro de Hidrógeno... Entre un 1% y un 5%.

Esta mezcla de gases de composición variable es lo que se conoce como **Biogás**. La composición varía por diversos factores, entre los que se incluyen el tipo de sustrato utilizado para la reacción (el residuo), el tiempo durante el que se prolonga la reacción, los pretratamientos que se puedan realizar, los postratamientos de purificación del gas, etc.

En la siguiente tabla se muestra la composición del biogás obtenido a partir de la fermentación de diferentes tipos de residuo.

¹² 031.LEAF.2008.Look Hulshoof. *Biogas Technology in Europe*



Componente	Residuos ganaderos	Residuos agrícolas	Fangos de depuradora	Residuos municipales	Gas de vertedero
Metano	50-80%	50-80%	50-80%	50-70%	45-60%
Dióxido de carbono	30-50%	30-50%	20-50%	30-50%	40-60%
Agua	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
Hidrógeno	0-2%	0-2%	0-5%	0-2%	0-0,2%
Sulfuro de hidrógeno	0-1%	100-700 ppm	0-1%	0-8%	0-1%
Amoníaco	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas	0,1-1%
Monóxido de carbono	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-0,2%
Nitrógeno	0-1%	0-1%	0-3%	0-1%	2-5%
Oxígeno	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0,1-1%
Constituyentes en cantidades trazas, compuestos orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas	0,01-0,6% ^(*)

^(*) Terpenos, ésteres,...

Figura 8. Componentes del biogás en función del sustrato utilizado¹³

La calidad del biogás obtenido es tanto mejor cuanto mayor sea el porcentaje de metano en la mezcla, ya que un alto componente de metano permite unos usos similares a los del gas natural (contenido de metano en torno al 92%). Como norma general, de cara a los cálculos que se realizan posteriormente en el presente Estudio, tomaremos un valor estándar del 60% de contenido de metano en la mezcla de biogás, ya que es el valor medio en las instalaciones conocidas.

El factor clave para el aprovechamiento de biogás a partir de un residuo es la producción de biogás por tonelada de residuo. En las siguientes tablas se muestra la producción potencial de biogás para diferentes tipos de residuos:

¹³ Xavier Elías Castells (2005). *Tratamiento y Valorización Energética de Residuos*.



Tipo	Contenido orgánico	SV (%)	Producción biogás (m ³ /t residuo)
Intestinos + contenidos	Hidratos de carbono, proteínas, lípidos	15-20	50-70
Fangos de flotación	65-70% proteínas, 30-35% lípidos	13-18	90-130
BBO (tierras filtrantes de aceites, con bentonita)	80% lípidos, 20% otros orgánicos	40-45	350-450
Aceites de pescado	30-50% lípidos	80-85	350-600
Suero	75-80% lactosa, 20-25% proteínas	7-10	40-55
Suero concentrado	75-80% lactosa, 20-25% proteínas	18-22	100-130
Hidrolizados de carne y huesos	70% proteínas, 30% lípidos	10-15	70-100
Mermeladas	90% azúcares, ácidos orgánicos	50	300
Aceite soja/margarinas	90% aceites vegetales	90	800-1.000
Bebidas alcohólicas	40% alcohol	40	240
Fangos residuales	Hidratos de carbono, lípidos, proteínas	3-4	17-22
Fangos residuales concentrados	Hidratos de carbono, lípidos, proteínas	15-20	85-110
FORSU separada en origen	Hidratos de carbono, lípidos, proteínas	20-30	150-240

Figura 9. Producción potencial de biogás a partir de residuos de la industria agroalimentaria, fangos de depuradora, mataderos, pesqueros y residuos municipales¹⁴

	m ³ CH ₄ /t residuo	m ³ biogás/t residuo
Purín de porcino	11,8	19,7
Purín de vacuno	17,7	29,5
Gallinaza	54,4	90,7

Figura 10. Producción potencial de biogás a partir de residuos ganaderos¹⁵

Además, tiene vital importancia en el desarrollo del proceso el control de las condiciones en que se desarrolla el mismo. Las bacterias metanogénicas crecen 10 veces más lentamente que el resto de bacterias (tiempo de generación de 2 a 12 días)¹⁶, y además son muy sensibles a determinados factores, como se mencionó anteriormente.

¹⁴ 002. PBG.2009. Manual Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales

¹⁵ 002. PBG.2009. Manual Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales.

¹⁶ 034.CSIC.2008.La Experiencia del biogás en Andalucía_Rafael Borja.



2. ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

2.1. Residuos aprovechables para la producción de biogás

Existe una amplísima variedad de residuos valorizables mediante la digestión anaerobia, aunque no todos poseen las mismas propiedades de cara al aprovechamiento. Existe una serie de variables características de los diferentes tipos de residuos a tener en cuenta para posibilitar el desarrollo del procedimiento:

- Volumen de residuo disponible
- Potencial contaminante del residuo
- Potencial de producción de biogás
- Contenido en metano del biogás generado
- Relación Carbono: Nitrógeno del residuo
- Capacidad tampón del residuo: Alcalinidad
- Subproductos generados en la reacción: Posibilidades de inhibición de la reacción.
- Cantidad de sólidos volátiles del residuo
- Necesidad de pretratamiento
- Etc.

En general, los residuos más utilizados para la generación de biogás se resumen a continuación:

- Residuos ganaderos y de granjas: Purines de cerdo y vaca, estiércoles, gallinaza. En general, su potencial para la producción del biogás no es demasiado alta, debido a su alto contenido en nitrógeno y a su excesiva liquidez para el proceso. No obstante, por causa de su poder contaminante de suelos y por la abundancia de recurso, sumado a la ausencia de tratamientos eficientes de valorización, los residuos ganaderos constituyen el combustible por excelencia para la generación de biogás mediante digestión anaerobia.
- Residuos agrícolas: Los restos agrícolas procedentes de cultivos de consumo, cultivos energéticos o de generación de materias primas para la industria alimentaria constituyen un sustrato apropiado, en general, para la digestión anaerobia. No obstante, la tipología del material usado, en función de la carga orgánica que posea, genera una gran variabilidad en el potencial de biogás existente en el residuo. Además, presenta la problemática de estar sometido a la estacionalidad del recurso (en general).
- Residuos de la industria alimentaria: El procesado de las materias primas animales y vegetales para la elaboración de productos alimenticios genera abundantes residuos susceptibles de ser aprovechados para la producción de biogás. Las industrias lácteas, cerveceras, conserveras, azucareras y similares producen unos residuos con alta carga de materia orgánica, muy adecuados para el aprovechamiento energético. No obstante,



en función del tipo de residuo, puede ser necesario un pretratamiento previo para maximizar el potencial de generación de biogás.

- **Residuos de matadero:** Constituyen uno de los residuos con mayor potencial para la generación de biogás. Los restos de contenidos estomacales, intestinos, etc., así como los restos de depuración de los efluentes de este tipo de residuos, suponen un sustrato muy adecuado para la biometanización, aunque, generalmente, este aprovechamiento se realiza en codigestión con otros residuos.
- **Residuos pesqueros:** Los restos de pesca y de procesamiento de productos alimentarios de la industria conservera y similares resultan ser un muy buen sustrato para la digestión anaerobia.
- **Lodos de Depuradora:** Los tratamientos de depuración de aguas residuales generan lodos de difícil tratamiento, muy apropiados para la generación de biogás. De hecho, existen numerosas EDARs que se autoabastecen con el aprovechamiento térmico del biogás generado.
- **Residuos de plantas de biocombustibles:** En este tipo de plantas, particularmente en las de biodiésel se generan grandes cantidades de glicerina, que es uno de los residuos con mayor potencial de generación de biogás. No obstante, existen otras formas de aprovechamiento de la glicerina, lo que supone que, a día de hoy, la glicerina procedente de las plantas de biodiésel sea un residuo dependiente, por un lado de la producción real de las plantas, y por otro lado, de la utilización del subproducto en otros aprovechamientos independientes de la producción de biogás mediante digestión anaerobia.
- **Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU):** Los RSU constituyen una fuente de sustratos para la biometanización, suponiendo esta operación una fuente de valorización y reducción de los mismos. No obstante, hay una gran variabilidad en el potencial de producción de biogás por parte de estos residuos, en función de las operaciones de separación previas que se hayan realizado previamente. La utilización de FORSU previo tratamiento para generar biogás supone una posibilidad de reducir el volumen de residuos existente.
- **Biogás de vertedero:** Existen vertederos que cuentan con sistemas de aprovechamiento del biogás, mediante la colocación de una red de tuberías y chimeneas que reconducen el biogás que se genera hasta los motores para generación eléctrica. De este modo se aprovecha de forma pasiva la emisión gaseosa de la fermentación de los vertidos para la generación de un biogás con bajo contenido en metano.

A continuación se muestra un gráfico en el que se indica el potencial de diversos tipos de residuo agroindustriales para la producción de biogás mediante digestión anaerobia. En el mismo se puede apreciar que la potencialidad para la generación del biogás aumenta a medida que aumenta el porcentaje de grasas en el residuo:



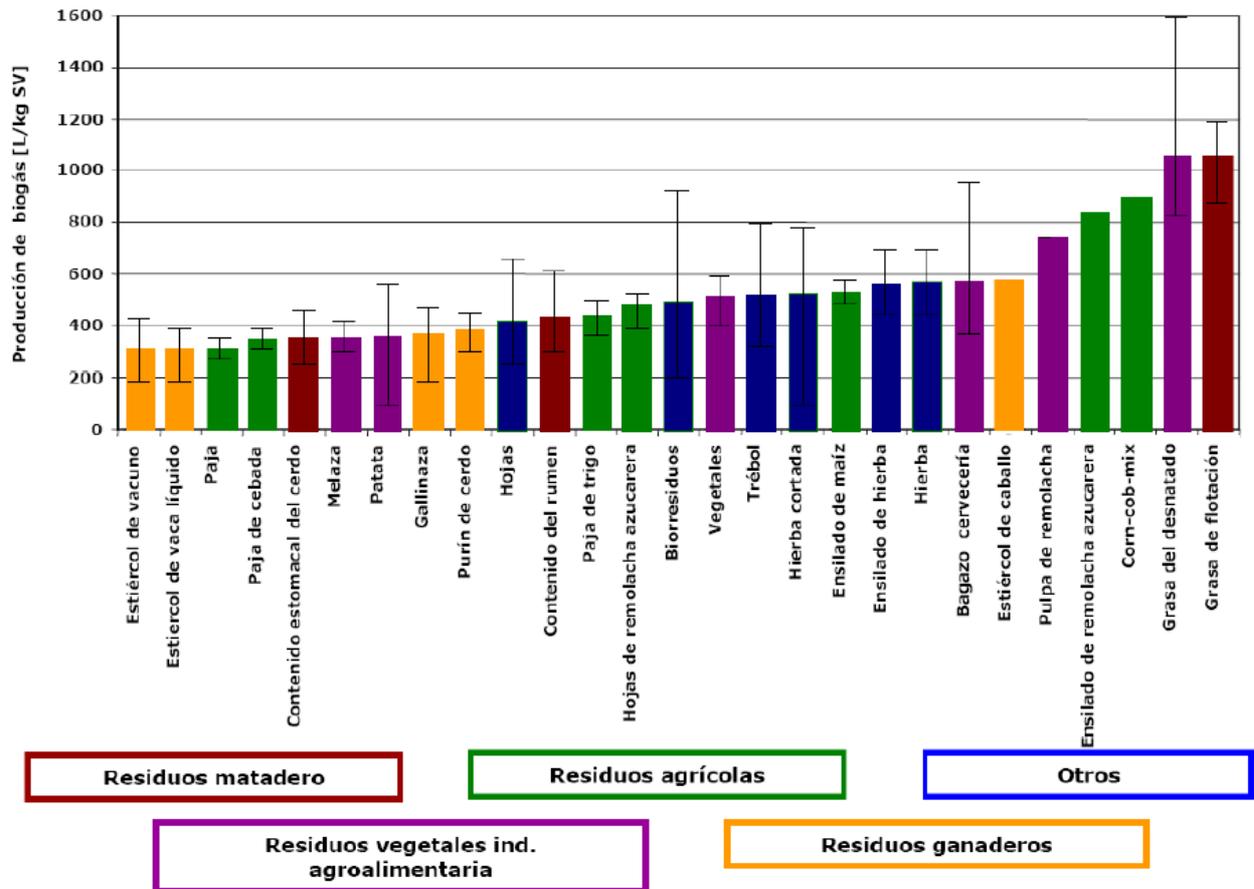


Figura 11. Rangos de producción potencial de biogás en función del residuo agroindustrial utilizado. Datos del AINIA,2007¹⁷

2.2. Estudio de los pretratamientos existentes

A través de diversos estudios realizados y de resultados obtenidos en plantas industriales actuales, se tiene constancia de que la realización de un pretratamiento previo de los sustratos a utilizar en los procesos de digestión anaerobia proporciona un aumento considerable en la producción de biogás, tal como se puede apreciar en la siguiente imagen¹⁸, en la que se muestran los beneficios del pretratamiento traducidos en potencial de metano.

¹⁷ 032.AMGA.2008.Rentabilidad Codigestión-Amaya Garijo

¹⁸ 004. PBG.2009.Potencialidad biogás. Genera 2009



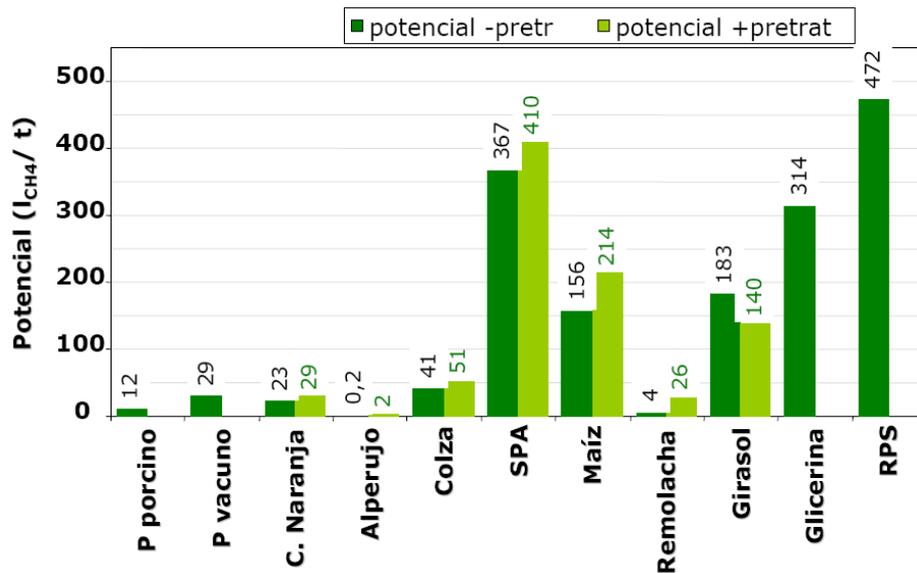


Figura 12. Potencial de metanización de diversos sustratos. SPA: Residuos animales. RPS: Residuos pesqueros

Esta variación en la potencialidad para la producción difiere según el residuo del que estamos tratando, siendo muy relevante la tipología del mismo. Del mismo modo, el potencial de producción de biogás es variable en función del tipo de tratamiento aplicado, que será uno u otro según el residuo con el que contemos.

El proceso de digestión anaerobia cuenta con que la velocidad del proceso es limitada debido a la celeridad con que se produce la etapa más lenta, la cual depende de la composición del residuo. Debido a dicha limitación, los tiempos de tratamiento suelen ser del orden de dos o tres semanas.

El uso de la estrategia basada en el pretratamiento permite que dicha velocidad de proceso aumente. Esto es debido a que tras dicha etapa previa los residuos disminuyen el tamaño de las partículas, mejoran la solubilización, acondicionan la pureza en materia orgánica, disminuyen la masa de residuo digerido y principalmente obtienen un incremento en su biodegradabilidad.

Como ejemplos de dichos procesos de pretratamiento se tienen:

- Maceración.
- Trituración.
- Ultrasonidos.
- Tratamiento térmico (Pasteurización).
- Alta presión.
- Combinación de altas presiones y temperaturas.
- Tratamiento biológico.

Dichos tipos de procesos serán empleados específicamente según el tipo de residuo del que se trate, donde a continuación se detallan los pretratamientos de diversos residuos comúnmente usados en los procesos de codigestión.



2.2.1. Residuos ganaderos

Los pretratamientos **físico-químicos** suponen un beneficio para la fase de hidrólisis, debido a la reducción en el tamaño de las partículas y con ello al aumento en la tasa de hidrólisis. Hills y Nakano (1984) demostraron que la tasa de hidrólisis depende del tamaño de las partículas, debido fundamentalmente a la disponibilidad de superficie para la adsorción de las enzimas hidrolíticas.

El **ultrasonido** es el pretratamiento más extendido para dicho tipo de residuos aunque los resultados obtenidos en determinados ensayos de laboratorio no han sido los esperados. Esto se debe a que tras el uso de dicha fase previa no se produce un aumento en la producción de biogás, aunque sí se percibe una mayor y más rápida estabilización del proceso.

A continuación se muestra una tabla en la que se refleja el potencial de producción de biogás por parte de los purines frescos y envejecidos, con y sin pretratamiento térmico¹⁹:

	Purines frescos		Purines envejecidos	
	CH ₄ /SV _i (L/kg)	CH ₄ /DQO _i (L/kg)	CH ₄ /SV _i (L/kg)	CH ₄ /DQO _i (L/kg)
Purines no tratados térmicamente	347,5	209,7	96,1	62,3
Purines tratados térmicamente	557,5	304,1	67,7	40,1
% Incremento	60,4	45,0	-29,5	-35,6

Figura 13. *Potencial de producción de metano presentado por los purines. SV: Sólidos Volátiles; DQO: Demanda Química de Oxígeno*

Tras el análisis de la anterior tabla observamos que, para aumentar la potencialidad de producción de biogás por parte de los purines, es conveniente tratarlos térmicamente cuando aún están frescos, procediendo a utilizarlos para la digestión anaerobia inmediatamente, pues se produce un descenso muy acusado de la potencialidad de producción cuando los purines se envejecen.

2.2.2. Residuos de matadero y pesqueros

Los residuos procedentes de matadero deben ser tratados previamente mediante un proceso de **pasteurización o higienización** mediante la estancia de los mismos a una temperatura de 70°C durante una hora. Según un estudio llevado a cabo por Rutledge, 2004, se concluyó con que la producción de metano aumenta hasta cuatro veces con la correspondiente a la que se obtendría mediante el uso de dicho residuo no tratado previamente, aunque se reduce la eliminación de Sólidos Totales y Sólidos Volátiles respecto a los residuos sin tratar. Este incremento se debe a que tras el tratamiento, los lípidos quedan más accesibles para la digestión anaerobia. En la siguiente tabla²⁰ se muestran las producciones de metano referentes a dicho residuo tratado previamente y sin tratar.

¹⁹ 044.GIRO.2008.Biogás_y_gestión_de_purines

²⁰ 002.PBG.2009.Manual Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales



Residuo	Producción CH ₄ (m ³ /t)
Subproductos animales pasteurizados	225
Subproductos animales no pasteurizados	56
Mezclas de Residuos de Matadero	160

Sin embargo, el resultado de tratar previamente los residuos pesqueros mediante **enzimas**, es un aumento del rendimiento global del proceso traducido en mayores producciones de biogás e incrementos en la eliminación de Sólidos Totales y Volátiles.

2.2.3. Residuos hortofrutícolas

Para dicho tipo de residuos el pretratamiento se compone de:

- Pretratamiento mecánico: Trituración de los residuos hasta conseguir una mezcla donde la fermentación se verá mejorada.
- Pretratamiento biológico: Compost maduro y un cultivo de hongos. Pretratamiento enzimático con residuos cárnicos.

Las aguas de lavado de frutas y hortalizas se caracterizan por contener principalmente sólidos suspendidos y materia orgánica disuelta pudiendo presentar algunos compuestos tóxicos como pesticidas, compuestos fenólicos, terpenos, resinas, etc. Por lo que al realizar un pretratamiento químico con ataque ácido o básico, se pueden formar, también, compuestos tóxicos (Speece, 1987).

2.2.4. Cultivos energéticos

Dichos cultivos susceptibles de ser utilizados para la producción de metano, tras ser sometidos a un proceso previo de **trituration** mediante medios mecánicos aumentarán su producción de biogás considerablemente debido a la obtención de una mezcla donde la fermentación se ve mejorada.

2.2.5. Lodos EDAR

La biodegradación biológica de los lodos secundarios mediante digestión anaerobia con respecto a los lodos primarios es más eficiente debido a su composición orgánica. Por lo que la realización de la etapa previa de pretratamiento a los lodos secundarios a partir de **ultrasonidos** es esencial para conseguir óptimos rendimientos. Debido a dicho proceso se desaglomeran los flocos secundarios y aumenta la solubilidad y/o la disponibilidad del material celular a los microorganismos anaerobios.

El ultrasonido al ser utilizado combinado con la digestión anaerobia presenta otras ventajas: elimina espumas en los digestores, disminuyendo el problema de malos olores producidos por las mismas, incrementa la producción de biogás en un 30 a 45% y reduce la concentración de los sólidos y material orgánico presente.

Otra tecnología como es la **hidrólisis térmica** es usada como pretratamiento de lodos dando buenos resultados, incrementando considerablemente la producción de biogás.



Para realizar dicho proceso, el lodo a tratar se bombea a un reactor de hidrólisis, en el que se mantiene durante una hora y media a una presión de 8 bares y a una temperatura de 170 grados. Dichas condiciones en el reactor son conseguidas controlando la inyección de vapor procedente de una caldera. Transcurrido el tiempo de proceso en el reactor, éste se descomprime rápidamente, pasando el fango a estar a presión atmosférica, y teniendo como resultado una rotura de sus sustratos. A través de dicha técnica se logra solubilizar la materia orgánica comprendida en el fango, simplificando cuantiosamente el proceso de digestión anaerobia.

2.2.6. Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos

Los tratamientos mecánicos sencillos que seleccionan la fracción orgánica del residuo orgánico (cribado+separación de metales) son solo válidos para compostaje, no para procesos de biometanización ya que junto a esta aparecen además numerosos materiales no biodegradables como arenas, vidrios, escombros, pequeños plásticos, cáscaras duras, etc.

Así, la teórica fracción orgánica obtenida, como producto pasante por la criba citada, realmente contiene entre un 25 y 40 % de elementos no apropiados para la biometanización. Estos elementos “impropios”, no solo son imposible o difícilmente biodegradables, sino que entorpecen el funcionamiento general de la instalación produciendo atascos, decantaciones no controladas de arenas, vidrios y otros áridos, así como segregación de capas de elementos flotantes no deseados reduciendo la capacidad efectiva de la biometanización.

Para lograr un buen proceso de biometanización a partir del uso de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos, estos deben pasar una etapa previa de pretratamiento a fin de extraer materiales no fermentables como plásticos, metales o residuos muy voluminosos. Dicha separación se puede efectuar en ‘seco’ (tal cual el residuo entra) o en mezcla con agua (‘húmedo’) dependiendo de la naturaleza físico-química de los elementos no fermentables. Después de una primera separación de materiales se utiliza un proceso de reducción de tamaño y homogeneización para obtener una suspensión que permita una correcta fermentación, incrementando la degradabilidad y facilitando el proceso. Cuando la suspensión está preparada, se descarga sobre un equipo combinado de cribado y extracción de arenas, para separar las partículas no fermentables como plásticos, gravas, arenas, cristales, etc. Tras dicho proceso la fracción orgánica se traslada a un cilindro de carga y de aquí a un tanque desde donde llega al digestor.

2.3. Técnicas de higienización para materiales que pueden producir contaminación biológica

La técnica principal que se utiliza como método de higienización es la pasteurización. La base de este tratamiento es someter los residuos a altas temperaturas durante un periodo de tiempo determinado, con el objetivo de reducir los microorganismos patógenos existentes en el residuo utilizado, evitando así las posibilidades de que se produzca una contaminación de tipo biológico a consecuencia de ello.

La temperatura y el tiempo son variables, e interdependientes. A mayor temperatura, menor tiempo para que se produzca la pasteurización, y viceversa. Una de las metodologías más extendida es la de aplicar una temperatura de 70 °C durante una hora.



Las técnicas de higienización se aplican a aquellos residuos con mayor susceptibilidad de producir contaminación, es decir, los residuos animales. Particularmente, la Unión Europea exige que se esterilicen los residuos procedentes de matadero.

Desde el punto de vista de la generación de biogás se producen dos ventajas claras al aplicar las técnicas de higienización:

- Eliminación de microorganismos competidores de los responsables de la digestión anaerobia.
- Como se ha descrito en el apartado anterior, la producción de biogás aumenta al realizar el pretratamiento. Este pretratamiento de higienización obligado no tendría repercusión económica adicional, al ser una exigencia legal, para la producción de biogás.

No obstante, se encuentran también los siguientes inconvenientes:

- Las altas temperaturas reducen enormemente la cantidad de microorganismos metanogénicos y fermentadores anaeróbicos, por lo que puede ser necesaria la realización de una inoculación.
- Si la esterilización no va asociada a la realización de la misma en origen, sí que tendría una implicación económica en el proceso, en caso de realizarse.

2.4. Reactores. Tipos de reactores existentes

La variedad de digestores existentes en el mercado es enorme, con diferenciaciones que van desde parámetros como el volumen, hasta modelos conceptualmente diferentes, modificándose el número de tanques de proceso, la orientación de los mismos, los sistemas de movilización de biomasa...

Existen, básicamente, dos tipos de reactores, según sean dispongan o no de sistemas de retención de biomasa. Dentro de estos grandes grupos, las posibilidades difieren, en general, según las siguientes características:

- Disposición de elementos de mezclado
- Disposición de sistemas de recuperación del efluente
- Orientación de los sistemas de circulación interna (dirección de funcionamiento)



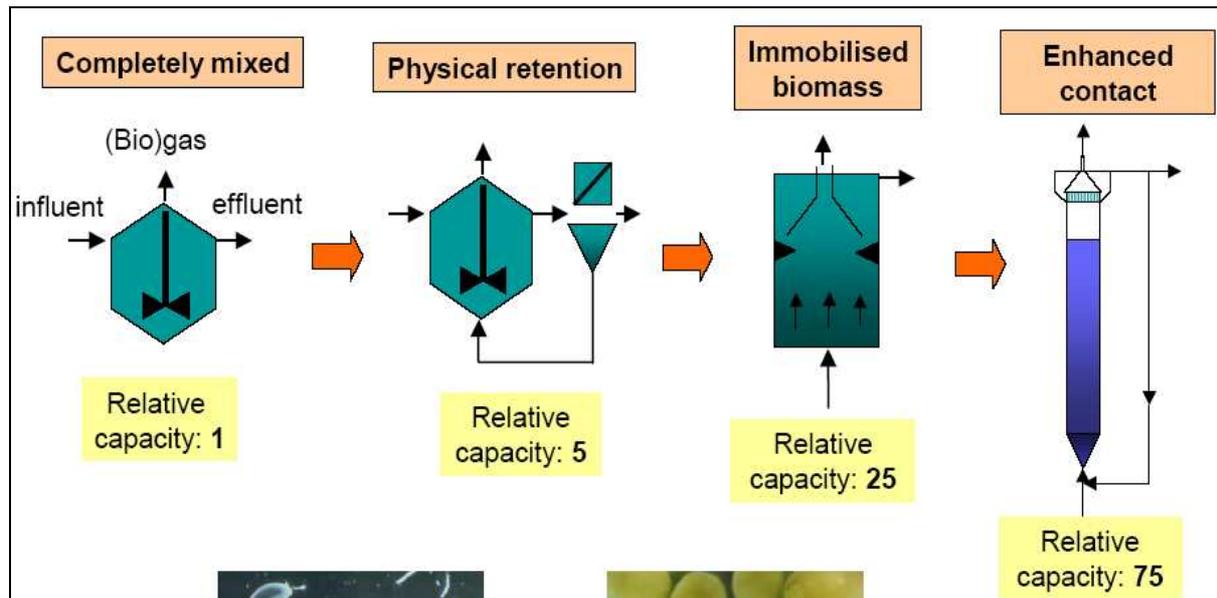


Figura 14. *Sistemas básicos de tecnología en reactores anaerobios. De izquierda a derecha: Reactor de mezcla completa, de retención física, de biomasa inmovilizada y de contacto aumentado.*²¹

No obstante, existen otras tipologías, como es el caso de las lagunas anaerobias o del Bioelax, que no se enmarcan en estas tecnologías, aunque pueden aplicarse las mismas sobre los tanques de sustrato existentes.

A continuación se realizará un análisis de los tipos de reactores existentes, en lo que se refiere a las generalidades de los mismos, sin llegar a particularizar, pues, como se ha mencionado en el párrafo anterior, la variedad es abrumadora.

2.4.1. Reactores sin Retención Interior de Biomasa

2.4.1.1 Reactores de mezcla completa (RMC)

Este tipo de digestores se basan en mantener una distribución homogénea en la mezcla que contienen, tanto en sustrato como en microorganismos, mediante la agitación de la mezcla por medios mecánicos o neumáticos.

La disposición en el reactor de unas hélices o palas, sean de eje vertical u horizontal, genera la agitación de la mezcla para la homogeneización, de forma suave. De este modo, se evitan problemas de decantación y similares, que mermarían la capacidad de producción de biogás.

Existen dos versiones de los RMC: Sin y con recirculación. El primer tipo, **sin recirculación**, consiste únicamente en el digestor, con su correspondiente sistema de agitación y los sistemas de extracción del biogás y los efluentes.

La versión **con recirculación**, también denominado “Reactor anaerobio de contacto” añade un desgasificador y decantador para el efluente del reactor, recirculando la biomasa decantada al interior del reactor principal. De este modo se evita la necesidad de reinoculación en el tanque,

²¹ 031.LEAF.2008.Look Hulshoof. *Biogas Technology in Europe*



al no producirse la pérdida de biomasa en el efluente. Asimismo, se optimiza el aprovechamiento del biogás, al no existir pérdidas en el efluente.

Regulando esta recirculación es posible reducir el tiempo de retención del reactor con respecto al de un RMC sin recirculación. Además, en este tipo de reactor, la producción de fangos (digestatos) es menor, optimizándose el aprovechamiento del biogás.

Debido a la necesaria separación de microorganismos en el decantador, este sistema sólo es aplicable a aguas residuales de alta carga orgánica (aguas residuales de azucareras, cerveceras, etc.), para las que sea posible una separación de fases líquido-sólido, con la fracción sólida consistente básicamente en flóculos biológicos.

Los RMC en general se utilizan únicamente para residuos muy concentrados, ya que la salida de los efluentes produce un lavado de la biomasa, y porque las condiciones de agitación influyen de manera negativa en el crecimiento de los microorganismos responsables de la reacción, cuya velocidad de multiplicación es, ya de por sí, baja.

En la siguiente figura se muestra un esquema de estos tipos de reactor.

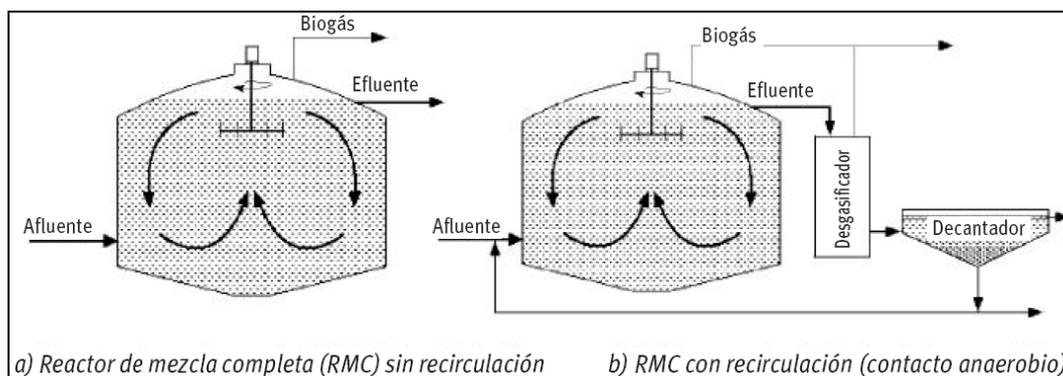


Figura 15. Esquema de reactores de mezcla completa sin y con recirculación²²

2.4.1.2 Reactor de Flujo Pistón

El digestor de flujo pistón es un reactor de flujo horizontal, en el que se fuerza la circulación del afluente, entrando por un extremo, y saliendo el efluente por el extremo contrario. La carga orgánica del sector inicial es, por tanto, superior a la existente al final del digestor.

²² 003.IDAE.2007.Biomasa. Digestores Anaerobios

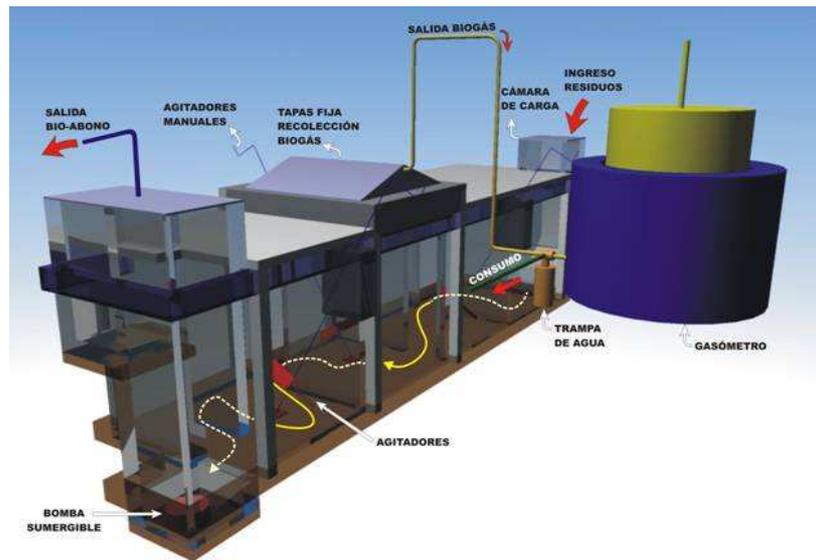


Figura 16. Esquema del funcionamiento de un reactor de tipo flujo-pistón²³

Presenta problemas de homogeneidad vertical, por lo que frecuentemente cuentan con sistemas de agitación.

2.4.1.3 Digestor Discontinuo

Consiste en un simple tanque de proceso, en el que se añade la mezcla de residuos, y una vez finalizada la reacción, es decir, transcurrido el tiempo de retención, se retira el efluente y se procede a añadir material nuevamente.

Obviamente, la eficiencia del proceso es escasa, por existir tiempos muertos entre fases. Además, la ausencia de sistemas de mezclado ralentiza la completa digestión anaerobia de los sustratos introducidos.

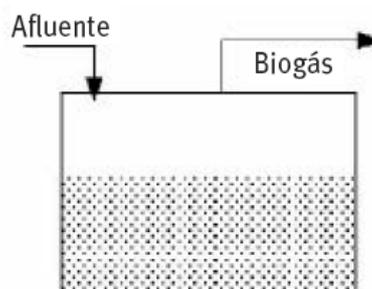


Figura 17. Esquema de un digestor discontinuo²⁴

2.4.1.4 Cobertura de las balsas de acumulación de purines

En las balsas en que se almacenan los purines de manera previa a su utilización puede disponerse una cobertura plástica, elástica, con extractores del biogás, de modo que se realice

²³ <http://www.eg-ingenieria.com.ar/biodigestores-desplazamiento-horizontal.html>

²⁴ 003.IDAE.2007.Biomasa. Digestores Anaerobios



in situ la digestión anaerobia de purines y estiércoles, obteniéndose tres claras ventajas en el proceso:

- Reducción de la carga orgánica del purín.
- Eliminación de los malos olores
- Aprovechamiento energético del biogás



Figura 18. Cobertura de una balsa de almacenamiento de purines

Una variante de esta técnica es el *BioElax*, depósitos tubulares plásticos, de geomembrana, semienterrados, con una entrada de residuo y salida de efluente, en condiciones anaerobias. Se estructuran a base de PVC, y se fabrican en forma de módulos.



Figura 19. Digestores BioElax²⁵

2.4.2. Reactores con retención de biomasa

Utilizando reactores que eviten la movilización de la biomasa, podremos aumentar la estabilidad de los microorganismos, evitando, por un lado, el lavado de los mismos, y, por otro lado, optimizando la actividad bacteriana para la digestión. De este modo, se reduciría el tiempo de retención de a biomasa, con respecto a un reactor RMC.

Existe una amplia variedad de este tipo de reactores:

- Reactores con inmovilización de la biomasa sobre un soporte: Filtros anaerobios, lechos fluidificados.
- Reactores con retención mediante gravedad: Reactores de lecho de lodos.

2.4.2.1 Filtros anaerobios²⁶

En este sistema las bacterias anaerobias están fijadas a la superficie de un soporte inerte (en forma de biofilms), columna de relleno, o atrapadas en los intersticios de éste, con flujo vertical. El soporte puede ser de material cerámico o plástico.

Su distribución puede ser irregular (filtro anaerobio propiamente dicho, con flujo ascendente), y en este caso las bacterias se encuentran mayoritariamente atrapadas en los intersticios, o regular y orientado verticalmente, y en este caso la actividad es debida básicamente a las bacterias fijadas, recibiendo el nombre de lecho fijo con flujo descendente. Estos tipos se muestran en la siguiente figura.

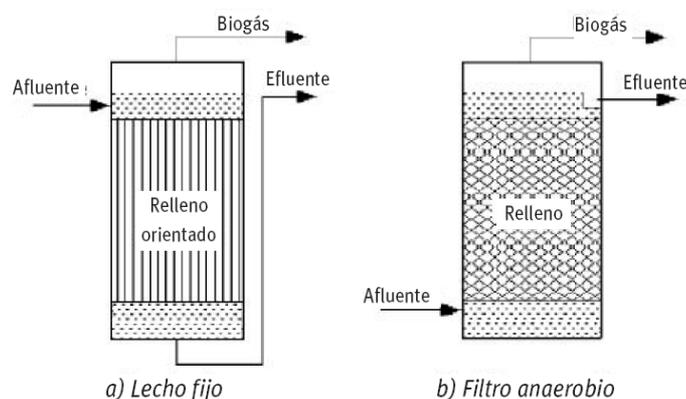


Figura 20. Reactores mediante filtro anaerobio

En caso de utilizar un soporte orientado verticalmente con flujo ascendente y un sustrato lentamente degradable, con elevado tiempo de retención, la retención por sedimentación de los fragmentos de biopelícula desprendidos adquiere un efecto de importancia en la actividad del reactor.

²⁵ 046.NE.2008.BioElax

²⁶ 003.IDAE.2007.Biomasa. Digestores Anaerobios

Este sistema ha sido extensamente aplicado para el tratamiento de aguas residuales de industria agroalimentaria, y existen experiencias piloto para la fracción líquida de residuos ganaderos. El coste de inversión es un limitante importante para su implantación.

2.4.2.2 Reactores de lecho fluidificado

En este sistema las bacterias se encuentran fijadas, formando un biofilm, sobre pequeñas partículas de material inerte que se mantienen fluidizadas 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.

Igual que el filtro, puede ser aplicado a aguas residuales, especialmente de la industria agroalimentaria, y a fracciones líquidas o sobrenadante de residuos ganaderos, aunque las experiencias en este ámbito son más limitadas.

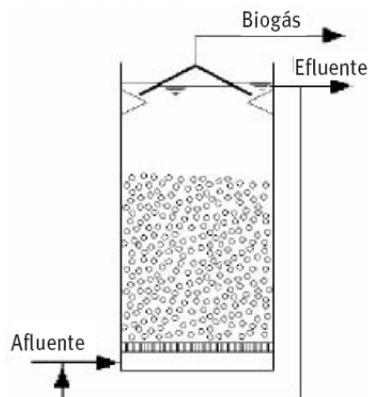


Figura 21. Esquema de un reactor de lecho fluidificado²⁷

2.4.2.3 Reactores de lecho de lodos

Este tipo de reactores se basa en las propiedades de floculación de las bacterias metanogénicas. Es decir, durante el tratamiento de agua residual en un medio en el que exista un régimen hidráulico constante de flujo ascendente, se forman unos gránulos de origen microbiológico.

En ausencia de algún tipo de soporte, las condiciones del tipo de flujo crea un ambiente selectivo en el cual sólo esos organismos capaces de anclarse a lo otros, sobrevive y prolifera. La configuración de los agregados dentro del biofilm, denso y compacto, es a lo que se denomina gránulo o flóculo. Debido a su gran tamaño de partícula (generalmente en el rango de 0.5 a 2 mm de diámetro), los gránulos resisten el lavado del sistema de reacción, permitiendo cargas hidráulicas elevadas.

²⁷ 003.IDAE.2007.Biomasa. Digestores Anaerobios



Figura 22. Gránulos procedentes del tratamiento de aguas residuales. El fondo es un papel milimetrado apreciándose así el tamaño de partícula. Las flechas rojas marcan los poros de salida del biogás de las capas internas de los gránulos.²⁸

Un gramo de fango granular (peso seco) puede catalizar la conversión de 0.5 a 1 g de DQO al día.

El gránulo se forma de manera natural, debido a que la composición del gránulo está estratificada. En el centro se localizan los agregados de *Methanosaeta*, que forman filamentos que se entrelazan (principalmente), y otros organismos metanógenos, como *Methanothrix* y *Methanosarcina*. En la siguiente capa están localizados organismos productores y consumidores de hidrógeno, en una asociación simbiótica. En la capa superficial se localizan los organismos que realizan las primeras etapas de degradación anaerobia, como los acidógenos y otros organismos consumidores de hidrógeno.

La granulación depende en gran medida del crecimiento bacteriano, por lo que optimizando las condiciones de crecimiento se mejorará considerablemente.

Son, actualmente, los reactores que más se están utilizando, existiendo, básicamente dos tipos de estos reactores:

- UASB: *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (manta de lodos anaerobios de flujo ascendente)
- EGSB: *Expanded Granular Sludge Bed Digestion* (lecho de lodos granulares expandidos)

Procederemos a continuación a describir ambos tipos de reactor:

- **Reactor de tipo UASB**

En los sistemas anaerobios de flujo ascendente, y bajo ciertas condiciones, se puede llegar a observar que las bacterias pueden llegar a agregarse de forma natural formando flóculos y gránulos. Estos densos agregados poseen unas buenas cualidades de sedimentación y no son susceptibles al lavado del sistema bajo condiciones prácticas del reactor. La retención de fango activo, ya sea en forma granular o floculenta, hace posible la realización de un buen

²⁸ <http://www.uasb.org/discover/granules.htm>

tratamiento incluso a altas tasas de cargas orgánicas. La turbulencia natural causada por el propio caudal del influente y de la producción de biogás provoca el buen contacto entre agua residual y fango biológico en el sistema UASB. En los sistemas UASB pueden aplicarse mayores cargas orgánicas que en los procesos aerobios. Además, se requiere un menor volumen de reacción y de espacio, y al mismo tiempo, se produce una gran cantidad de biogás, y por tanto de energía.

El reactor UASB podría reemplazar al sedimentador primario, al digester anaerobio de fangos, al paso de tratamiento aerobio y al sedimentador secundario de una planta convencional de tratamiento aerobio de aguas residuales. Sin embargo, el efluente de reactores UASB normalmente necesitan un tratamiento posterior, para lograr degradar la materia orgánica remanente, nutrientes y patógenos. Este postratamiento puede referirse a sistemas convencionales aerobios como lagunas de estabilización, plantas de fangos activos y otros.

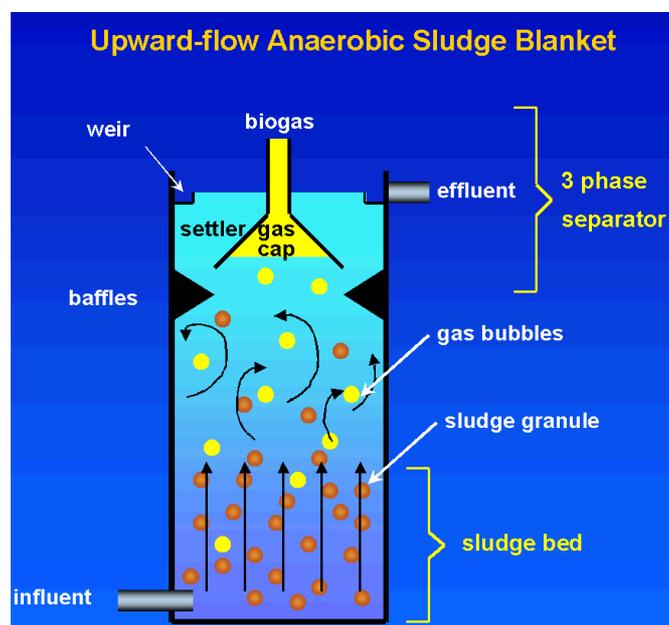


Figura 23. Esquema de un reactor de tipo UASB. Dispone de retenedores de la biomasa (baffles) y de un sistema de recogida de efluente líquido (weir)²⁹

El proceso UASB se inventó a mediados de los 70 en la Universidad de Wageningen (Holanda) por un equipo dirigido por el Doctor Gazte Lettinga y se aplicó por primera vez a escala industrial en una industria azucarera alemana. Durante varios años, fue continuamente mejorado para el tratamiento de grandes caudales de aguas residuales, y cargas con importantes fluctuaciones diarias.

Algunos datos y recomendaciones de operación resultado de recomendaciones resultantes de la experiencia que poco a poco fue apareciendo, ayudó a que este tipo de sistemas se use para el tratamiento en diferentes condiciones. El UASB es un sistema trifásico de alta carga que opera como un sistema de crecimiento en suspensión. La elevada concentración de biomasa en el UASB lo hace más tolerante a la presencia de tóxicos.

Consiste esencialmente en una columna abierta, a través de la cual el líquido residual se pasa a una baja velocidad ascensional. El manto de fangos se compone de gránulos o partículas además del agua residual. El fenómeno de granulación que rige la formación de los gránulos

²⁹ <http://www.uasb.org/discover/agsb.htm#uasb>



constituye la parte fundamental del proceso. El tratamiento del agua se da cuando se pone en contacto el agua con los gránulos. Los gases producidos bajo condiciones anaerobias provoca la recirculación interna, lo que ayuda en la formación y mantenimiento de las partículas biológicas, sobre las cuales algunas partículas de gas se adhieren. El gas libre y el gas adherido a gránulos se retienen en el colector de gas en la parte alta del reactor. El líquido que ha pasado a través del manto contiene algunos sólidos residuales y gránulos biológicos que pasan a través del sedimentador donde los sólidos se separan del futuro efluente. Los sólidos retornan por tanto al caer a través del sistema de baffle en la parte alta del manto de fangos.

Para lograr una operación correcta del sistema se requiere la formación de biomasa floculenta, y la puesta en marcha suele requerir la inoculación previa del reactor con grandes cantidades de fangos de algún otro sistema de operación.

El proceso UASB se puede aplicar a una amplia variedad de aguas residuales industriales. Al igual que en otros tipos de tratamiento de aguas residuales, en los UASB también son necesarias unas etapas previas de adecuación del afluente antes de ingresarlas al reactor, como por ejemplo, eliminación de aceites y grasas, desarenado, corrección de pH,...Tras este tipo de pretratamientos, el UASB puede convertir el 70-95% de la materia orgánica biodegradable en una corriente de biogás valorizable. De ahí que sean posibles mayores eficiencias mediante el acople de pre- y/o postratamientos adecuados que aumente el tiempo medio de residencia celular, la composición y la resistencia frente a tóxicos del fango.

La tecnología de alta carga se basa en el crecimiento del fango granular y en el separador de tres fases (biogás-líquido-sólido), ha tenido un gran éxito comercial con un gran número de instalaciones en el mundo.

La industria alimentaria mundial es un usuario activo de esta tecnología de tratamiento anaerobio. Aunque también se ha implantado en industrias como la cervecera, destilería, plantas de procesado de la patata, la industria del papel y la celulosa, industria textil, química y farmacéutica.

- **Reactor de tipo EGSB**

Los reactores tipo EGSB son, básicamente, una versión más evolucionada de los UASB, en los que se produce, adicionalmente al funcionamiento del UASB, una recuperación del efluente, que se vuelve a recircular, con lo que se optimiza la producción del biogás. Es un caso similar al de los RMC sin y con recirculación, aunque utilizando un lecho granular.

Además, el diseño tubular de los reactores, que se hacen más alargados que los UASB, permite una mayor velocidad de flujo del afluente, lo que hace que aumente parcialmente el tamaño del lecho granular, y se optimice el contacto entre los gránulos y el sustrato.

Los reactores EGSB son adecuados para el tratamiento de aguas residuales con baja carga orgánica (hasta 2 gramos de DQO por litro), o para residuos con partículas en suspensión cuya decantación no sería recomendable en el tanque de proceso.



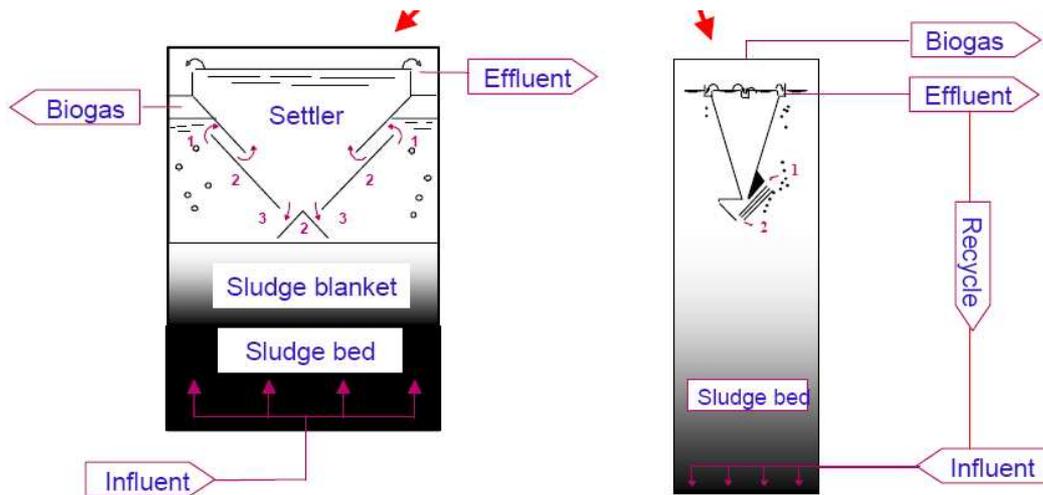


Figura 24. Comparativa de un reactor de tipo UASB (izquierda) con uno de tipo EGSB³⁰

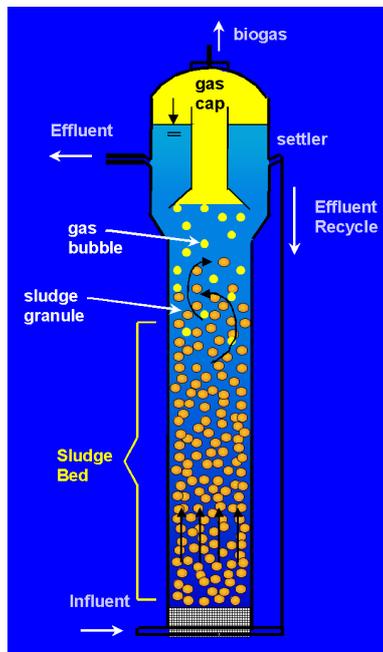


Figura 25. Esquema de funcionamiento de un reactor de tipo EGSB. Estos reactores son similares a los UASB, aunque se optimiza el contacto entre el lecho de lodos y el afluente, y cuentan con un dispositivo de recirculación del efluente³¹

2.4.3. El mercado de digestores anaerobios

Es preciso señalar cuáles son los modelos de digestores anaerobios más frecuentes en el mercado, lo que ya de por sí da una imagen bastante aproximada de la funcionalidad, rentabilidad y adaptabilidad de cada tipo de reactor. En el siguiente gráfico se muestra cuál es la distribución mayoritaria de los sistemas de digestión existentes:

³⁰ 031.LEAF.2008.Look Hulshoof. *Biogas Technology in Europe*

³¹ <http://www.uasb.org/discover/agsb.htm#egsb>



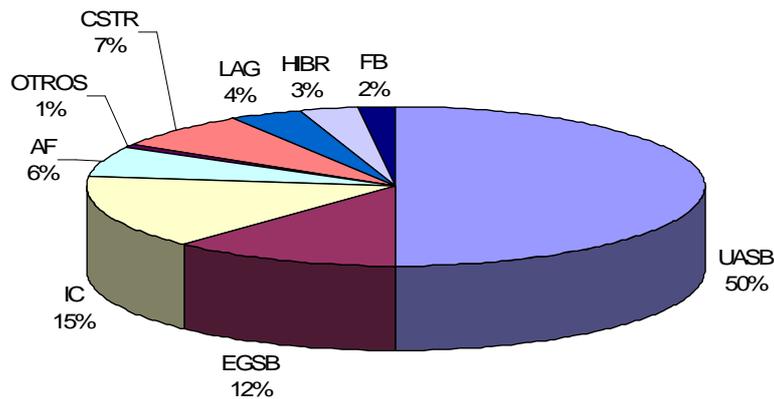


Figura 26. *Tecnologías de Digestión Anaerobia en el mercado. AF: Filtro Anaerobio; CSTR: Continuous Stirred Tank Reactor; LAG: Lagunas anaerobias; HBR: Híbridos (AF+UASB); FB: Lecho Fluidificado.*³²

2.5. Técnicas de codigestión

La codigestión consiste en emplear una mezcla de diferentes tipos de residuos, de forma que se optimice la producción de biogás a obtener por la planta.

La principal ventaja radica en el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas, compensando las carencias de cada uno de los sustratos por separado. Además de incrementar el potencial de producción de biogás, la adición de co-sustratos fácilmente biodegradables confiere una estabilidad adicional al sistema.

Otra ventaja de esta técnica es el hecho de optimizar la entrada de sustratos en la planta, reduciendo por tanto el volumen de residuos global no aprovechable. Dicho de otro modo, el aprovechamiento conjunto de dos sustratos diferentes, por ejemplo, purines de cerdo y residuos hortofrutícolas, supone no sólo la reducción de los volúmenes de ambos tipos de residuos, sino también disminuir la dependencia que tendría la planta del aporte de un único residuo del que nutrir a la instalación.

En una práctica muy extendida por Europa se mezclan sustratos de menor potencial metanogénico pero de características muy favorables al proceso de digestión anaeróbica, como lo residuos de la ganadería, con otros sustratos de gran poder energético disponibles en menor cantidad, como los residuos de mataderos, de la industria agroalimentaria, o cultivos herbáceos energéticos.

Dichos residuos ganaderos, y en concreto los purines de cerdo, pueden ser una buena base para la codigestión ya que, generalmente, presentan un contenido en agua más elevado que la mayoría de residuos industriales, una mayor capacidad tampón y aportan una amplia variedad de nutrientes necesarios para el crecimiento de microorganismos anaerobios. Sin embargo, los residuos orgánicos de la industria alimentaria presentan deficiencias en nutrientes para el desarrollo de microorganismos anaerobios, baja alcalinidad o excesivo contenido en sólidos que provoquen problemas mecánicos.

³² 031.LEAF.2008.Look Hulshoof. *Biogas Technology in Europe*

	MÍN	MÁX	MEDIA
Sólidos Totales – ST (%)	1,4	16,9	6,4
Sólidos Volátiles – SV – sobre ST (%)	44,5	76,4	65,5
N – Amoniacal (mg/L)	1.673,8	7.558,4	4.383,5
N –Orgánico (mg/L)	396,4	3.672,3	1.529,3
SST (%)	0,4	15,5	4,8
SST/ST (%)	30,5	96,2	67,2
SSV (%)	0,3	11,5	3,8
SSV/SV (%)	50,1	99,3	78,8
SSV SOBRE SST (%)	56,5	97,5	78,6
DQO (mg/L)	8.660,0	186.084,3	71.591,7
DQO/SV (g DQO/g SV)	1,22	2,39	1,69
Fósforo – P (mg/L)	90,9	6.255,4	1.406,9
Potasio – K (mg/L)	1.657,0	7.791,3	4.929,7
Alcalinidad parcial (pH=5,75)	0,9	23,2	11,0
Alcalinidad total (pH=4,3)	1,3	45,2	19,2
Relación alcalinidad (RA)	0,2	0,7	0,4
	MÍN	MÁX	MEDIA
Cobre – Cu (mg/L)	7,6	170,3	41,3
Zinc – Zn (mg/L)	7,6	120,8	63,4
pH	6,6	8,7	7,7

Figura 27. Características que presentan los purines de cerdo³³

Los residuos presentan potenciales de producción variables, pero usualmente elevados cuando contienen un elevado contenido de lípidos. Son de destacar la elevada potencialidad de producción para los aceites vegetales y la baja producción para los lodos residuales de plantas depuradoras, básicamente por su baja concentración en materia orgánica (alto contenido en agua).

Un aspecto muy importante en este sentido es el contenido en Nitrógeno de los residuos, ya que la urea y otros compuestos nitrogenados en altas concentraciones inhiben el desarrollo de la reacción por parte de las bacterias metanogénicas, lo que supone un inconveniente de cara al proceso. Por ello, es fundamental establecer una mezcla de residuos que, en codigestión, puedan compensar las carencias de uno y otro tipo.

Seguidamente se indican las características relativas para la codigestión de diferentes residuos orgánicos, donde flechas de sentidos diferentes indican un posible interés en la mezcla, al compensarse la carencia relativa de uno de los dos residuos. La alcalinidad de los lodos de planta depuradora presenta tal variabilidad que es difícil su caracterización relativa.

³³ 001. GIRO.2008. Codigestión anaerobia de deyecciones ganaderas.



Origen residuo orgánico	Residuos ganaderos	Lodos depuración	Fracción Orgánica Res. Mun.	Residuos Industria Alimentaria
Micro y macronutrientes	↑	↑	↓	↓
Relación C/N	↓	↑ ↓	↑	↑
Capacidad tampón (alcalinidad)	↑		↓	↓
Materia orgánica biodegradable	↓	↑ ↓	↑	↑

Figura 28. Caracterización relativa para la co-digestión de diferentes residuos orgánicos³⁴

A continuación se procederá a analizar pormenorizadamente la susceptibilidad de codigestión de varias mezclas de sustratos.

2.5.1. Codigestión de Residuos Ganaderos y Agroindustriales

Los residuos ganaderos son, en la mayoría de países, los residuos orgánicos que se producen en mayor cantidad (en España se producen del orden de cincuenta y dos millones de toneladas de purines) y la digestión anaerobia es un proceso idóneo para llevar a cabo el tratamiento de estos residuos.

Sin embargo, la producción de metano que se obtiene de dichos residuos no es muy cuantiosa, como se puede apreciar en la siguiente tabla:

	m ³ CH ₄ /t residuo	m ³ CH ₄ /t SV
Purín de porcino	11,8	347
Purín de vacuno	17,7	196
Gallinaza	54,4	272

Figura 29. Producción de metano a partir de residuos ganaderos³⁵

El aprovechamiento energético de dichos residuos genera dos importantes beneficios ambientales:

- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero como consecuencia de la gestión de los estiércoles mediante sistemas convencionales.
- Eliminación de un residuo con alto potencial contaminante, debido a su contenido en nitrógeno.
- Sustitución del consumo de combustibles fósiles, lo que favorece la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero que se derivan del uso de éstos.

³⁴ 003. IDAE.2007. Biomasa. Digestores Anaerobios

³⁵ 002.PBG.2009. Manual Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales.



Este doble efecto sólo se consigue si se optimiza tanto la producción como el uso de la energía obtenida en forma de biogás. Para obtener dicho efecto se empleará la codigestión de los citados Residuos Ganaderos con la adición de Residuos Agroindustriales.

Aparte de los mencionados, el aprovechamiento energético de los residuos ganaderos se beneficia de las ventajas propias de todas las fuentes de energía renovable: contribución a la diversificación energética, garantía de suministro eléctrico, disminución de la dependencia de los combustibles fósiles y fomento del empleo.

2.5.1.1 Codigestión de residuos ganaderos y residuos de la industria aceitera

En la industria aceitera, importante en nuestro entorno por su abundancia y potencialidad, uno de los principales residuos generados en el proceso de extracción de aceite de oliva es el alperujo, constituido por una mezcla de alpechines y restos de aceituna.

La fermentación del alperujo por sí solo presenta diversos problemas debidos a:

- Alto contenido en materia orgánica (lípidos, principalmente) que afectan negativamente al proceso de digestión anaerobia.
- Alta concentración de compuestos tóxicos (polifenoles).
- Baja concentración de nutrientes esenciales (N).
- Baja alcalinidad.

Potencialmente, la codigestión del alperujo con los purines resultaría viable desde el punto de vista económico³⁶, ya que se compensarían las carencias de cada uno de estos residuos para la biometanización. No sería necesario el aporte de nutrientes o la adición de reactivos químicos para mejorar la capacidad tampón del sistema. Para conseguir dicha eficiencia en el proceso de codigestión, el alperujo debe pasar un proceso previo de pretratamiento térmico.

Sin embargo, el problema más claro en esta posibilidad de codigestión es que no existe ninguna planta en operación³⁷ actualmente, por lo que resultaría imprescindible conocer:

- Tipo de reactor
- Mezcla idónea
- Pretratamientos para la mezcla combinada
- Condiciones óptimas para el proceso
- Otros parámetros de proceso

Existen no obstante estudios teóricos desarrollados por diferentes grupos de investigación, que sitúan el porcentaje idóneo de purín en la mezcla situado en el rango entre el 10-25 % de purín³⁸ (Angelidaki et al., 1997).

³⁶ 004.PBG.2009.Potencialidad biogás. Genera 2009

³⁷ 002.PBG.2009.Manual Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales.

³⁸ 002. PBG.2009. Manual Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales.



En la siguiente figura³⁹ se observan las características de los distintos sustratos, donde los purines presentan altas concentraciones de agua y pocos sólidos volátiles, mientras que la concentración de sólidos volátiles en el alperujo se encuentra en mayor cantidad.

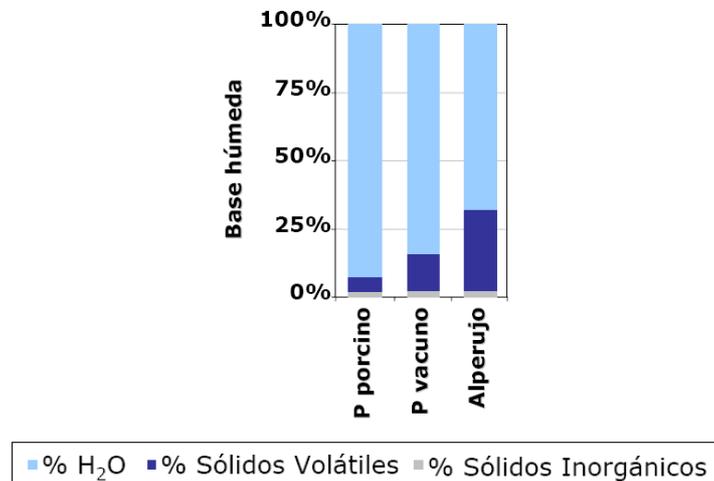


Figura 30. Características de los sustratos

2.5.1.2 Codigestión de residuos ganaderos y residuos hortofrutícolas

Otra de las posibilidades de codigestión existentes es la del aprovechamiento de los residuos hortofrutícolas, procedente de industrias como las de elaboración de mermeladas, zumos y otros alimentos procesados, junto con los purines.

La industria de los zumos es un claro ejemplo de producción de grandes cantidades de residuos hortofrutícolas. Presentan altas concentraciones de grasas, aceites, azúcar y proteínas, lo que les da un alto potencial para la producción de metano.

Para conseguir la máxima eficacia en el proceso destinado a la codigestión anaerobia, los residuos hortofrutícolas utilizados deben pasar un previo proceso de pretratamiento. En dicho proceso encontramos dos tipologías existentes:

- Pretratamiento mecánico: Trituración.
- Pretratamiento biológico: Compost maduro y un cultivo de hongos. Pretratamiento enzimático con residuos cárnicos.

En la siguiente tabla se recoge el potencial de producción de metano de diferentes frutas y vegetales:

³⁹ 004. PBG.2009. Potencialidad biogás. Genera 2009



Residuo	SV (% de ST)	Producción de metano (m ³ /t SV alimentado)
Mango	95,7	469
Plátano	91,2	292
Naranja	93,5	479
Mandarina	94,6	471
Limón	96,8	473
Piña	93,9	356
Uva	91,1	232
Tomate	95,3	298
Cebolla	88,2	400
Patata	90,9	267
Berenjena	92,6	385
Coliflor	84,6	261
Nabo	84,4	314
Rábano	83,3	299

Figura 31. Producción de metano en residuos de frutas y vegetales (rango mesofílico, 35°C)⁴⁰

En este caso sí existen plantas en funcionamiento, por lo que el procedimiento es mejor conocido que el del alperujo. En la siguiente tabla se muestran algunas plantas de biometanización que utilizan como combustible de codigestión purines y residuos hortofrutícolas:

⁴⁰ 002. PBG.2009. Manual Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales.



Planta	Descripción
Miralcamp (Lérida-España)	Purín de cerdo Co-sustratos: aceite de soja, fangos depuradoras agroindustriales, residuos de mermeladas y residuos de patata Reactor CSTR de 1360 m ³ 50 t mezcla/día (3,5% m.s.), TRH de 30 días, 35°C 40 m ³ biogás /t mezcla, >65% de CH ₄
Vila-Sana (Lérida-España)	Purín de cerdo (80%) Co-sustratos (20%): Residuos orgánicos de la zona como derivados de alcohol, derivados de aceites vegetales, lodos de depuradora de aguas industriales, derivados de frutas, cebolla y leche 2 digestores de 1270 m ³ 30,7 t mezcla/día; TRH de 15 días, 52-55°C 71,4 m ³ biogás /t mezcla
Cudwoth Pork (Canadá)	Purín Co-sustrato: patatas Reactor de 2000 m ³
Granja Kotimäki (Halsua-Finlandia)	Purín de cerdo Co-sustrato: lodo seco, pieles de patatas y residuos biodegradables procedentes de la industria de la madera Reactor de 250 m ³ , 55°C

Figura 32. Plantas de biometanización con codigestión de purines y residuos hortofrutícolas⁴¹

En cuanto a las posibilidades existentes, dentro de la amplísima variedad existente en este tipo de residuo, las más usadas son las patatas. Presentan una alta potencialidad, por la abundancia de residuos generados y de terrenos de cultivo en nuestro territorio, las naranjas (el volumen de cáscara es muy alto) y la remolacha (residuos de la industria azucarera presentan una alta potencialidad para la generación de biogás).

En el caso de la remolacha, existe en La Rinconada (Sevilla) una planta de biogás activa, asociada a la azucarera existente, a partir de residuos de dicha industria.

La potencialidad de este residuo es muy reseñable, aunque dependiente (en general) de un pretratamiento, que multiplica su potencialidad, como se aprecia en las siguientes imágenes:

⁴¹ 002. PBG.2009. Manual Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales.



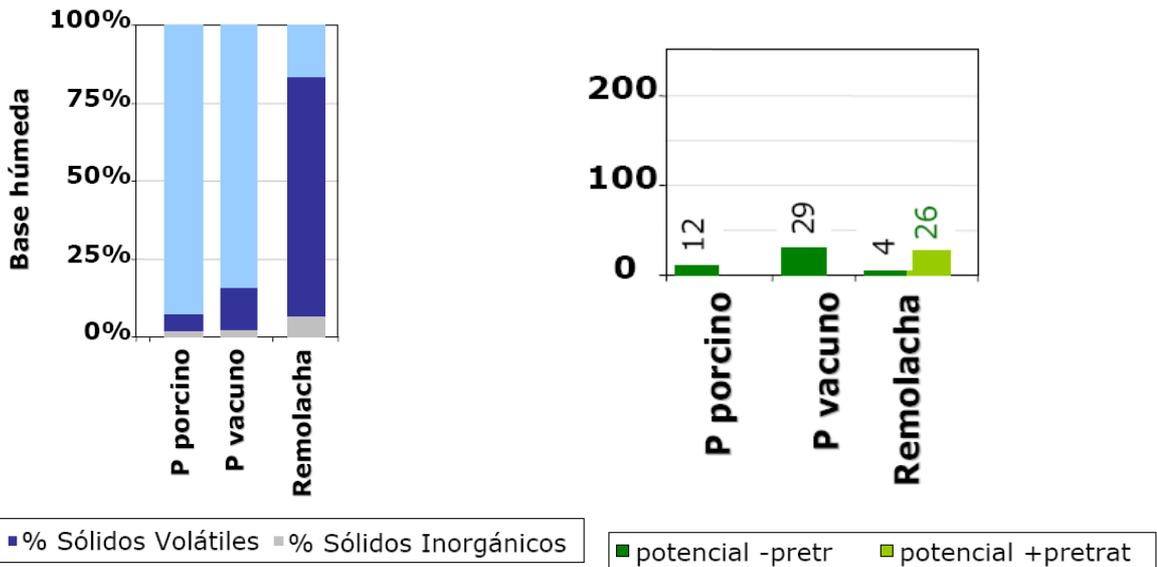


Figura 33. Base húmeda y potencial de producción de biogás en purines y remolacha⁴²

Se han realizado diversos estudios a escala de laboratorio sobre el proceso de codigestión de purín y residuos de fruta. En la siguiente tabla se recogen las composiciones medias de las experiencias que han sido ejecutadas con mezclas de purines y residuos de la industria de los zumos de fruta, en nuestro caso de la pulpa de pera y manzana.

	Purín Cerdo (%)	Pulpa Pera (%)	Agua (%)	ST (%)	SV (%)	DQO (g/kg)	N _{TKN} (g/kg)	N-NH ₄ ⁺ (g/kg)	pH	Alc. (g/kg)
T1	100	-	-	7,92	5,87	82,50	5,06	3,43	8,06	10,55
T2	95	-	5	7,52	5,58	78,37	4,82	3,28	7,96	10,05
T3	87,5	-	12,5	6,93	5,14	72,18	4,44	2,97	8,03	8,98
T4	80	-	20	6,33	4,69	66,00	4,05	2,70	7,95	8,20
T5	95	5	-	9,29	7,29	102,40	4,91	3,21	7,55	9,75
T6	87,5	12,5	-	11,35	9,45	132,30	4,98	3,01	7,25	8,73
T7	80	20	-	13,41	11,63	162,10	4,66	2,71	6,88	7,58
T8	-	20	80	7,08	6,98	96,14	0,89	0,08	3,45	0,00

Figura 34. Composiciones de los residuos utilizados en los ensayos de codigestión⁴³

En la imagen que se muestra a continuación⁴⁴ se representa la producción acumulada de metano en viales de 120 ml tratando muestras de 50 g de mezclas de purines con residuos de industria alimentaria a 35 °C, según lo indicado en la tabla anterior (Campos et al., 1999).

⁴² 004. PBG.2009. Potencialidad biogás. Genera 2009

⁴³ 007. ULL.2001. Aplicación Agrícola de Residuos Orgánicos

⁴⁴ 001. GIRO.2008. Codigestión anaerobia de deyecciones ganaderas



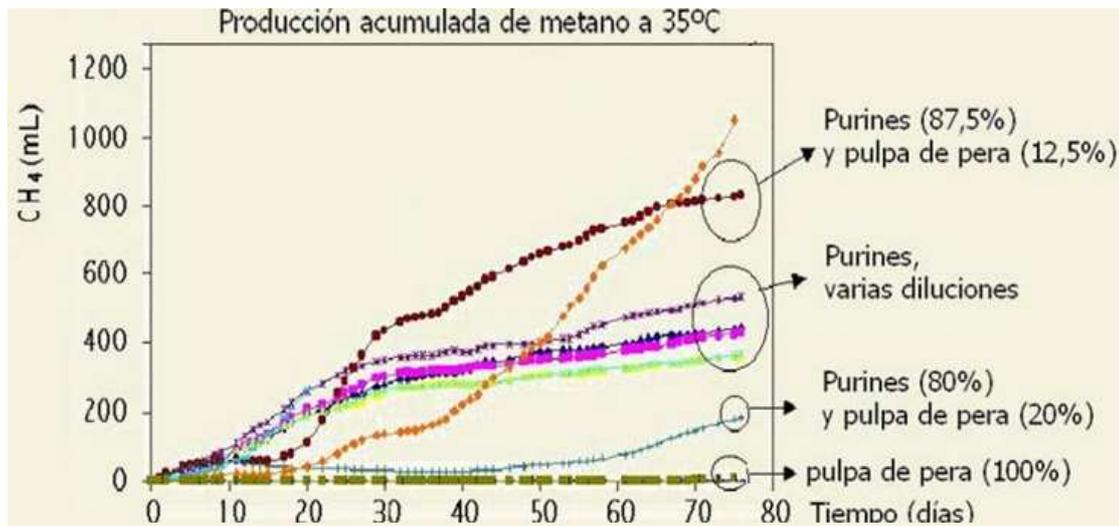


Figura 35. Producción acumulada de metano a 35°C

Los resultados muestran que las producciones más elevadas de biogás se alcanzaron cuando se emplearon mezclas con un contenido pulpa de pera entre el 10 y el 15% (v/v).

Residuo fruta en la mezcla (%)	Producción biogás (m ³ / m ³ mezcla)	Contenido de metano (%)
10	12.,11	69
15	22,79	58

Un estudio que ilustra a la perfección las ventajas de la codigestión con residuos vegetales es el desarrollado por Callaghan y colaboradores en 1999⁴⁵, en el que se compara la generación de biogás y metano en varias mezclas de purín y restos vegetales, en diferentes proporciones. Las mezclas fueron las siguientes:

Restos vegetales (%SV)	Purín (%SV)
0	100
25	75
50	50
75	25

Tras la digestión anaerobia, los resultados obtenidos fueron los siguientes, siendo el proceso más exitoso en cuanto a producción de metano el analizado añadiendo el 25 % de restos vegetales (VPW).

% VPW añadido	L biogás / kg SV eliminado	% Metano	L metano /kg SV eliminado
0	202	70,68	143
25	654	74,51	487
50	492	78,30	385
75	419	75,90	318
100	387	75,53	292

⁴⁵ 005. ITA. Valorización de purines, gallinaza y residuos vegetales mediante codigestión anaerobia.



Con esta ilustración⁴⁶ se aprecia claramente la ventaja evidente de realizar codigestión, en lugar de purín únicamente:

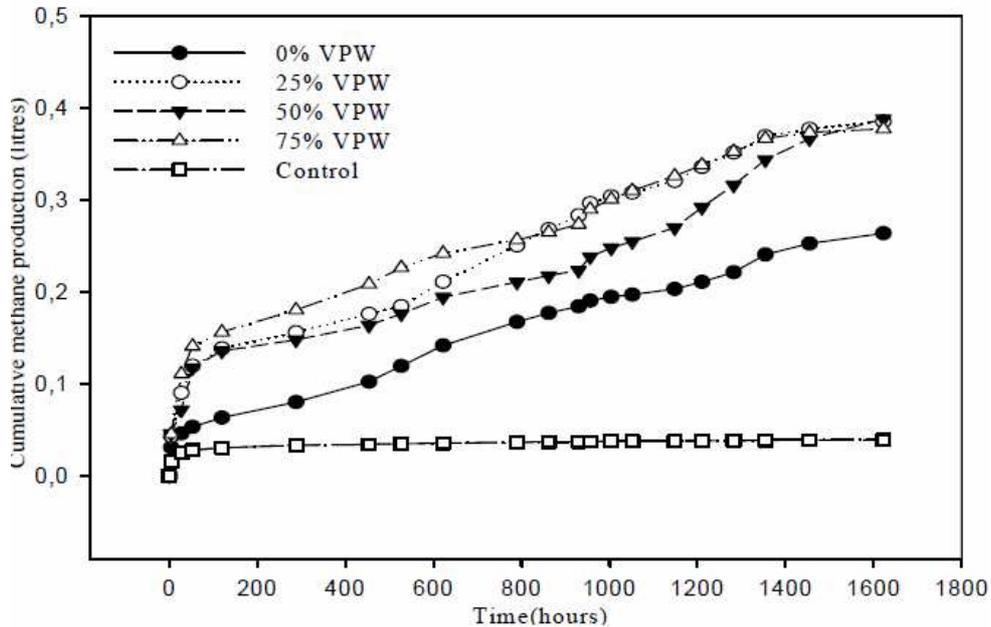


Figura 36. Producción de metano acumulada (VPW: Residuos vegetales)

Otro tipo de residuo agrícola susceptible de ser aprovechado, de manera bastante común es el maíz, que presenta unas características favorables para obtener una alta producción de biogás mediante digestión anaerobia, existiendo incluso plantas que funcionan exclusivamente con este tipo de residuo. La composición de dicho sustrato viene representada principalmente por:

- 60-70 % Carbohidratos
- 10-12 % Proteínas
- 2-3 % Grasas
- 10-15 % Agua

En la siguiente tabla se recogen las producciones de biogás para cada uno de dichos componentes (Rutledge, 2004):

Componente	Producción biogás (m ³ N/t)	% Metano
Grasas	1.390	69
Proteínas	650	78
Carbohidratos	850	50

Figura 37. Biogás producido durante la completa degradación de 1kg de sustrato⁴⁷

⁴⁶ 005. ITA. Valorización de purines, gallinaza y residuos vegetales mediante codigestión anaerobia.



Para conseguir una alta efectividad en la codigestión y obtener elevadas cantidades de biogás el sustrato de cultivo utilizado debe pasar por una fase previa de pretratamiento en el que, a partir de medios mecánicos de trituración se conseguirá una mezcla donde la fermentación se verá mejorada.

En la actualidad existe gran experiencia en dicho proceso, existiendo un gran número de plantas en toda Europa, en general, y en Alemania, en particular. En general, los parámetros de proceso de este tipo de plantas son los siguientes:

- Rango mesofílico.
- Reactores agitados.
- Tiempos hidráulicos de residencia que van desde los 22 a los 77 días.

El contenido de metano en el biogás obtenido en las distintas plantas se mantiene en unos valores entre 55-75 %, siendo las proporciones de los sustratos utilizados muy variables. Las mayores producciones de biogás mediante codigestión de residuos ganaderos y de residuos de maíz se han dado en la planta de Archea, en Suedhorsten – Alemania, a partir de los siguientes parámetros de proceso:

- Proporciones Purín:Cultivo de 1:7.
- Reactores de dos fases:
 - Primer rango mesofílico (37-38 °C).
 - Segundo rango termofílico (50-53 °C)
- Tiempos hidráulicos de residencia entre 15-20 días.
- Producciones de biogás superiores a 200 m³/t.
- Contenido de metano en el biogás de 52-56 %

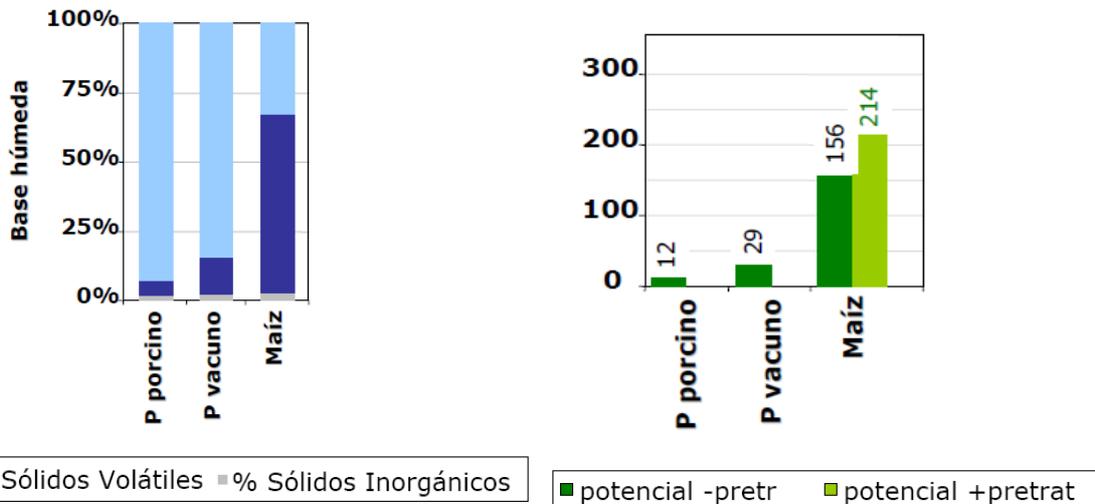
El cultivo más utilizado en este sentido es el maíz, que en codigestión con los purines maximiza la producción de biogás. Los restos de maíz optimizan la producción si se someten a un pretratamiento mecánico de trituración, como se aprecia en las siguientes imágenes, que reflejan la alta potencialidad del maíz para la producción de biogás⁴⁸.

Por lo general, en las plantas existentes, el rango de operación en temperatura es el mesofílico, con reactores agitados y TRH entre 12 horas y 40 días. El contenido en metano del biogás oscila entre el 51 y 56%.

⁴⁷ 002. PBG (2009). *Manual Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales*.

⁴⁸ 004. PBG (2009). *Potencialidad biogás. Genera 2009*





2.5.2. Codigestión de residuos ganaderos y residuos de matadero

La codigestión de residuos ganaderos y residuos de mataderos en sistemas de mezcla completa es una metodología exitosa tanto en régimen termofílico como en el mesofílico, en base al contenido graso de los residuos animales. Codigiriendo mezclas de varios tipos de residuos de industrias cárnicas y mataderos, pueden conseguirse altas producciones de metano, del orden de 47 m³/m³ de residuo introducido (Brinkman, J., 1999).

Dichos residuos procedentes de matadero para su correcto empleo deben superar un proceso previo de pasteurización o esterilización cuando estos vayan a ser utilizados en tierras agrícolas. Este proceso, como se comentó anteriormente, mejora el rendimiento de producción de metano, aumentándolo hasta cuatro veces con respecto al producido mediante el uso de dichos residuos no pasteurizados (Rutledge, 2004). Este incremento en la productividad es debido a que tras el tratamiento de pasteurización en el que el residuo se mantiene un cierto tiempo a altas temperaturas, los lípidos quedan más accesibles para la digestión anaerobia. En la siguiente tabla se observan las producciones de metano para diferentes subproductos animales con y sin pretratamiento previo de esterilización según estudios realizados en ensayos en discontinuo por el *Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineering (JTI)*.

Residuo	Producción CH ₄ (m ³ /t)
Subproductos animales pasteurizados	225
Subproductos animales no pasteurizados	56
Mezclas de residuos de matadero	160
Residuos domésticos	130
Purines*	13

*Purines con contenido en sólidos volátiles (SV) del orden de 60-80 kg/t purín

Figura 38. Producción de metano a partir de la digestión anaerobia de diferentes subproductos animales (ensayos en discontinuo)⁴⁹

⁴⁹ 002. PBG (2009). Manual Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales.



Análogo al estudio anterior, Edström et al. (2003) analizaron el efecto que tiene en la producción de metano la pasteurización de dichos residuos llegando a los mismos resultados que la anterior investigación. Tras dicha investigación en reactor CSTR convencional se obtuvieron resultados como los siguientes⁵⁰:

Harina cárnica en mezcla (%)	Tiempo retención Hidráulica (días)	Velocidad de carga orgánica ($\text{kg}_{\text{sv}}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$)	Producción de Biogás ($\text{m}^3/\text{t}_{\text{sv}}$)
8	22 - 39	2,5 - 5	1.140
15	22	3,2 - 5	700

Otro dato significativo es la diferencia existente entre las producciones de metano para residuos de matadero de ganado bovino y porcino, ya que los restos de ganado bovino producen unas nueve veces más metano que obtenido por los restos de ganado porcino.

Actualmente existen numerosas plantas industriales que realizan la codigestión a partir de residuos ganaderos y subproductos animales obteniendo buenos resultados en producción de biogás. Dinamarca es el país que cuenta con el mayor número de ellas con la particularidad de que además también tratan residuos de actividades pesqueras. En general, las plantas que codigieren estos residuos tienen unas características bastante estandarizadas, pudiendo resumirse a continuación las generalidades entre estos tipos de instalaciones:

- La gran mayoría trabajan en rango termofílico, estando la etapa de higienización englobada en el proceso de digestión.
- Las plantas que trabajan en rango mesofílico efectúan pretratamiento previo de higienización durante 1 hora a 70°C.
- En la mayoría de las plantas expuestas, restos de comida, residuos lácteos o arcillas usadas en la industria aceitera son comúnmente introducidos junto con los purines y restos de matadero.
- La proporción en la mezcla de residuos ganaderos está en torno al 85%.
- Producción de biogás en torno a 40-50 m³/t mezcla.
- Contenido en metano del biogás mayoritariamente superior al 65%.

Numerosas investigaciones han sido llevadas a cabo en relación con la digestión anaerobia de los residuos animales generados de los mataderos, aunque no se encontraron experiencias a escala de laboratorio de codigestión de residuos ganaderos y residuos de matadero, en la actualidad existen numerosas plantas a escala industrial que realizan la codigestión con ese tipo de mezcla. En España destaca la planta de Juneda – Lérida, que funciona mediante el aprovechamiento de esta mezcla.

2.5.3. Codigestión de Residuos ganaderos y residuos pesqueros

Dicho proceso de codigestión presenta buenos resultados debido a la disparidad de características que presentan dichos sustratos:

⁵⁰ 002. PBG (2009). Manual Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales.



	Humedad	Sólidos Volátiles
Residuos ganaderos	↑	↓
Residuos pesqueros	↓	↑

El efecto de inhibición de la actividad metanogénica específica es un hecho presente y a tener en cuenta en los procesos de codigestión en los que se tiene como co-sustrato residuos pesqueros debido a la presencia de altas concentraciones de sal.

Diversas investigaciones llevadas a cabo a partir de dicho co-sustrato con diferentes procedencias dieron como resultado las concentraciones limitantes de NaCl en las que se produce la inhibición de la actividad metanogénica.

Procedencia residuo pesquero	Tª(°C)	Reactor	Concentración limitante	Referencia
Agua residual procesado almeja	32	UASB	13,35 g Na ⁺ /L	Boardman, 1995
Agua residual procesado comida precocinada de pescado	37	Filtro anaerobio	30 g NaCl/L	Vidal, 1997
Lodo salino de piscifactorías	35	Discontinuo	26 g NaCl/L	Gebauer, 2004

En la tabla que se muestra a continuación⁵¹ se incluye un listado de las características presentadas por diversos residuos pesqueros y sus producciones de biogás.

A continuación se muestra una tabla con el potencial de producción de biogás por parte de los residuos pesqueros, aunque en este caso, en codigestión⁵²:

Alimentación	Composición alimentación	Operación	Producción gas	% CH ₄	Referencia
Residuos de cangrejo		HSBF (operación en percolación e inundado) 35 °C	250-290 m ³ CH ₄ /t SV ⁽¹⁾	> 70	O'Keefe et al. (1996)
Residuos sólidos de piscifactorías		UASB 24-25°C HRT: 22-38 d VCO: 0,23-0,75 g SV/L/d	400-600 m ³ biogás/t SV ⁽²⁾	80	Lanari y Franci (1998)
Lodo de piscifactorías salino	ST: 4,1-5,1% (sin diluir) Na: 5,3 g/L S‰: 17,5 VFA: 0,6 g/L	CSTR semicontinuo Lodo diluido 1:1 HRT: 30 d 35 °C	220 m ³ CH ₄ /t SV ⁽³⁾	57,6	Gebauer (2004)

⁵¹ 002.PBG.2009.Manual Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales

⁵² 002.PBG.2009.Manual Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales



Alimentación	Composición alimentación	Operación	Producción gas	% CH ₄	Referencia
Pulpa sisal y residuos de pescado		Ensayos en batch 27°C HRT: 24 d	440-620 m ³ biogás/t SV ⁽¹⁾	58-65	Mdhandete et al. (1999)
20% residuos de pescado (cabezas, colas y vísceras de trucha), 70% purín de vacuno	93 g SV/L	Ensayos en batch 35°C 79,2 g SV/L	Residuos de pescado: 380 m ³ CH ₄ /t SV ⁽¹⁾ Purín vacuno: 300 m ³ CH ₄ /t SV ⁽¹⁾		Callaghan et al. (1999)
97% estiércol cerdo, 2% residuo de aceite de pescado, 1% bentonita-bound oil		30°C HRT: 15 d	184 m ³ CH ₄ /t SV ⁽²⁾	65	Francese et al. (2000)
Residuos matadero, industriales, restaurantes y estiércol de cerdo	9,7-10,3% ST C/N: 8-11	CSTR 35°C OLR: 2,6-3,1 g/L/dHRT: 28-36 d	800-1000 m ³ CH ₄ /t SV ⁽²⁾	68,2-70,5	Murto et al. (2003)
20% residuos repostería, 80% estiércol de vaca	25% ST (res. orgánicos) 5,9-8% ST (estiércol)	CSTR 35/55°C OLR: 2,3-2,5 g/L/dHRT: 15/20 d	190-290 m ³ CH ₄ /t SV ⁽²⁾		Paavola et al. (2006)

⁽¹⁾ Ensayos en discontinuo a escala de laboratorio; ⁽²⁾ Ensayos en continuo a escala laboratorio



Alimentación	Composición alimentación	Operación	Producción gas	% CH ₄	Referencia
Aceite y residuos pesqueros	SV: 8-44%		360-750 m ³ CH ₄ /t SV (43-389 m ³ biogás/ton) ⁽⁴⁾		Folkecenter (2005)
Agua de industria de productos del mar (30 g NaCl)		AF VCO: 5,7-7,1 g/L/d 37°C	170 m ³ CH ₄ /t DQO ⁽¹⁾		Vidal et al. (1997)
Agua de cocción de cangrejo azul			6,6-10,0 m ³ biogás/ m ³ alimentación ⁽¹⁾ (68% CH ₄)		Rodenhizer and Boardman (1999)
Efluente residual de procesado atún		Lecho fijo ascendente 30°C	180 m ³ CH ₄ /t SV ⁽¹⁾		Achour et al. (2000)
Agua sintética (conservera sardinas y atún)		30°C	230 m ³ CH ₄ /t SV ⁽¹⁾		Palenzuela-Rollon et al. (2002)

⁽¹⁾ Ensayos en continuo a escala laboratorio; ⁽²⁾ Ensayos en continuo a escala piloto; ⁽³⁾ Ensayos en semicontinuo a escala laboratorio; ⁽⁴⁾ Ensayos en continuo a escala industrial

El país pionero que cuenta con la mayoría de las plantas industriales que llevan a cabo dicho proceso de codigestión mediante la mezcla de residuos ganaderos y pesqueros es Dinamarca. En la mayoría de las plantas existentes, además de emplear purines y residuos pesqueros, se incluyen otros residuos en la mezcla como residuos lácteos, farmacéuticos e incluso residuos de mataderos.

De las plantas consultadas⁵³, las características presentadas son las siguientes:

- Regímenes de funcionamiento:
 - Mayoría en régimen termofílico (53-55°C), aprovechando dicha temperatura y tiempo de residencia para la eliminación de patógenos.
 - Las que operan en régimen mesofílico realizan etapa previa de higienización de 1 hora a 70°C.
- Reactores utilizados:
 - Verticales agitados o CSTR (Reactor continuo de tanque agitado).
 - Planta de Thorsø utiliza un CSTR seguido de un PFR (Reactor de flujo pistón).
- Mayor proporción de purín en la mezcla (70-90%).
- Producción de biogás variable estando entre 27-97 m³/t mezcla alimentada.
- Contenido de metano superior al 65%.
- Digestato utilizado como fertilizante en todas las plantas.

⁵³ 006.USD.2000.Danish Centralised Biogas Plant. Plant Descriptions



2.5.4. Codigestión de residuos ganaderos y residuos de la industria láctea

La codigestión con los residuos de la industria láctea resulta en la actualidad relativamente desconocida⁵⁴, pese a que se conoce la potencialidad de este tipo de sustrato para la producción de biogás. Actualmente se encuentra en desarrollo un proyecto de investigación, dentro de las actuaciones incluidas en el marco de Probiogás, sobre este tipo de codigestión, que se está desarrollando en la planta de COVAP situada en el Valle de los Pedroches (Córdoba).

En España existe una planta que utiliza la codigestión de residuos lácteos con restos de fruta y otros residuos orgánicos, situada en Vila – San (Lérida). En la siguiente tabla se muestran los datos técnicos de dicha planta.⁵⁵

Planta	Descripción
Vila-Sana (Lérida-España)	<p>Purín de cerdo (80%)</p> <p>Co-sustratos (20%): Residuos orgánicos de la zona como derivados de alcohol, derivados de aceites vegetales, lodos de depuradora de aguas industriales, derivados de frutas, cebolla y leche</p> <p>2 digestores de 1270 m³</p> <p>30,7 t mezcla/día; TRH de 15 días, 52-55°C</p> <p>71,4 m³ biogás /t mezcla</p>

Figura 39. Datos técnicos de la planta industrial de biometanización de Vila-Sana, que codigiere residuos ganaderos y residuos de la industria láctea (TRH: Tiempo de residencia hidráulica)

2.5.5. Codigestión de residuos ganaderos y residuos de la fabricación de biodiésel

La producción de biodiésel a partir de aceites vegetales o grasas animales produce una gran cantidad de glicerina como subproducto (aproximadamente un 10% de la materia que entra en la planta para la fabricación de biodiésel), por lo que se estima que en los próximos años habrá un excedente de glicerina a bajo precio en Europa. Dicho residuo presenta unas características muy favorables para ser usado como co-sustrato en procesos de codigestión con residuos orgánicos debido a las siguientes propiedades:

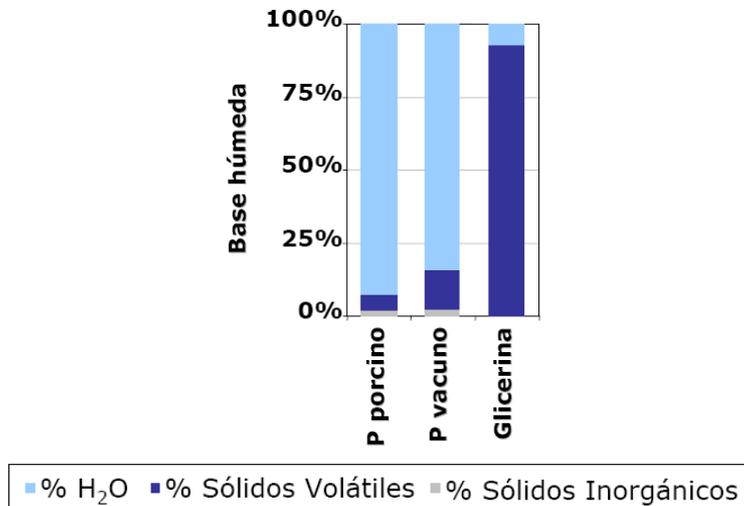
- Presenta un pH adecuado para la digestión anaerobia.
- Alta biodegradabilidad (Alto contenido de sólidos volátiles).
- Compensa el efecto inhibitor causado por el nitrógeno amoniacal presente en los residuos tratados.
- Elevado contenido en Carbono que permite regular la relación C/N en la mezcla, evitando fenómenos de inhibición debidos al Nitrógeno.

⁵⁴ 002.PBG.2009.Manual Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales

⁵⁵ 002.PBG.2009.Manual Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales



En la siguiente imagen se muestran las características de la base húmeda de los diversos residuos a tratar en dicho proceso de codigestión:



2.5.6. Codigestión de residuos ganaderos y lodos de tratamiento de aguas residuales

Los residuos urbanos, en general, presentan altas concentraciones de materia orgánica fácilmente degradable (lípidos, carbohidratos y proteínas), por lo que presentan un mayor potencial de producción de biogás que los residuos ganaderos, lo que los hace ser buenos co-substratos de ser usados en procesos de codigestión anaerobia.

Los lodos de depuradoras contienen los nutrientes necesarios para el desarrollo de los microorganismos anaerobios así como la presencia de un alto contenido de nitrógeno, estando las relaciones de C:N entre 6:1 y 16:1 (Stroot *et al.*, 2001), pero mayoritariamente en forma orgánica por lo que no resulta tan problemático para el proceso de digestión anaerobia. Como contraposición, los lodos presentan altos niveles de contaminación debidos a metales pesados, por lo que dicho proceso de biometanización es aconsejable para lodos que contengan valores superiores a:

- 1,5 mg/kg de Cadmio
- 75 mg/kg de Cobre
- 50 mg/kg de Níquel
- 140 mg/kg de Plomo
- 300 mg/kg de Zinc
- 1 mg/kg de Mercurio
- 140 mg/kg de Cromo



En la siguiente tabla⁵⁶ se representa una lista de diversas plantas industriales donde se implementa dicho proceso de codigestión.

	Nistelrode (Holanda)	Biovakka - Vehmaa (Finlandia)	Spilamberto Módena (Italia)	Kalmar (Suecia)
Constructor/Gestor	Granja ganadera	Biovakka	Huber Technology (Hans Huber A.G.)	Kalmar Biogas AB
Co-sustratos	Ganaderos (81,5%: 72,6% avícola y 27,4% porcino) Otros (18,5%): lodo floculado procedente de industria cárnica y del pescado.	Ganaderos (71,4%: cerdo y vacuno) Lodos industriales (7,1%) Lodos EDAR (21,4%)	Ganadero (80% estiércol porcino y vacuno) Otros (20%): lodos de aguas residuales	Estiércol Aguas residuales
Digestor	Digestor principal de 75 m ³ y digestor secundario de 35 m ³	Digestor de 6.700 m ³ (acero)	12.000 m ³	Dato no disponible
Pretratamiento	Dato no disponible	Residuo ganadero: homogeneización a 12 mm e higienización a 70°C durante 1 h	Dato no disponible	Dato no disponible
Capacidad de tratamiento	9,1 m ³ /día	329 t/día	600 m ³ /día	Dato no disponible
Tª de operación	Dato no disponible	Dato no disponible	30-40°C	35°C
Tiempo residencia	Dato no disponible	Dato no disponible	20 días	Dato no disponible
Producción biogás	650 m ³ /día (71,4 m ³ /t)	1.534 m ³ /día (4,7 m ³ /t)	Dato no disponible	2,5 Mm ³
Contenido en CH ₄ del biogás	64%	60 – 65%	Dato no disponible	50-88%
Producción energética	146 kW (340 MWh/año)	4-5 MW	Dato no disponible	

2.5.7. Codigestión de residuos ganaderos y FORSU

Para lograr un buen proceso de biometanización a partir del uso de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos, estos deben pasar una etapa previa de pretratamiento donde a través de un equipo mezclador-homogenizador coloca en suspensión acuosa la fracción orgánica donde un sistema mecánico separa las impurezas de dicha suspensión. Tras dicho proceso la fracción orgánica se traslada a un cilindro de carga y de aquí a un tanque desde donde llega al digestor.

Dichos residuos sólidos urbanos presentan un alto contenido de nitrógeno, siendo la C/N de 15/1.

La obtención de biogás en las plantas conocidas que realizan este tipo de codigestión se sitúa en unos valores comprendidos entre 26,7-58,7 m³/t mezcla, presentando un contenido de metano en el biogás superior al 65%.

2.5.8. Codigestión de gallinaza y restos vegetales

El proceso desarrollado en una granja de cría intensiva de pollos conlleva una enorme generación de residuos (gallinaza/pollinaza), sólidos-líquidos, con un alto poder contaminante hacia los suelos, agua y aire.

⁵⁶ 002.PBG.2009.Manual Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales



El contenido de dicho residuo es variable dependiendo del agua, pienso y clima donde se producen, con todo se pueden considerar los siguientes parámetros que definen el purín:

- Materia orgánica.
- Sulfuro de hidrógeno.
- Nitrógeno.
- Fósforo.
- Calcio.

	m³ CH₄/t residuo	m³ CH₄/t SV
Gallinaza	54,4	272

Figura 40. Producción de metano a partir de residuos de gallinaza⁵⁷

Los restos vegetales son unos buenos sustratos para la obtención de biogás a partir de la codigestión con residuos ganaderos. Tras un estudio realizado a partir de gallinaza y restos vegetales, se llegó a la conclusión de que la producción de metano aumentaba llegando su máximo con la adición de un 25% de restos vegetales y se producía la inhibición del proceso cuando la adición de restos vegetales superaba el 25%⁵⁸.

En la siguiente tabla se representan las proporciones de residuos en función del porcentaje de Sólidos Volátiles utilizadas en los diversos ensayos realizados.

Ensayos	Restos vegetales (% SV)	Gallinaza (% SV)
1	0	100
2	25	75
3	50	50
4	75	25

Figura 41. Proporciones de residuos en función del porcentaje de sólidos volátiles

⁵⁷ 002.PBG.2009.Manual Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales.

⁵⁸ 005.ITA.2008.Valorización de purines, gallinaza y residuos vegetales mediante codigestión anaerobia.



Parámetros	Gallinaza	Residuos vegetales	Inóculo
Sólidos Totales (%)	30,5	14,3	3,11
Sólidos Volátiles (%)	18,6	13,3	1,40
Materia Orgánica (%)	55,1	67,9	35,60
NKT (mg/g)	13,3	5,6	1,74
N-NH ₄ ⁺ (mg/g)	2,16	0,5	0,89

Figura 42. Características de los sustratos y del inóculo

Los resultados obtenidos tras dicho estudio se plasman a continuación, siendo el proceso más exitoso en cuanto a producción de metano el analizado añadiendo el 25 % de restos vegetales.

% Restos vegetales añadido	L biogás / kg SV eliminado	% Metano	L metano /kg SV eliminado
0	208	73,27	152
25	277	72,10	200
50	224	67,70	152
75	180	68,38	123
100	139	32,08	045

Figura 43. Resultados obtenidos

Un dato importante de dicho proceso es el porcentaje elevado de metano conseguido en dicha digestión anaerobia, siendo para el caso donde la producción de biogás es máxima de 72,10%. En la siguiente gráfica se representa la producción de metano acumulada para los distintos procesos estudiados.

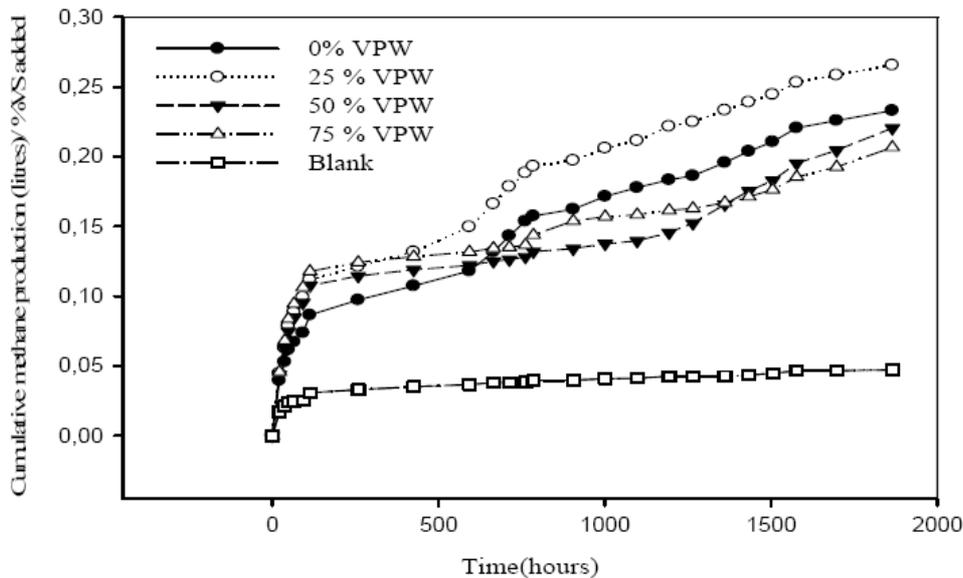


Figura 44. Producción de metano acumulada. VPW: Restos vegetales



Como nota importante a tener en cuenta en dicho proceso es el control exhaustivo del pH para que no se produzca la inhibición debida a los ácidos grasos volátiles, donde el porcentaje de restos vegetales añadidos determinará la viabilidad del proceso.

2.5.9. Codigestión de lodos de EDAR y FORSU

La digestión anaerobia de los residuos sólidos urbanos es una alternativa beneficiosa frente a las comunes como la incineración de los mismos. Dichos residuos presentan deficiencias en los nutrientes necesarios para llevar a cabo el proceso de digestión por lo que con la adición de lodos predigeridos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales se aportará el nitrógeno y los nutrientes necesarios. Dichos lodos presentan unos valores de C:N entre 6:1 y 16:1 (Stroot et al., 2001).

Las mezclas deben contener las razones óptimas de carbono/nitrógeno para la digestión anaerobia, estando dichos valores entre 20:1-30:1. Según estudios realizados a escala de laboratorio se concluyó que la relación RSU/lodos para la mayor producción de biogás y una mayor degradación de sólidos está en valores de 60/40⁵⁹. La mezcla entre RSU (residuo sólido) y lodos (residuo diluido) permite obtener un producto que permite un mejor manejo y degradabilidad, además de diluir y contrarrestar el efecto de inhibidores y aportar los nutrientes necesarios (Schmidt et al., 1999). A continuación se incluye la gráfica en la que se aprecian los resultados obtenidos:

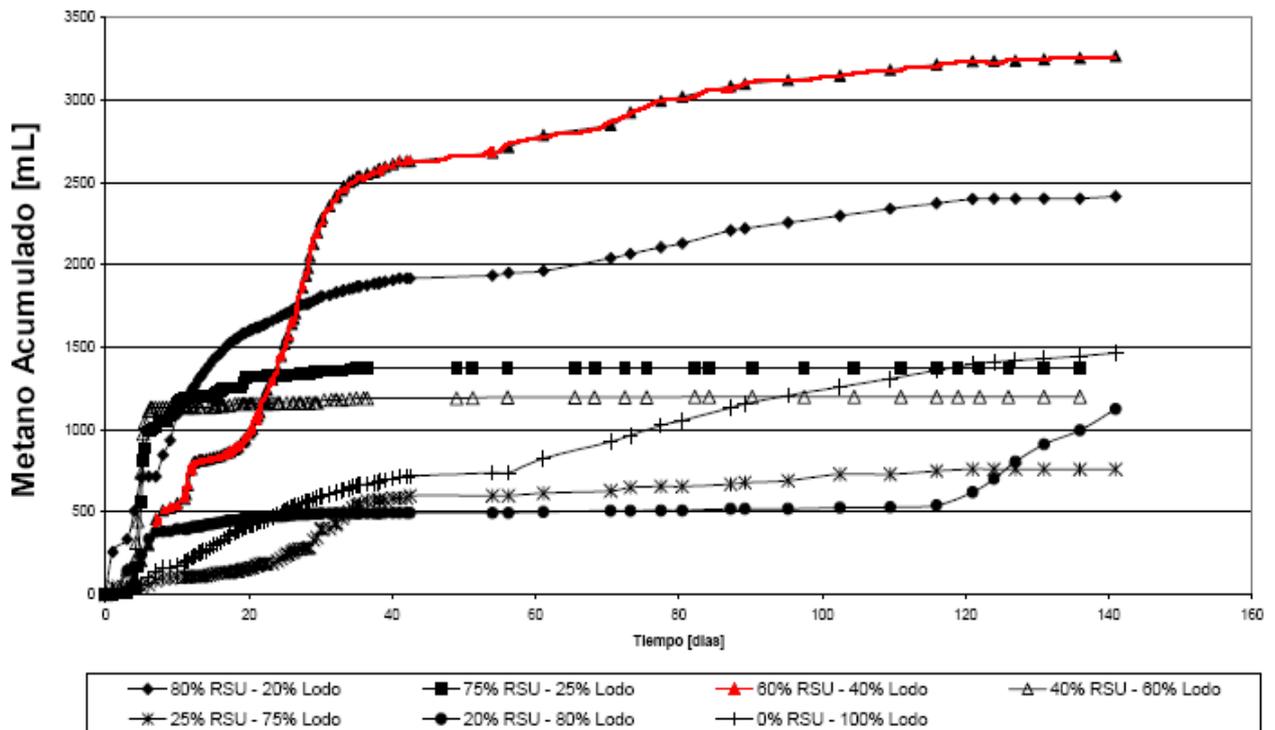


Figura 45. Biodegradabilidad anaerobia

⁵⁹ 008.AIDIS.2002.Codigestión de RSU y lodos



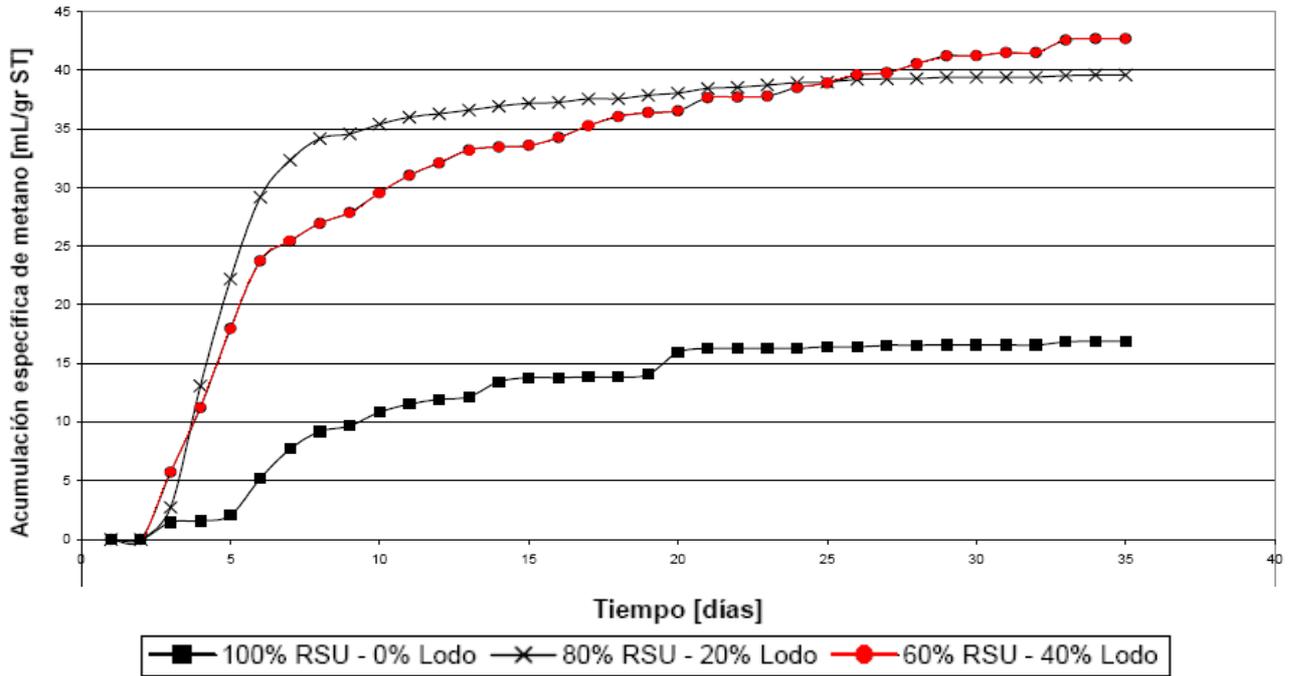


Figura 46. Acumulación específica de metano a distintas razones de RSU/lodo

La mayor reducción de sólidos se obtiene de la razón RSU/lodos de 60/40, como se aprecia en la siguiente imagen:

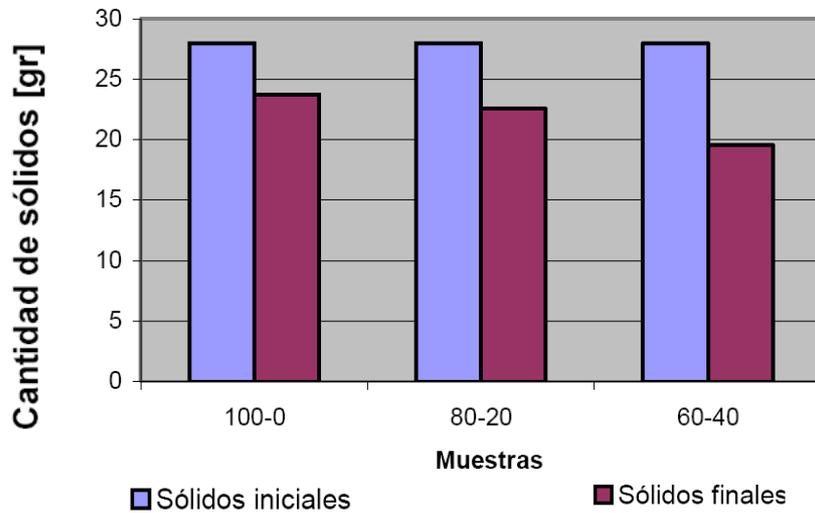


Figura 47. Reducción de sólidos para las diferentes muestras⁶⁰

⁶⁰ 008. AIDIS.2002. Codigestión de RSU y lodos

2.5.10. Plantas industriales con codigestiones óptimas

El objeto del presente apartado es la obtención de las codigestiones óptimas a partir de varios tipos de sustratos, mostrando a modo de ejemplo las características técnicas de actuales plantas industriales que operan procesando dichos residuos. El camino seguido para elaborar dichas conclusiones, se ha basado en el estudio de los datos obtenidos de las diferentes fuentes bibliográficas consultadas⁶¹⁶²⁶³ y características de los procesos de digestión de anaerobia anteriormente expuestos.

Algunas de las plantas más reseñables existentes en España y en Europa se incluyen en una tabla resumen de las principales características y parámetros de diseño que se incluye en el Anexo II del presente documento.

2.5.10.1 Residuos ganaderos y residuos hortofrutícolas

En la actualidad existen diversas plantas a escala industrial las cuales procesan residuos ganaderos con residuos de frutas y vegetales. Se ha tomado como modelo la planta española de Vila-Sana, ya que es una de las que mayores producciones de biogás por tonelada de mezcla obtienen, aunque se combina con otros sustratos.

Vila-Sana (Lérida-España)	
Purín cerdo (80%)	
Co-sustratos	Otros (20%): Residuos orgánicos de la zona como derivados de alcohol, derivados de aceites vegetales, lodos de EDAR, derivados de frutas, cebolla y leche.
Digestor	2 digestores de 1.270 m ³
Capacidad de Tratamiento	30,7 t mezcla/día
Tiempo de Residencia	15 días
Producción de Biogás	71,4 m³ biogás/t mezcla
Contenido en CH ₄ del biogás	Dato no disponible

2.5.10.2 Residuos ganaderos y residuos de remolacha

Los residuos procedentes de la remolacha, tanto las hojas como las raíces, son propicios para ser usados en la codigestión con residuos ganaderos debido al alto valor de sólidos volátiles y el bajo contenido en agua que poseen. Se ha tomado como modelo de este tipo de plantas la de Emilia Romagna, en Italia.

⁶¹ 002.PBG.2009.Manual Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales

⁶² 003.IDAE.2007.Biomasa. Digestores Anaerobios

⁶³ 050.BR.2008.Biogas Regions Shining Example



Emilia Romagna (Italia)	
Gestor	Seguimiento realizado por CRPA (Centro Ricerche Produzioni Animali s.p.a.)
Co-sustratos	Purín vacuno (62%, 1 ^{er} periodo; 40%, 2 ^o periodo) Residuo agroindustrial: Cebollas, Remolacha, Patatas, Maíz. (38%, 1 ^{er} periodo; 60%, 2 ^o periodo)
Digestor	2 digestores de 1200 m ³ cada uno
Capacidad de Tratamiento	18,5 t/día (1 ^{er} periodo); 28,5 t/día (2 ^o periodo)
T ^a operación	38°C
Materia seca	ST (g/kg): Purín (89,2), Cebollas (101,6), Remolacha (150,4), Patatas (222,8), Maíz (310,5)
Tiempo de residencia	Dato no especificado
Producción de Biogás	75 m³/t mezcla residuos (1^{er} periodo) 100,7 m³/t mezcla residuos (2^o periodo)
Contenido en CH ₄ del biogás	55% (1^{er} periodo) 53% (2^o periodo)

2.5.10.3 Residuos ganaderos y cultivos energéticos

Actualmente existen dos plantas industriales situadas en Alemania y la Baja Austria que codigieren dichos residuos donde las producciones han superado los 200 m³ biogás/t mezcla alimentada operando con reactores en dos fases.

En la siguiente tabla se representan las características de dichas plantas industriales donde se aprecian diferencias en los procesos seguidos por cada una en la digestión anaerobia, siendo los resultados obtenidos de producción de biogás muy similares.



	Rohkraft (Baja Austria)	Archea (Alemania)
Co-sustratos	Purín de cerdo (30%) con lixiviados de los silos de cultivos C. energéticos y Res. Vegetales (70%)	Purín de cerdo (12,5%) Hierba fresca (12,5%) Silo (75%)
Digestor	1º CSTR 2.000 m ³ 2º CSTR 1.850 m ³	1º: 270 m ³ Higienización 2º: 340 m ³
Capacidad de Tratamiento	50 t/día	10 t/día
Tª operación	39ºC	1º: 37-38ºC Higienización 2º: 50-53ºC
Materia seca	33,7% (en SV)	12%
Tiempo de residencia	77 días	1º: 15-20 días 2º: 15-20 días
Producción de Biogás	11.008 m³/día (220 m³/t)	>2.000 m³/día (>200 m³/t)
Contenido en CH ₄ del biogás	Dato no disponible	52-56%
Contenido SH ₂	Dato no disponible	<100 ppm tras desulfurización con aire y madera
Producción energética	Elect: 8.030 MWh/año Calor: 8.223 MWh/año	Elect: 240 kW Calor: desconocido

CSTR: (Continuous stirred-tank reactor) Reactor continuo de tanque agitado



2.5.10.4 Residuos ganaderos y maíz

La codigestión de dichos presenta altas producciones de biogás debido a la compensación de propiedades que presentan cada uno, conteniendo el maíz un gran porcentaje de sólidos volátiles con respecto a los que poseen los residuos ganaderos.

Dos plantas halladas en Alemania y Holanda tratan dichos residuos en procesos de digestión anaerobia.

	Kaarssen (Alemania)	Eissen (Holanda)
Co-sustratos	Vacuno (77%) Silo de maíz (23%)	Ganadero (44%: 50% cerdo y 50% vacuno) Silo de maíz (56%)
Digestor	1º 2x5.500 m ³ 2º 1x2.500 m ³ y 1x5.200 m ³	3 reactores de 500 m ³
Capacidad de Tratamiento	450 m ³ /día	90 t/día
Tª operación	40°C (mesofílico)	Dato no disponible
Materia seca	9-10%	28%
Tiempo de Residencia	1º: 22 días 2º: 8 días	Dato no disponible
Producción de Biogás	28.000 m³/día (62,2 m³/ m³)	≈20.000 m³/día (>222 m³/t)
Contenido en CH ₄ del biogás	51-52%	54%
Contenido SH ₂	De 2.000 ppm a <150 ppm	Dato no disponible
Producción energética	2.800 kW	1.250 kW



2.5.10.5 Residuos ganaderos y residuos de matadero

La codigestión de residuos ganaderos junto con residuos de animales es una metodología donde se consiguen grandes rendimientos y producciones de metano.

Actualmente existen numerosas plantas industriales que operan con dichos residuos obteniendo buenos resultados en producción de biogás. Destacan las plantas de Vegger en Dinamarca y de Aby Linkoping, en Suecia, que presentan las mayores producciones de biogás por tonelada de mezcla. Como principal característica de este tipo de codigestión, el contenido de metano del biogás se encuentra en una media del 67%.

	Vegger (Dinamarca)	Aby-Linkoping (Suecia)
Constructor	No se especifica	Ganaderos (10% vacuno) Matadero (75%) Subprod. Alimenticios (15%)
Co-sustratos	Ganaderos (71% vacuno) Residuos de mataderos de cerdos, arcillas del blanqueo del aceite, industria farmacéutica, alimentaria, lodos depuradora, etc. (29%)	2 de 3.700 m ³
Digestor	4 reactores de 230 m ³ (CSTR)	Higienización (70°C durante 1 hora)
Pretratamiento	55°C durante 3 horas	150 m ³ /día
Capacidad de Tratamiento	59 t/día	37°C
Tª operación	55°C	10-14% (ST)
Tiempo de residencia	Dato no disponible	50 días
Producción de Biogás	5.753 m³/día (97,5 m³/t)	14.520 m³/día (97 m³/t)
Contenido en CH ₄ del biogás	>65%	67,6%
Producción energética	2.830 kW	Dato no disponible

CSTR: (Continuous stirred-tank reactor) Reactor continuo de tanque agitado

2.5.10.6 Residuos ganaderos y residuos del procesado de pescado

Dichos sustratos presentan unas excelentes características para ser usados como productos para la codigestión debido a la disparidad de características que presentan, ya que la deficiencia en sólidos volátiles que presentan los residuos ganaderos es compensada por la gran proporción que presentan los pesqueros.



Existen diversas plantas donde se llevan a cabo procesos de digestión anaerobia con dichos sustratos, siendo la planta danesa de Hegndal-Hemmet la que mejores producciones obtiene. **Hegndal-Hemmet (Dinamarca)**

Constructor	Jenny and Kent Skaaning
Co-sustratos	Ganaderos (95% cerdo) Pesqueros grasos (5%)
Digestor	Vertical de 800 m ³
Pretratamiento	Dato no disponible
Capacidad de Tratamiento	52 t/día
Tª operación	Termofílico
Materia seca	Dato no disponible
Tiempo de Residencia	16 días
Producción de Biogás	3.560 m³/día (67,6 m³/t)
Contenido en CH ₄ del biogás	Dato no disponible
Producción energética	350 kW



2.5.10.7 Residuos ganaderos y residuos de la industria láctea

Las actuales plantas que codigieren dicho tipo de residuos agregan también diversos residuos procedentes de mataderos y de la industria pesquera.

Hasjøj (Dinamarca)	
Constructor	Hasjøj Biogas A.m.b.a.
Co-sustratos	Ganaderos (72,5% vacuno y cerdo) Otros (27,5%): Residuos de mataderos de cerdos, de la industria alimentaria y del pescado.
Digestor	Digestor de 3000 m ³ (CSTR)
Pretratamiento	Pasteurización (70°C durante 1 hora)
Capacidad de Tratamiento	138 t/día
T ^a operación	37°C
Materia seca	Dato no disponible
Tiempo de Residencia	Dato no disponible
Producción de Biogás	8.220 m³/día (59,6 m³/t)
Contenido en CH ₄ del biogás	Dato no disponible
Producción energética	Dato no disponible

CSTR: (Continuous stirred-tank reactor) Reactor continuo de tanque agitado



2.5.10.8 Residuos ganaderos y aguas residuales y lodos

Los residuos urbanos son óptimos para ser usados en procesos de digestión anaerobia debido al alto contenido de materia orgánica fácilmente degradable que presenta, aunque como contraste presentan altos niveles de contaminación por metales pesados.

Encontramos en Holanda una planta a escala industrial que realiza la codigestión con dichos residuos obteniendo producciones de biogás de en torno a los 71,4 m³/t mezcla.

Nistelrode (Holanda)	
Constructor	Granja ganadera
Co-sustratos	Ganaderos (81,5%: 72,6% avícola y 27,4% porcino) Otros (18,5%): Lodo floculado procedente de industria cárnica y del pescado.
Digestor	Principal (75 m ³) ; Secundario (35 m ³)
Pretratamiento	Dato no disponible
Capacidad de Tratamiento	9,1 m ³ /día
T ^a operación	Dato no disponible
Tiempo de Residencia	Dato no disponible
Producción de Biogás	650 m³/día (71,4 m³/t)
Contenido en CH ₄ del biogás	64%
Producción energética	146 kW (340 MWh/año)

2.5.10.9 Residuos ganaderos y FORSU

En la actualidad existen numerosas plantas que tratan dichos residuos en procesos de codigestión debido a las óptimas características que presentan las fracciones orgánicas de los residuos urbanos.



Studsgaard (Dinamarca)	
Constructor	Herning Municipal Utilities
Co-sustratos	Ganaderos (86,5%: 72,6% vacuno y 78% porcino) Otros (13,5%): Industria alimentaria y residuos de hogares.
Digestor	2 reactores de 3.300 m ³ cada uno
Pretratamiento	Dato no disponible
Capacidad de Tratamiento	266 t/día
Tª operación	52°C
Tiempo de residencia	16 días
Producción de Biogás	15.616 m³/día (58,7 m³/t)
Contenido en CH ₄ del biogás	Dato no disponible
Producción energética	Dato no disponible

2.6. Técnicas de depuración de biogás

Como se ha mencionado anteriormente a lo largo del documento, un factor crucial para determinar la calidad (y por lo tanto, la rentabilidad) del biogás producido, es el contenido en metano de la mezcla de gases. El objetivo claro es acercarse a un contenido en metano de aproximadamente el 92%, que es el contenido existente en el gas natural. Si logramos obtener este porcentaje, el biogás podrá utilizarse para los mismos usos que el gas natural.

En este sentido, es reseñable la importancia de disponer de sistemas de depuración del biogás, mediante la eliminación del dióxido de carbono y otros gases presentes en la mezcla. Asimismo, el sistema de purificación del biogás más eficiente y barato es la utilización de una mezcla de codigestión que optimice la producción de metano presente en el biogás. No obstante, existen técnicas de purificación del biogás, que procederemos a describir a continuación.

En el punto 2.8 del Estudio trataremos los posibles usos que existen para el biogás, dependientes del nivel de purificación (contenido en metano) del mismo. El post-tratamiento que se aplica al biogás es, por tanto, variable en función del uso que se vaya a realizar del mismo. En el siguiente esquema se muestra el tratamiento necesario para los diferentes usos del biogás.



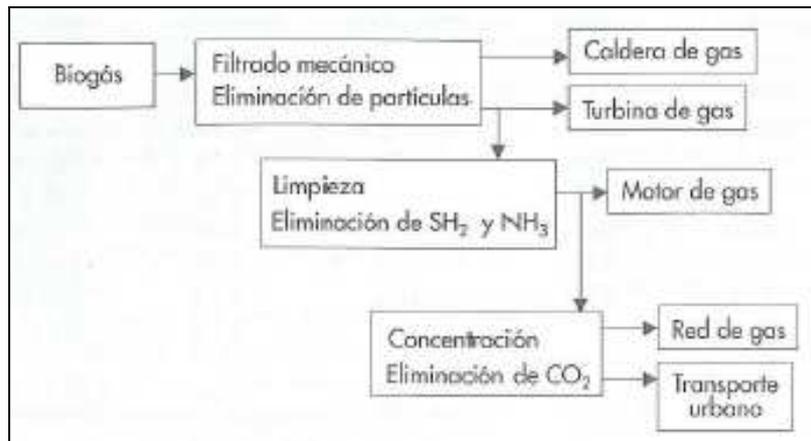


Figura 48. Necesidad de tratamiento del biogás en función del uso⁶⁴

A continuación se procederá a realizar una breve descripción de los procedimientos existentes para la depuración del biogás generado.

Eliminación de partículas: Consiste en retirar de la mezcla de biogás las partículas suspendidas, mediante trampas de agua, filtros, rejillas metálicas o similares.

Deshidratación. Condensadores: El biogás suele encontrarse saturado de vapor de agua, por lo que la disposición de condensadores supondrá la retirada de esta proporción, que suele ser de aproximadamente 35 gramos de agua por metro cúbico de biogás (si la digestión se realiza a una temperatura de unos 35°C⁶⁵). Este proceso se puede realizar también mediante la adición de productos químicos como soluciones de glicol, etileno o trietileno.

Eliminación del SH₂: Durante el proceso de generación del biogás es frecuente que se produzca sulshídrico en presencia de compuestos azufrados. El SH₂ es corrosivo, por lo que para el mantenimiento en condiciones adecuadas de los motores e instalaciones que utilizan biogás, es preciso retirar este compuesto del medio de reacción. Para ello, se utilizan métodos oxidantes, que provocan el paso del SH₂ a azufre elemental, en estado sólido. A continuación se enumeran algunos de los diferentes tipos de tratamiento de desulfuración que se utilizan a estos efectos.

- **Desulfuración biológica:** Se utilizan como oxidantes microorganismos del género Thiobacillus. Para que se produzca la oxidación es preciso modificar las condiciones reductoras presentes en el tanque de digestión anaerobia, pasando a ser oxidantes. Esto se logra principalmente mediante dos métodos:
 - Adición aire / oxígeno a la mezcla
 - Paso del biogás por Biofiltros o bioscrubbers, en los que se airea ligeramente la mezcla.
- **Adición cloruro hierro:** Con la adición de este compuesto se genera la precipitación de sulfuro de hierro. Este sistema es muy eficiente, aunque poco rentable desde el punto de vista económico. Este método es útil en sistemas con alto contenido en sulfuros, aunque no se llega al nivel de depuración necesario para la utilización del biogás en vehículos.

⁶⁴ Xavier Elías Castells (2005). *Tratamiento y Valorización Energética de Residuos*.

⁶⁵ Xavier Elías Castells (2005). *Tratamiento y Valorización Energética de Residuos*.



- **Adición de Óxido de Hierro:** Del mismo modo que en el método anterior, se produce la precipitación del sulfuro de hierro. En este caso, la adición se realiza habitualmente mediante dos métodos:
 - Virutas de madera cubiertas de óxido de hierro
 - Pellets impregnados de óxido de hierro.
- **Columnas de adsorción:** Otro de los métodos de desulfuración consiste en hacer pasar la mezcla de biogás por columnas de adsorción con carbón activo o materiales similares.
- **Filtros moleculares:** Los compuestos de azufre pueden eliminarse mediante la utilización de filtros de alúmina o sílice activada, con afinidad por los compuestos polares. Este método es adecuado para eliminar agua y/o sulfuro de hierro a media y pequeña escala.
- **Métodos en medio líquido:** Consisten en hacer pasar el biogás por una solución acuosa absorbente. La absorción se realiza en un scrubber, en el que se aumenta la superficie de contacto mediante la aplicación de un relleno. El proceso de absorción se realiza a bajas temperaturas y altas presiones, existiendo la posibilidad de recuperación del azufre para usos industriales en instalaciones grandes. Estos procedimientos en medio líquido son caros, tanto en lo que respecta al coste de inversión como a la aplicación de diferentes productos químicos. A continuación se muestra un esquema del funcionamiento de este tipo de instalaciones.

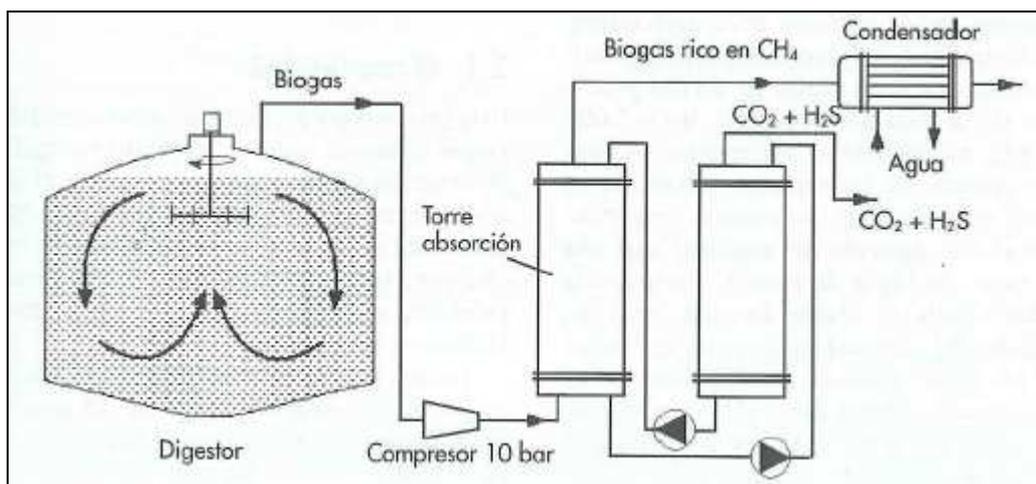


Figura 49. Sistema de tratamiento mediante absorción en solución acuosa, con sistema de regeneración de la solución.⁶⁶

Métodos de concentración del biogás mediante la eliminación del CO₂: Los métodos de desulfuración mediante soluciones acuosas, en general, son también aplicables para la retirada de CO₂ de la mezcla de biogás. Otras posibilidades son:

- Filtros moleculares
- Filtros de membrana
- Adición de yeso o hidróxido de calcio: Estos productos fijan el CO₂, obteniéndose carbonato cálcico, empleable como enmienda caliza.

⁶⁶ Xavier Elías Castells (2005). *Tratamiento y Valorización Energética de Residuos*

- Absorción del CO₂ mediante lavado en monoetanolamina⁶⁷. El dióxido de carbono se transfiere así a la fase líquida, pudiendo regenerarse la fase acuosa mediante la eliminación del CO₂ presente en la misma mediante calentamiento. El biogás enriquecido, posteriormente se seca en un lecho de silicagel, procediéndose a la odorización del mismo y a la disposición final del mismo, como biogás comprimido (BGC) o como biogás licuado (BGL).

En general, la concentración del biogás no es rentable económicamente, salvo que el gas se vaya a comprimir a elevadas presiones para su utilización en vehículos.

2.7. Técnicas de tratamiento del digestato para distintos usos

La producción de biogás mediante digestión anaerobia genera unos digestatos cuya riqueza en materia orgánica y elementos nutritivos debe ser aprovechada.

La forma más sencilla e inmediata de valorización de cualquier residuo orgánico es la aplicación directa del mismo al suelo agrícola, pero debe de existir una evaluación previa del valor fertilizante de estos materiales y sus efectos sobre las plantas y el suelo.

El aporte de los digestatos puede reducir costes en los cultivos, debido al ahorro en fertilizantes minerales, cuyo precio se ha elevado muy considerablemente en los últimos tiempos. Además, la menor producción de fertilizantes minerales de síntesis puede ayudar a la disminución de las emisiones de CO₂ a la atmósfera.⁶⁸

El digestato se trata en varias etapas, cuyo objetivo final es obtener un producto sólido aplicable como fertilizante, rico en nitrógeno, que requeriría, según la tipología del mismo, de una adición de otros elementos limitantes, particularmente, fósforo y / o potasio.

Un tratamiento tipo constaría de 3 etapas⁶⁹:

1. Centrifugado: Se crea una materia sólida con aproximadamente un 25% de sólidos secos, que pueden utilizarse como fertilizante (como estiércol sólido), o secarse todavía más.
2. Ultrafiltrado: Crea un concentrado que contiene sólo una pequeña cantidad de materia sólida, y se devuelve al fermentador como solución nutriente.
3. Osmosis inversa: Crea un concentrado que contiene unas elevadas proporciones de nitrógeno, fósforo y potasio, con lo cual se consigue un fertilizante perfecto.

El agua resultante, limpia y libre de agentes contaminantes, puede utilizarse como agua en el proceso de la planta o simplemente desecharse.

Otra opción sería realizar un secado térmico, mediante un método similar al utilizado con los lodos de depuradora para su aplicación directa como fertilizante agrícola.

⁶⁷ 039.ESE.2009.Biogás de vertedero para automoción

⁶⁸ 041.IVIA.2009.Utilización de digestato como fertilizante

⁶⁹ 042.ENVISO.2008.Tratamiento del digestato de EnvioMembrana



Una última opción sería el compostaje del digestato, procediéndose de manera previa a la recogida por parte del encargado del compostaje (o compostaje *in situ*) al almacenamiento del mismo en una nave o instalación adecuada para ello.

Asimismo, como resultado de los post-tratamientos de depuración del biogás, como se muestra en la figura que se incluye a continuación, los productos resultantes pueden utilizarse también como fertilizantes agrícolas, debido a la recuperación de sales.

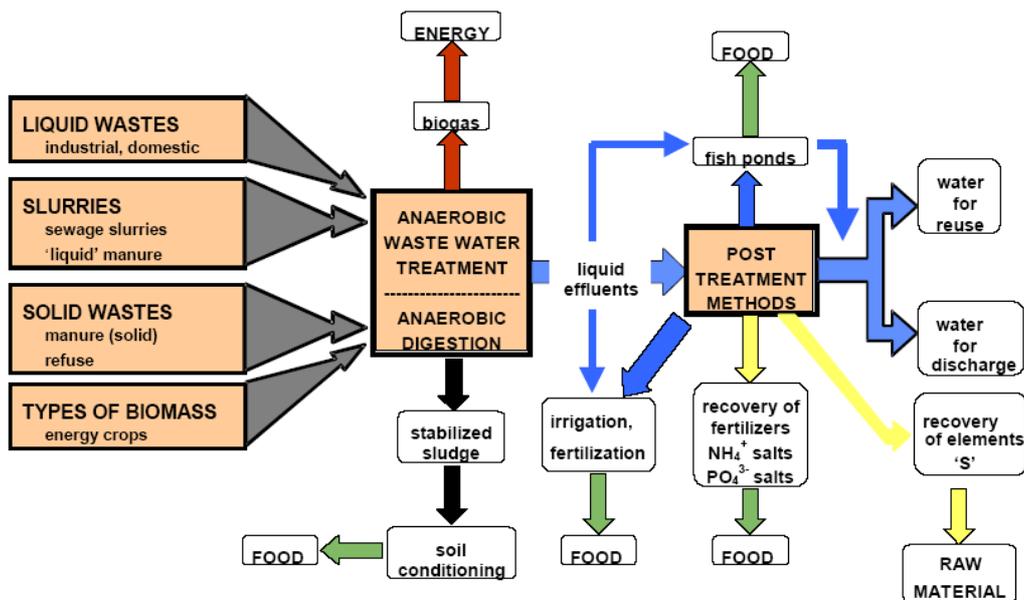


Figura 50. Resumen de las aplicaciones y posibilidades de aprovechamiento de los efluentes del proceso de digestión anaerobia⁷⁰

2.8. Técnicas de valorización energética

Una vez se ha obtenido el biogás, existen varias técnicas de aprovechamiento energético del mismo, basadas, principalmente en 3 tipos de aprovechamiento:

- Obtención de calor y/o electricidad
- Utilización del biogás en redes de gas
- Utilización como combustible de vehículos.

A continuación se muestra un esquema de las posibilidades existentes en la utilización del biogás:

⁷⁰ 031.LEAF.2008.Look Hulshoof. *Biogas Technology in Europe*



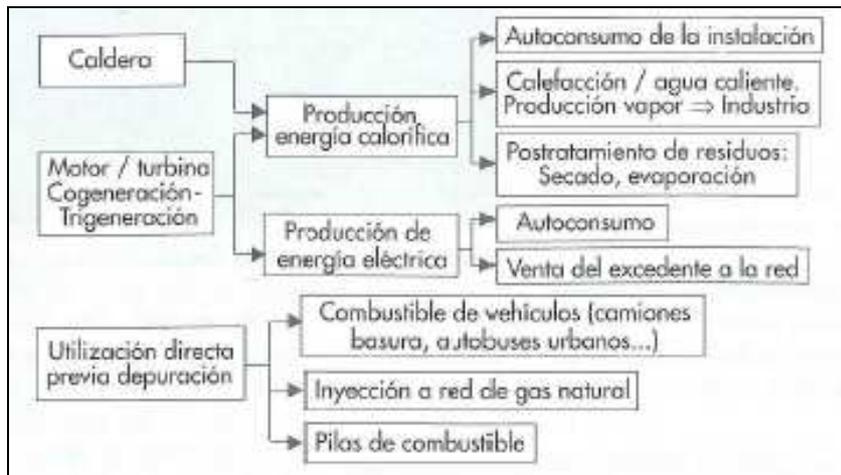


Figura 51. Usos del biogás⁷¹

Uso final	Eliminación del agua	Eliminación del CO ₂	Eliminación del H ₂ S
Producción térmica en caldera	1	0	0-1-2
Producción de electricidad en motores estacionarios	1 ó 2	0-1-2	1 ó 2
Combustible de vehículos o para turbinas	2	2	2
Gas natural para calefacción	2	2	2
Pilas de combustible	2	2	2

Tabla 1. Tratamiento según el uso final del biogás. (0= no tratamiento, 1= tratamiento parcial, 2= tratamiento elevado). Fuente: CIRCE.

2.8.1. Producción de electricidad y calor

El interés del biogás no es otro que su aprovechamiento energético. Las características energéticas esenciales del biogás son las siguientes:

- El poder calorífico inferior (PCI) del biogás con un porcentaje del 60% de metano es de 5.500 kcal/Nm³.
- El PCI del metano es de 13.187 kcal/kg, siendo la densidad del metano de 0,67 kg/m³ con lo que el PCI expresado en volumen sería de 8.835,29 kcal/Nm³.
- La producción media eléctrica bruta por m³ de biogás (con un contenido del 60% de metano) es de 2,07 kWh, mientras que la producción calorífica media es de 2,3 termías por m³ (2,67 kWh).

⁷¹ Xavier Elías Castells (2005). *Tratamiento y Valorización Energética de Residuos*



El biogás que se genera mediante la digestión anaerobia permite dos aprovechamientos energéticos diferenciados, al quemar el producto resultante:

- Generación de calor procedente de la combustión. Por ejemplo, para el tratamiento de lixiviados produciéndose la evaporación del mismo.
- Generación de electricidad mediante la disposición de motores eléctricos.

Además, el proceso aumenta su eficiencia en el caso de realizarse el aprovechamiento mediante cogeneración.

Tecnología	MCIA ¹	Micro-turbina	Turbina de gas	Stirling	Pilas de combustible
Tamaño (MW)	0,03 a 6	0,001 a 0,4	0,5 a 30	0,0250 a 0,055	0,1 a 3
Coste de instalación (€/MW)	560.000 a 965.000	950.000 a 1.350.000	325.000 a 725.000	900.000 a 1.600.000	3.200.000 a 4.000.000
Costes de O&M (€/MWh)	6,2 a 16	6,4 a 12	3,2 a 8	4 a 6,4	1,5 a 12,3
Eficiencia sobre PCI (%)	30 a 42	14 a 30	21 a 40	30	26 a 50

Figura 52. Tecnologías empleadas para valorización de biogás.⁷²

Pasamos a describir las tecnologías enumeradas:

2.8.1.1 Microturbinas

Los motores de cogeneración son la tecnología más desarrollada para el aprovechamiento de biogás de depósito controlado. No obstante, sólo resultan viables en instalaciones a partir de 500 KW, con lo que existen numerosos vertederos en los que a causa de una baja producción de biogás o de una baja calidad de éste, en cuanto a concentración de metano se refiere, no se está aprovechando esta fuente de energía. Ante esta problemática, las microturbinas se presentan como una alternativa tecnológica a los motores de cogeneración gracias a dos de sus principales características:

- Se trata de elementos modulares con capacidades unitarias entre 30 y 200 kW que pueden agruparse en serie y por tanto son aptas para cualquier tipo de instalación.
- Permiten el funcionamiento con gases de bajo poder calorífico, lo que en el caso del biogás se traduce en un contenido en metano mínimo de un 30-35 %, inferior al 40 % requerido en un motor de cogeneración.

⁷² 003.IDAE.2007.Biomasa. Digestores Anaerobios.



Además:

- Se trata de elementos compactos y con pocas partes móviles por lo que presentan menor coste de mantenimiento.
- Presentan menores emisiones atmosféricas y sonoras en relación con los motores térmicos.

Las microturbinas son equipos muy similares a las turbinas convencionales, pero con algunas diferencias en el modo de funcionamiento. La principal diferencia es el hecho de tener un ciclo de recuperación de calor para mejorar el rendimiento. El resto de diferencias se encuentran en el sistema de transformación de energía mecánica a eléctrica, ya que no existe una transmisión mecánica que haga funcionar el alternador directamente a 50 Hz, sino que el alternador funciona a alta frecuencia y la conversión se realice con electrónica de potencia.

El funcionamiento de una microturбина es muy sencillo. El aire es aspirado y tras pasar por un filtro de partículas es comprimido. A continuación, se hace circular por un intercambiador de calor donde absorbe parte de la energía de los gases de escape. El motivo es incrementar la temperatura previamente a la entrada a la cámara de combustión con lo que se consigue aumentar la eficiencia del proceso. Una vez en la cámara de combustión, se realiza la inyección del biogás y se produce la combustión de la mezcla. A diferencia de los motores alternativos, las turbinas precisan de una presión del biogás de entre 3 y 5 bar, suficiente para ser inyectado a la cámara de combustión. Los gases calientes producto de la combustión se expanden en la turbina, que al girar mueve el alternador eléctrico y el compresor. Los gases de escape expandidos se hacen circular por el intercambiador de calor. La salida del alternador es corriente alterna a alta frecuencia, por lo que es necesario la incorporación de un rectificador AC/DC y de un inversor que permita obtener una corriente alterna trifásica de 50 Hz.

Entre las desventajas se encuentran:

- No existen prácticamente utilidades en turbinas grandes
- Existen microturbinas de pequeña potencia (30 kW cada una) que pueden utilizar biogás como combustible, con excelentes resultados en emisiones de NOx
- Menos partes móviles que los motogeneradores y costes de mantenimiento menores, pero rendimiento también inferior (25 % frente al 35 %)
- Inversiones específicas elevadas, debido al pequeño tamaño de las microturbinas
- Utilización condicionada por su pequeño tamaño unitario.

2.8.1.2 Pilas de combustible

Las pilas de combustible están constituidas por un conjunto de celdas apiladas, = STACK cada una de las cuales posee un ánodo o electrodo negativo y un cátodo o electrodo positivo, separados por un electrolito que facilita la transferencia iónica entre los electrodos. Cada una de las sustancias que participan en la reacción es alimentada a un electrodo distinto. Así, el combustible, generalmente rico en hidrógeno, es alimentado de forma continua al ánodo, y el oxidante, normalmente el oxígeno del aire, al cátodo.

Las pilas son tan sostenibles como lo es el combustible que consumen, con ellas se:



- Incrementar el aprovechamiento EFICIENTE de las energías renovables
- Optimizar su conversión y uso
- Buscar tecnologías flexibles sin requerimientos estrictos
- Necesidad de proporcionar a las pilas de combustible un combustible renovable

El objetivo es integrar las energías renovables en las pilas de combustible, con las siguientes consideraciones:

- Mantener las altas eficiencias del SISTEMA
- Intentar evitar intensas fases de “pre-procesamiento”
- Evitar altos costes adicionales
- Usar renovables disponibles y sencillos
- Seleccionar la pila más apta para la aplicación deseada

Se pueden encontrar distintos tipos de pilas

- Pilas alcalinas = Alkaline Fuel Cells (AFC)
- Pilas poliméricas = Polymer electrolyte FC = PEM
- Pilas de metanol directo = Direct methanol FC = DMFC
- Pilas de ácido fosfórico = Phosphoric Acid FC = PAFC
- Pilas de carbonato fundido = Molten Carbonate FC = MCFC
- Pilas de óxido sólido = Solid Oxide FC = SOFC

AFC	90-100 ° C	Pilas de Baja Temperatura
PEM	60-100 ° C	
DMFC	60-100 ° C	
PAFC	175-200 ° C	Pilas de Alta Temperatura
MCFC	600-700 ° C	Pilas de Alta Temperatura
SOFC	800-1000 ° C	

Figura 53. Tipologías de pilas de combustible..



Las pilas de Alta Temperatura son más aptas por las siguientes razones:

- No requieren un tan alto nivel de limpieza
- Uso directo del biogás por el reformado integrado
- Eficiencia mayor del sistema.

Como alternativa está la producción de H₂ vía reformado para el transporte

2.8.1.3 Motores de combustión interna

La generación de energía eléctrica a partir del uso del biogás en motores de combustión interna consiste en la adaptación de pequeños grupos electrógenos, tanto de encendido por chispa (gasolina) como Diesel, para trabajar con biogás, para lo cual se han efectuado algunas modificaciones, principalmente, en el sistema de alimentación de combustible. Estas modificaciones se caracterizan por el uso de tecnología sencilla y la economía de su realización.

2.8.1.4 Motores Stirling

El motor Stirling es un motor de combustión externa que puede funcionar, en principio, con cualquier tipo de combustible, incluso, con energía solar. Este motor, que es relativamente sencillo desde el punto de vista constructivo y operativo, se puede fabricar en cualquier taller medianamente equipado, a diferencia de los motores de combustión interna (motores a gasolina o Diesel) que requieren de un costoso y altamente tecnificado proceso de fabricación.

Estos motores constan de dos pistones por cilindro, uno de potencia y el otro desplazador de aire. Una parte fundamental y distintiva de este motor es la presencia de un elemento llamado regenerador, que se encarga de almacenar calor durante cierta parte del ciclo, y devolver a la sustancia de trabajo esta misma cantidad (de calor) durante otra parte del ciclo térmico, con el consiguiente ahorro de combustible y aumento de la eficiencia.

Los prototipos diseñados y construidos en el IMCI son motores didácticos, tienen la configuración beta, trabajan con GLP (pueden trabajar con otros combustibles), y desarrollan 4; 30 y 40W de potencia a velocidades de 600;400 y 350 rp.m., respectivamente.

2.8.1.5 Turbinas de gas

También la generación de electricidad se puede realizar mediante calderas y turbinas de gas.

Un caso especial de este tipo de generación es el del vertedero controlado de Bouqueval/Plessis-Gassot, el cual se encuentra a unos 20km al norte de París. La producción total de biogás se eleva a 13.000 m³/hora, de los que se valorizan 10.000 m³ para producir 10 MW/hora de electricidad, es decir, el consumo medio de una ciudad de 30.000 habitantes. Tras su captación y control, los 10.000 m³ de biogás que se producen en el vertedero controlado de Bouqueval se queman en tres calderas. Los quemadores de estas calderas se adaptan automáticamente a la cantidad y a la calidad del biogás entrante, es decir, a su contenido en metano. Cada una de las calderas suministra 30 toneladas de vapor a 380°C, a una presión de 40 bars. Este vapor pone en marcha la turbina que gira a 7.500 rpm, conectada a su vez a un alternador que, produce cerca de 20.000 voltios de electricidad. Una turbina de vapor transforma la energía del flujo de vapor de agua en energía mecánica. Al pasar por las toberas



de la turbina, se reduce la presión del vapor (se expande) aumentando así su velocidad. Este vapor a alta velocidad es el que hace que los álabes móviles de la turbina giren alrededor de su eje al incidir sobre los mismos

2.8.2. Redes de gas

Una vez se ha depurado el biogás, eliminando compuestos como el SH₂, y aumentando la concentración de metano en la mezcla, el biogás enriquecido resultante, con un contenido de metano en torno al 91-95% puede inyectarse en las redes de transporte de gas, del mismo modo que el gas natural.

De este modo, el biogás puede emplearse como combustible doméstico para calefacción, o como materia prima en el ámbito industrial.

En el siguiente gráfico se muestran las diferentes vías existentes para el aprovechamiento del biogás, haciendo hincapié en los usos derivados de la inyección del biogás a la red de transporte.

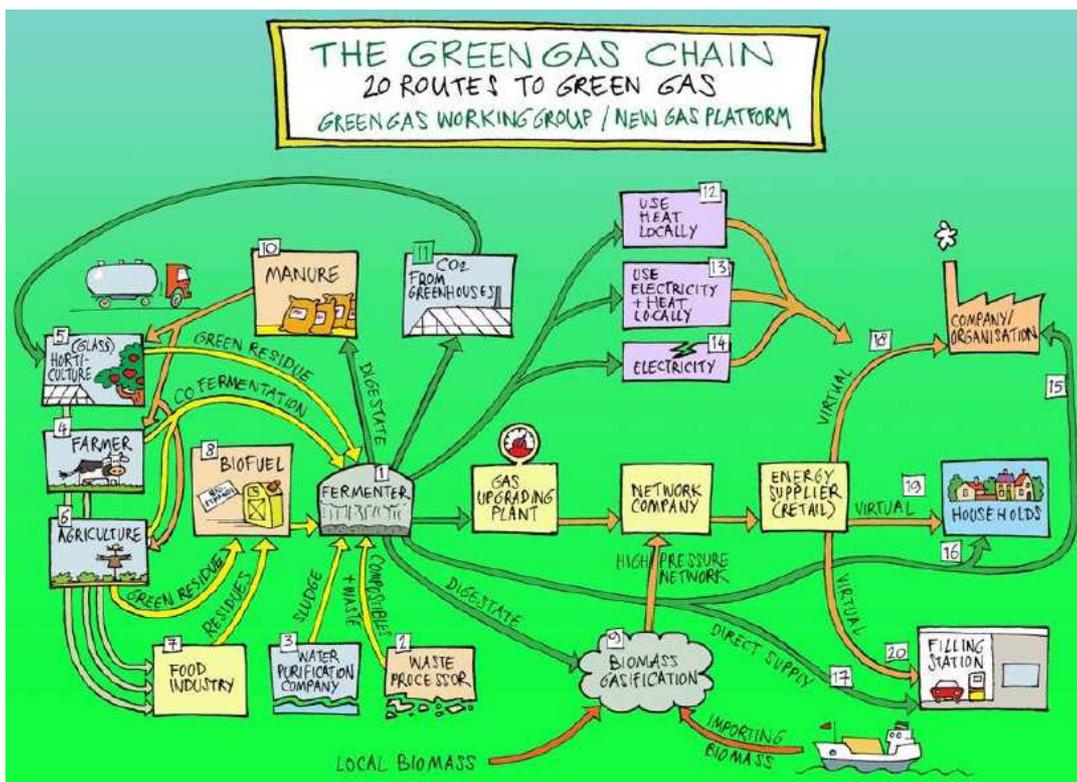


Figura 54. Esquema del ciclo completo del biogás, desde la materia prima hasta la utilización del mismo⁷³

⁷³ 043.SN.2008.Perspectives for the injection of biogas into the natural gas grid



2.8.3. Empleo en vehículos⁷⁴

Al igual que para su uso en la red de gas, la utilización del biogás como combustible para vehículos de automoción exige un enriquecimiento de la mezcla en metano, y purificación del mismo, mediante los métodos ya descritos en el punto 2.6 del Estudio.

De cara al empleo del biogás en vehículos existen dos variantes:

- Biogás Comprimido (BGC)
- Biogás Licuado (BGL)

El BGC se utiliza casi exclusivamente en vehículos ligeros, a una temperatura ambiente, y a una presión de unos 200 Kg/cm². El consumo de BGC es de 6-8 m³ por cada 100 Km recorridos, en vehículos ligeros, y de 25-35 m³ por 100 Km en vehículos pesados, lo que resulta ser equivalente al consumo de las gasolinas en el caso de los vehículos ligeros y de los gasóleos en el caso de los pesados. Un metro cúbico de BGC equivale a 200 m³ de biometano sin comprimir.

El BGL es el mismo gas que el BGC, aunque licuado, de manera que ocupa un volumen 3 veces menor (600 veces menor que el biogás sin comprimir). Se encuentra a una temperatura de -160°C, y su uso está indicado tanto para vehículos ligeros como pesados. No obstante, presenta ventajas claras frente al BGC, en lo que respecta a volumen necesario para el almacenamiento y autonomía del vehículo.

Cambios de estado del biometano en automoción							
Proceso	Parametro Unidad	Situación según fase				En vehículo	
		Planta	Transporte	Almacenado	Repostaje	Deposito	Motor
BGC	Presion kg/cm ²	200	200	200	200	200	trabajo
	Temperatura °C	ambiente	ambiente	ambiente	ambiente	ambiente	motor
BGL	Presion kg/cm ²	ambiente	ambiente	ambiente	ambiente	ambiente	trabajo
	Temperatura °C	-160	-160	-160	-160	-160	motor
BGCL	Presion kg/cm ²	ambiente	ambiente	ambiente	200	200	trabajo
	Temperatura °C	-160	-160	-160	ambiente	ambiente	motor

Figura 55. Condiciones en que se encuentran el Biogás Comprimido (BGC), el Licuado (BGL) y el mixto (BGCL)⁷⁵

La rentabilidad del aprovechamiento del biogás como combustible para vehículos parece clara, frente al aprovechamiento eléctrico, aunque cuenta con el *handicap* de no existir una red de gasolineras y centros de repostaje con este tipo de combustible. Además, el parque automovilístico requiere una adaptación paulatina, resultando más adecuada la aplicación del biogás en vehículos pesados que en ligeros.

⁷⁴ 039.ESE.2009.Biogás de vertedero para automoción

⁷⁵ 039.ESE.2009.Biogás de vertedero para automoción



Este tipo de aprovechamiento presenta un futuro relativamente prometedor, pues en la anteriormente mencionada Directiva Europea de Renovables⁷⁶ se exige que la utilización de los biocombustibles en la UE para el año 2020 sea de un 10% del total. En este porcentaje se incluirían biodiésel, bioetanol, gas natural y biogás.

En el siguiente gráfico se muestra la expectativa del porcentaje de combustibles renovables (no sólo para transporte, no se incluye el gas natural) en Europa para el año 2020.

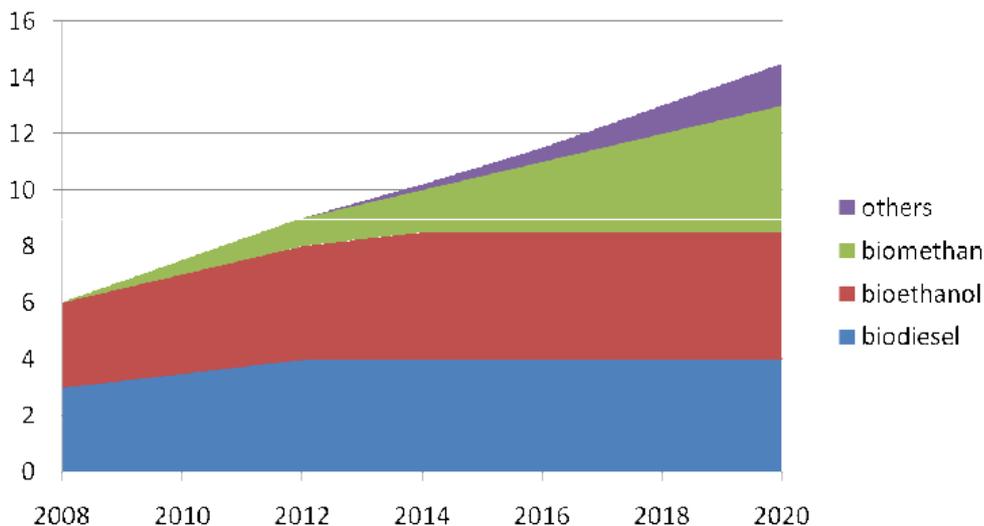


Figura 56. Expectativas de combustibles procedentes de fuentes renovables en la UE, obtenidas de sus propios recursos (en % del combustible total)⁷⁷

2.8.4. Posibilidades de Almacenamiento

La energía eléctrica generada mediante el aprovechamiento del biogás es susceptible de ser almacenada mediante las denominadas pilas de combustible. Estas no son más que mecanismos que almacenan dicha energía mediante la utilización de las propiedades de reducción/oxidación de determinados materiales, de manera similar a las pilas (baterías) que utilizamos habitualmente, o a la batería de un coche.

No obstante, debido a la multitud de usos que se permiten, puede resultar más ventajoso el almacenamiento del biogás en formas de gas comprimido (ocupa un volumen 200 veces menor que el gas sin comprimir) o incluso licuado (su volumen es 600 veces menor que el del mismo gas sin comprimir).

De este modo, el potencial energético del biogás se mantiene en épocas en que la generación sea menor, debido a la estacionalidad de los residuos.

2.9. Expectativas en el sector

Actualmente, se están desarrollando numerosos proyectos de investigación a nivel mundial. En el caso de España, destaca el proyecto “PROBIOGÁS”, en el que un consorcio de empresas y centros de investigación están desarrollando, pormenorizadamente, un análisis detallado de

⁷⁶ 012.UE.2009.DIRECTIVA RENOVABLES 2009-28-CE

⁷⁷ 019.AEBIOM.2008.The Case of Austria



las potencialidades de diversos tipos de residuos para la generación de biogás. Este ambicioso proyecto abarca desde la capacidad de producción de diversos residuos, hasta la capacidad de codigestión de determinadas mezclas, pasando por la tecnología de los reactores y la disponibilidad de residuos.

A nivel general, los principales campos de actuación en materia de investigación van, obviamente, encaminados a aumentar la eficiencia del proceso, rentabilizando al máximo. Para ello, las líneas de investigación en la actualidad son las siguientes:

- Estudios de potencial de generación de biogás de residuos para su digestión individual
- Estudios de potencial de generación de biogás de residuos en codigestión
- Análisis de los pretratamientos más adecuados y rentables para los diversos residuos y mezclas de residuos.
- Estudio tecnológico de los diferentes reactores existentes, y aplicabilidad a las diferentes mezclas de codigestión.
- Metodologías de purificación del biogás, maximización del contenido en metano.
- Sistemas de aprovechamiento energético y optimización de la cogeneración térmica y eléctrica.
- Técnicas de tratamiento de los digestatos, para la optimización de su aprovechamiento como fertilizantes, y reducción de la carga orgánica.

Desde el punto de vista de las políticas de fomento del biogás, es conveniente mencionar las siguientes expectativas en el sector:

- Se encuentra en redacción el PER 2011-2020, en el que es previsible que se aumente el papel del biogás como método de generación y reducción de emisiones, de cara a cumplir con los objetivos de la directiva de renovables europea.
- Queda pendiente de aprobación la normativa para el desarrollo de la Ley de Fomento de las Renovables andaluza, previéndose medidas para el fomento de la tecnología del biogás en nuestra comunidad.
- Por parte del sector promocional, se reclama una modificación al alza de la prima regulada por el RD 661/2007, pese al aumento considerable de dicha prima frente a la versión del RD del año 2004, considerándose como insuficiente la rentabilidad de los proyectos de generación de biogás con el sistema de retribución actual.⁷⁸⁷⁹

3. SITUACIÓN ACTUAL DEL BIOGÁS EN EUROPA. MODELO DE NEGOCIO

3.1. Generalidades

El marco en que se encuadra el desarrollo del biogás en Europa es similar para todos los países de la Unión, en base a la Directiva 2009/28/CE, relativa al fomento del uso de energía

⁷⁸ 035.APPA.2009.Josep Turmo-GENERA-Mayo 2009

⁷⁹ 036.AVEBIOM.2008.Fco.Repullo.Biogás_Case of Spain



procedente de fuentes renovables. Esta Directiva establece los objetivos de 20-20-20 para el año 2020, es decir:

- Las energías renovables deben suponer una cuota del 20% en el total de las energías de la Unión.
- Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20%.
- Aumentar la eficiencia energética en un 20%.

Además, se exige que para el año 2020, al menos el 10% del gasto energético en transporte proceda de combustibles derivados de fuentes de energía renovables.

En dicha norma, en relación al biogás se indica lo siguiente⁸⁰:

“Teniendo en cuenta el importante potencial de ahorro en materia de emisiones de gases de efecto invernadero, la utilización de materias agrarias, como el estiércol y los purines, así como otros residuos de origen animal u orgánico para producir biogás ofrece ventajas medioambientales notables tanto en lo que se refiere a la producción de calor y de electricidad como a su utilización como biocarburantes. Como consecuencia de su carácter descentralizado y de la estructura de las inversiones regionales, las instalaciones de biogás pueden aportar una contribución decisiva al desarrollo sostenible en las zonas rurales y ofrecer a los agricultores nuevas posibilidades de ingresos”.

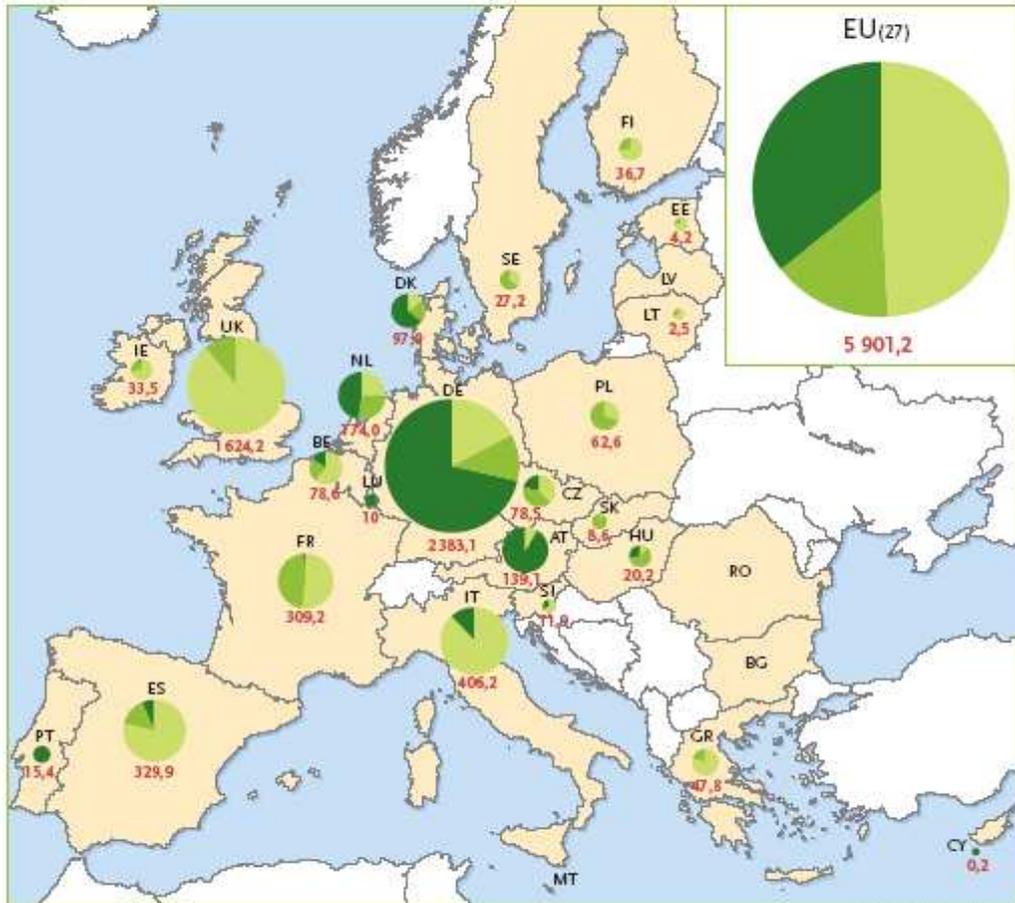
Los países miembros han definido unas estrategias muy diferentes para alcanzar estos objetivos, que difieren en función de las políticas estatales y de las condiciones de cada país de la Unión, de manera previa al establecimiento de las directivas europeas en materia de energías renovables.

En cuanto al biogás, los principales productores europeos son, por este orden, Alemania, Reino Unido, Dinamarca, e Italia, implementándose en cada uno de estos países unos muy diferentes modelos de negocio.

⁸⁰ 012.UE.2009.Directiva Renovables 2009-28-CE



PRODUCTION D'ÉNERGIE PRIMAIRE DE BIOGAZ EN EUROPE EN 2007*
PRIMARY ENERGY PRODUCTION OF BIOGAS IN EUROPE IN 2007*



LÉGENDE/KEY

Production d'énergie primaire de biogaz de l'Union européenne en 2007 (en ktoe)/
Primary energy production of biogas of the European Union in 2007 (in ktoe)

- Biogaz de décharges/Landfill gas
- Biogaz de stations d'épuration/Sewage sludge gas
- Autres biogaz (unités décentralisées de biogaz agricole, etc.)/Other biogas (decentralised agricultural plant, etc.)

5 901,2 Les chiffres en rouge indiquent la production totale en ktoe/ Red figures show total production in ktoe

* Estimación/Estimate.

Figura 57. Producción de biogás en Europa por países y fuente de procedencia⁸¹.

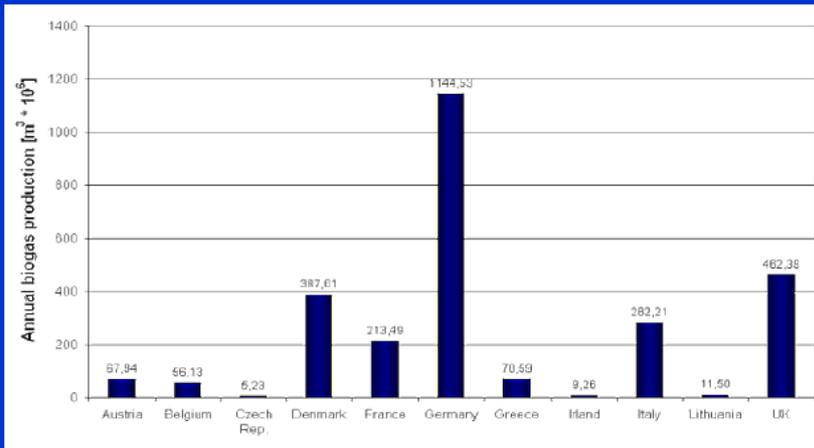
En las siguientes imágenes⁸² puede apreciarse la situación del biogás en Europa, en lo que se refiere a volumen de biogás producido, potencia instalada y volumen medio de planta (datos de 2007):

⁸¹ 010.EurObserv'ER.2008.Le baromètre du biogaz

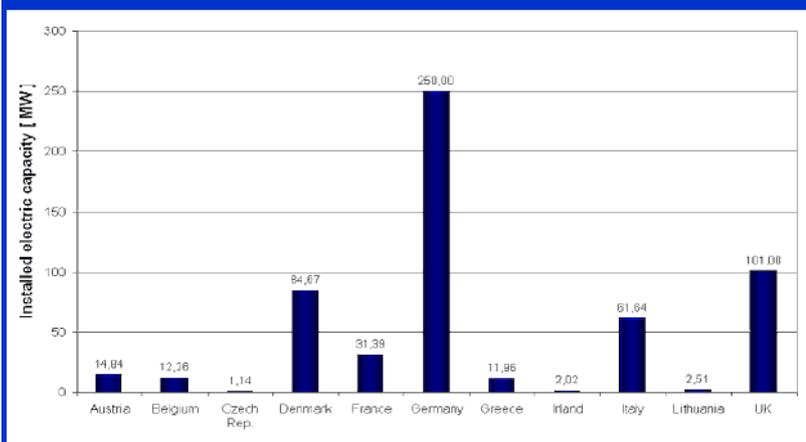
⁸² 011.UTECE.2007.Biogás-Sustratos, desarrollo técnico y costes



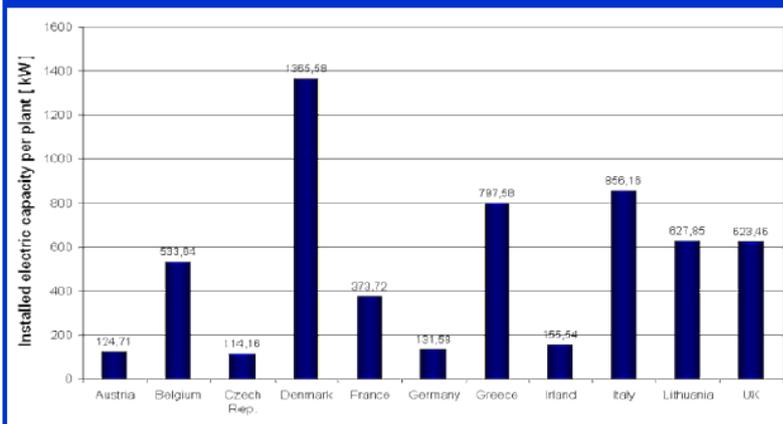
Producción de biogás en Europa (en millones de m³)



Potencia eléctrica instalada (MW)



Potencia eléctrica instalada promedio por planta (kW)



De manera más detallada, se procede a continuación a analizar las producciones de los países de la Unión, así como la generación de electricidad y de calor existentes⁸³:

⁸³ 010.EurObserv'ER.2008.Le baromètre du biogaz



**11 PRODUCTION D'ÉNERGIE PRIMAIRE DE BIOGAZ DANS L'UNION EUROPÉENNE EN 2006 ET EN 2007* (EN KTEP)
PRIMARY ENERGY PRODUCTION OF BIOGAS IN THE EUROPEAN UNION IN 2006 AND 2007* (IN KTOE)**

Pays/ Countries	2006				2007*			
	Décharges/ Landfill gas	Stations d'épuration/ Sewage sludge gas ¹	Autres biogaz/ Other biogases ²	Total/ Total	Décharges/ Landfill gas	Stations d'épuration/ Sewage sludge gas ¹	Autres biogaz/ Other biogases ²	Total/ Total
Allemagne/Germany	383,2	270,2	1 011,7	1 665,3	416,4	270,2	1 696,5	2 383,1
Royaume-Uni/UK	1 318,5	180,0	–	1 498,5	1 433,1	191,1	–	1 624,2
Italie/Italy	337,4	1,0	44,8	383,2	357,7	1,0	47,5	406,2
Espagne/Spain	251,3	48,6	19,8	319,7	259,6	49,1	21,3	329,9
France/France	150,5	144,0	3,6	298,1	161,3	144,2	3,7	309,2
Pays-Bas/The Netherlands	46,0	48,0	47,1	141,1	43,2	48,0	82,8	174,0
Autriche/Austria	11,2	3,5	103,4	118,1	10,7	2,0	126,4	139,1
Danemark/Denmark	14,3	21,0	57,6	92,9	14,3	21,0	62,6	97,9
Belgique/Belgium	51,0	17,6	9,1	77,6	48,1	18,0	12,5	78,6
Rép. tchèque/Czech Rep.	24,5	31,1	7,8	63,4	29,4	32,1	17,0	78,5
Pologne/Poland	18,9	43,1	0,5	62,4	19,1	43,0	0,5	62,6
Grèce/Greece	21,2	8,6	–	29,8	38,0	9,8	–	47,8
Finlande/Finland	26,1	10,4	–	36,4	26,4	10,3	–	36,7
Irlande/Ireland	25,4	5,1	1,8	32,3	23,9	7,9	1,7	33,5
Suède/Sweden	9,2	17,1	0,8	27,2	9,2	17,1	0,8	27,2
Hongrie/Hungary	1,1	8,0	3,1	12,2	2,1	12,4	5,7	20,2
Portugal/Portugal	–	–	9,2	9,2	–	–	15,4	15,4
Slovénie/Slovenia	6,9	1,1	0,4	8,4	7,6	0,6	3,8	11,9
Luxembourg/Luxembourg	–	–	9,2	9,2	–	–	10,0	10,0
Slovaquie/Slovakia	0,4	6,9	0,4	7,6	0,5	7,6	0,5	8,6
Estonie/Estonia	3,1	1,1	–	4,2	3,1	1,1	–	4,2
Lituanie/Lithuania	–	1,5	0,5	2,0	1,6	0,8	–	2,5
Chypre/Cyprus	–	–	0,0	0,0	–	–	0,2	0,2
UE/EU	2 007,3	867,8	1 330,8	4 898,9	2 905,2	887,2	2 108,0	5 901,2

1 Urbaines et industrielles/Urban and industrial. 2 Unités décentralisées de biogaz agricole, unités de méthanisation des déchets municipaux solides, unités centralisées de codigestion/
Decentralised agricultural plants, municipal solid waste methanisation plants, centralised codigestion plants

* Estimation/Estimate.



T2 PRODUCTION BRUTE D'ÉLECTRICITÉ À PARTIR DE BIOGAZ DANS L'UNION EUROPÉENNE EN 2006 ET EN 2007* (EN GWH)
GROSS ELECTRICITY PRODUCTION FROM BIOGAS IN THE EUROPEAN UNION IN 2006 AND 2007* (IN GWH)

Pays/ Countries	2006			2007*		
	Centrales électriques seules/Electricity plants only	Centrales fonctionnant en cogénération/ CHP plants	Électricité totale/ Total electricity	Centrales électriques seules/Electricity plants only	Centrales fonctionnant en cogénération/ CHP plants	Électricité totale/ Total electricity
Allemagne/Germany	–	7 446,0	7 446,0	–	9 520,0	9 520,0
Royaume-Uni/UK	4 424,0	463,0	4 887,0	4 795,6	503,4	5 299,0
Italie/Italy	1 061,9	241,8	1 303,7	1 125,6	256,3	1 381,9
Espagne/Spain	610,3	56,0	666,3	631,1	56,0	687,1
France/France	487,3	35,4	522,7	505,3	35,7	541,0
Pays-Bas/The Netherlands	146,1	215,2	361,3	274,2	223,2	497,4
Autriche/Austria	424,1	23,0	447,1	469,8	22,8	492,6
Danemark/Denmark	1,6	278,4	280,1	1,6	293,3	295,0
Belgique/Belgium	158,3	120,6	278,9	152,0	127,4	279,4
Rép. tchèque/Czech Rep.	63,1	112,8	175,8	80,3	142,6	222,9
Grèce/Greece	69,3	38,5	107,9	91,3	84,0	175,3
Pologne/Poland	0,0	160,1	160,1	0,0	160,1	160,1
Irlande/Ireland	108,4	13,6	122,0	101,9	16,9	118,8
Portugal/Portugal	25,2	7,4	32,6	58,0	7,3	65,4
Slovénie/Slovenia	8,6	26,1	34,7	8,9	39,2	48,2
Suède/Sweden	–	46,3	46,3	–	46,3	46,3
Luxembourg/Luxembourg	–	32,6	32,6	–	36,6	36,6
Finlande/Finland	0,9	21,4	22,3	0,9	21,4	22,3
Hongrie/Hungary	–	22,1	22,1	–	22,1	22,1
Estonie/Estonia	1,1	13,0	14,1	1,1	13,0	14,1
Lituanie/Lithuania	–	5,4	5,4	–	6,3	6,3
Slovaquie/Slovakia	–	4,0	4,0	–	4,0	4,0
Chypre/Cyprus	0,0	0,2	0,2	–	1,4	1,4
UE/EU	7 590,3	9 382,9	16 973,2	8 297,7	11 639,5	19 937,2

* Estimation/Estimate.

T3 PRODUCTION BRUTE DE CHALEUR À PARTIR DE BIOGAZ DANS L'UNION EUROPÉENNE EN 2006 ET EN 2007* (EN KTOE)
GROSS HEAT PRODUCTION FROM BIOGAS IN THE EUROPEAN UNION IN 2006 AND 2007* (IN KTOE)

Pays/ Countries	2006			2007*		
	Unités de chaleur seules/Heat plants only	Unités fonctionnant en cogénération/ CHP plants	Chaleur totale/ Total heat	Unités de chaleur seules/Heat plants only	Unités fonctionnant en cogénération/ CHP plants	Chaleur totale/ Total heat
Royaume-Uni/UK	61,9	–	61,9	61,9	–	61,9
France/France	44,4	5,8	50,2	47,4	5,8	53,2
Italie/Italy	–	38,6	38,6	–	40,9	40,9
Pologne/Poland	6,0	28,1	34,2	6,0	28,1	34,2
Rép. tchèque/Czech Rep.	10,0	13,9	23,9	9,6	14,3	23,9
Danemark/Denmark	3,7	17,1	20,9	4,7	18,8	23,6
Allemagne/Germany	8,7	14,5	23,2	8,7	14,5	23,2
Finlande/Finland	2,5	19,7	22,1	2,5	19,7	22,1
Suède/Sweden	4,7	11,7	16,4	4,7	11,7	16,4
Espagne/Spain	14,7	–	14,7	14,7	–	14,7
Belgique/Belgium	1,0	12,9	13,9	1,6	12,6	14,2
Autriche/Austria	4,7	4,2	8,9	4,3	4,2	8,5
Luxembourg/Luxembourg	–	4,4	4,4	–	5,0	5,0
Grèce/Greece	–	2,9	2,9	–	3,5	3,5
Irlande/Ireland	1,5	2,6	4,0	1,5	1,9	3,4
Slovaquie/Slovakia	2,3	0,9	3,2	2,3	0,9	3,2
Hongrie/Hungary	–	2,6	2,6	–	2,6	2,6
Estonie/Estonia	0,1	0,9	1,0	0,1	0,9	1,0
Pays-Bas/The Netherlands	–	1,0	1,0	–	1,0	1,0
Lituanie/Lithuania	–	0,3	0,3	–	0,3	0,3
Chypre/Cyprus	–	0,02	0,0	–	0,0	0,0
UE/EU	166,2	182,1	348,3	170,1	186,8	356,9

* Estimation/Estimate.

En las tablas anteriores se observa que Alemania es la mayor productora de Biogás en plantas específicas (no son vertederos o EDARs), seguida de Austria y Dinamarca. A continuación se procederá a analizar la estrategia seguida en los principales países productores, en lo que se refiere a normativas clave y modelos de negocio aplicados.



3.2. Situación del Biogás en Alemania

Alemania es, con diferencia, el mayor productor europeo en el campo del biogás, liderando la producción en el campo de la generación a partir de residuos agrícolas y ganaderos, así como en la generación de biogás de depuradora. En cuanto a la producción de biogás de vertedero, se sitúa segunda en Europa, tras el Reino Unido.

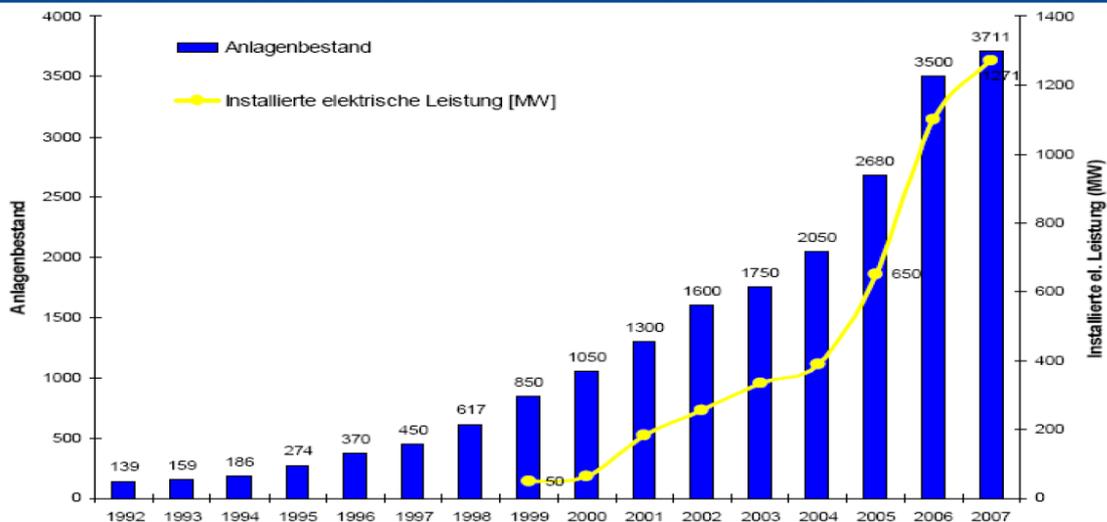
El modelo de negocio predominante en Alemania consiste en pequeñas unidades de metanización en granjas (más del 70% del total).

El marco normativo regulador actualmente en vigor en Alemania es el Texto Refundido de la Ley de Energías Renovables (*Erneuerbare Energien Gesetz, EEG⁸⁴*), en vigor desde el 1 de Enero de 2009. Esta norma sustituye a una anterior del año 2004.

Ambas normas se basan en favorecer la generación de electricidad procedente de fuentes de energía renovables frente a las fuentes de energía tradicionales, mediante una prima económicamente más seductora, y mayores facilidades para la conexión a red. Además, las autoridades priorizan la adquisición, transporte y retribución de las energías renovables por parte de los operadores de red. No obstante, dicha prima era escasa en comparación con otros países europeos (por ejemplo, España), haciéndose necesaria la modificación actualmente vigente, anunciada por el ministro Sigmar Gabriel en Junio de 2008.

Como se puede apreciar en el gráfico que se muestra a continuación⁸⁵, el crecimiento en instalaciones para la producción de biogás en Alemania ha sido espectacular en los últimos años, en base a una suculenta prima por parte de las autoridades para incentivar estos aprovechamientos.

Biogasnutzung in Deutschland – Entwicklung von 1992 - 2007



Quelle: Erhebung bei Ministerien und angegliederten Behörden der Länder durch den Fachverband Biogas e.V., Stand 09/07

Figura 58. Número de instalaciones de producción de biogás, y potencia instalada (MW) en Alemania entre 1992 y 2007

⁸⁴ 014.DBT.2008.EEG

⁸⁵ 011.UTEC.2007.Biogas-Sustratos, desarrollo técnico y costes

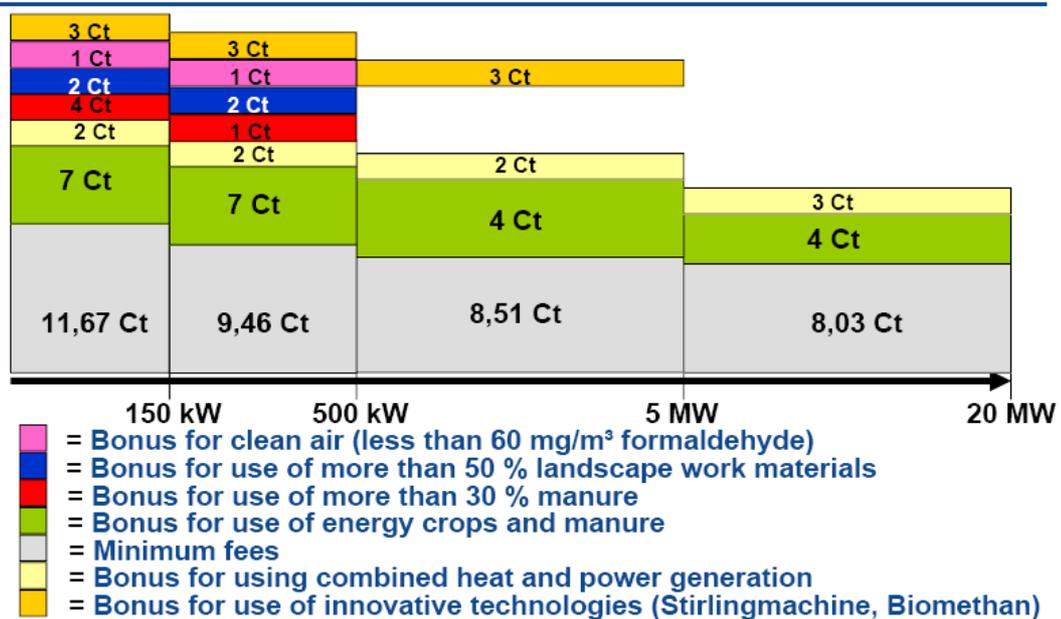


Con sus altibajos en la rentabilidad (la dependencia del precio de mercado de las materias primas, en general, cereales y, en particular, maíz), se han implantado un altísimo número de instalaciones a pequeña escala en granjas. A continuación se muestra un extracto de los conceptos en los que se dividen las primas alemanas para la generación de biogás⁸⁶, así como un gráfico en el que se representan estos conceptos⁸⁷

Ley de las Energías sostenibles (EEG 2009)

		<=150 kW	<=500 kW	<= 5 MW
1.	Compensación básica	11.67 Cent (+ 1 Cent)	9.18 Cent (sin cambios)	8.25 Cent (sin cambios)
2.	Bono formaldehído - nuevo	Planta vieja	1.0 Cent	1.0 Cent
		Planta nueva	1.0 Cent	1.0 Cent
3.	Bono recursos renovables	7 Cent (+ 1 Cent)	7 Cent (+ 1 Cent)	4 (sin cambios)
4.	Bono conservación de paisaje – nuevo	2 Cent	2 Cent	
5.	Bono estiércol – nuevo	4 Cent	1 Cent	
6.	Bono tecnologías innovadoras (sin alimentación de gas)	2 Cent (sin cambios)	2 Cent (sin cambios)	2 Cent (sin cambios)
7.	Bono tecnología (Alimentación de gas)	Planta nueva	Depende en la cantidad de la alimentación	
		Planta vieja	2 Cent	
8.	Bono combinación fuerza-calor	0/2/3 Cent	0/2/3 Cent	0/2/3 Cent

2009: Minimum fees for electricity produced from biogas in plants with a capacity of up to 20 MW – new EEG 2009



3.3. Situación del Biogás en el Reino Unido

El Reino Unido es el segundo productor de biogás en Europa, si bien la producción se basa mayoritariamente en la generación de biogás de vertedero, siendo prácticamente testimonial la producción en plantas no asociadas a depuradoras o vertederos.

⁸⁶ 016.AAB.2009.Asoc Alemana Biogas David Wilken Fachverband Biogas

⁸⁷ 018.AAB.2008.Biogas in Germany



Esto se debe a la política establecida por la norma “Renewables Obligation Order”⁸⁸, que establece la obligatoriedad para los productores eléctricos de la generación de un porcentaje mínimo, variable según el periodo, de energías renovables en su suministro energético. Hasta este punto, nada resulta sorprendente. Lo novedoso de esta política es la obtención de Certificados de Energías Renovables (ROCs), con los que se justifica esta producción. Estos certificados son transferibles, de tal modo que un productor que no llega al cupo necesario de energía procedente de renovables en su suministro puede obtener estos certificados de otro productor que haya cubierto sobradamente este porcentaje mínimo (no obstante, le queda la opción de pagar una multa (“*buy-out price*”) proporcional al déficit.

Gran Bretaña tiene un modelo de retribución variable, regulado por la orden de obligatoriedad de las renovables. El operador de las plantas cobra por la energía generada el precio de mercado y obtiene además un certificado de renovables (*Renewable Obligation Certificate* ROC).

Cada operador está obligado a generar un porcentaje determinado de energía a partir de energías renovables que se incrementa año tras año. El cumplimiento con la obligación se justifica a través de los certificados ROC adquiridos. Si un explotador no alcanza el porcentaje fijado, está obligado a pagar una sanción (*buy-out-price*), determinada anualmente por el OFGEM (*Office of Gas and Electricity Markets*). La sanción se ingresa en un fondo y se reparte anualmente entre los operadores que han comprado ROCs.⁸⁹

Los precios para energía renovables se fijan semestralmente en subastas de energías renovables (*green power auctions*), realizadas por la agencia de compra de energías no fósiles (*Non-Fossil Purchasing Agency*).

Como datos objetivos, en la subasta de energías renovables del 6 de febrero de 2009, se pagó un precio medio de 9,20 c€/KWh para energía eólica. Las subastas de ROCs se realizan mensualmente, siendo en una de las últimas subastas realizadas 51,81 £ por ROC el precio medio de estos certificados.^{90 91}

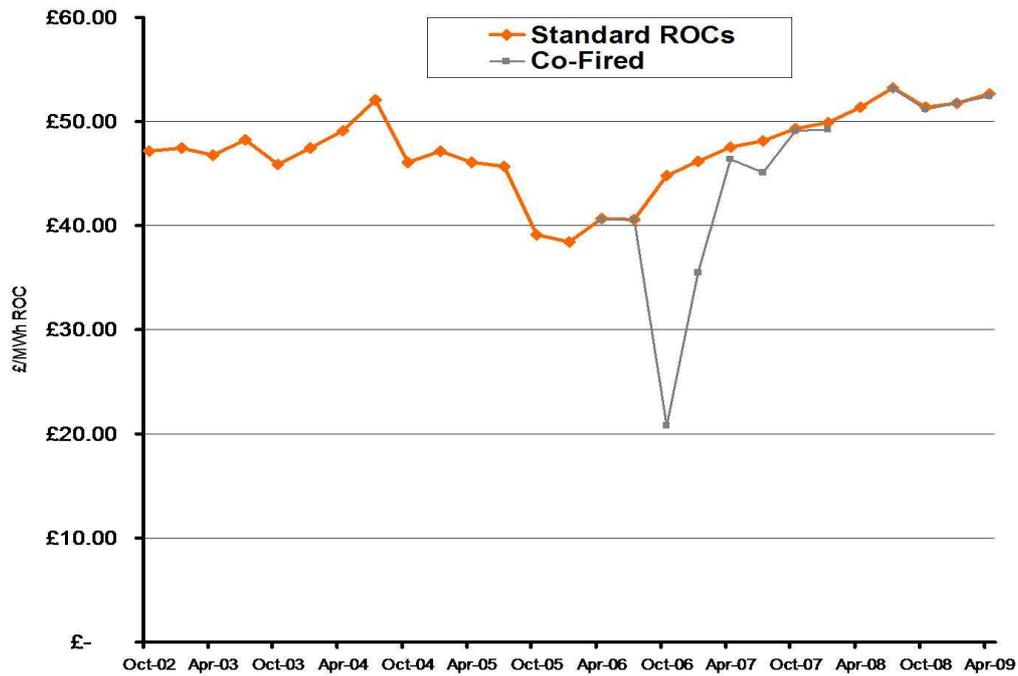
⁸⁸ 013.BERR.2009. *Renewables obligation order 2009*

⁸⁹ 015.NAO.2005. *Renewable Energy*

⁹⁰ Non-Fossil Purchasing Agency: <http://www.nfpa.co.uk/auctionprices.html>

⁹¹ 015.NAO.2005. *Renewable Energy*





La agrupación por tecnologías asigna a cada energía renovable una clase en función del grado de desarrollo de la tecnología asociada. Se incentivan más las tecnologías emergentes mediante una diferenciación de las ROCs concedidas.



AMOUNT OF ELECTRICITY TO BE STATED IN ROCs GENERALLY

<i>Generation type</i>	<i>Amount of electricity to be stated in a renewables obligation certificate</i>
Electricity generated from landfill gas	4 megawatt hours
Electricity generated from sewage gas	2 megawatt hours
Co-firing of biomass	
Onshore wind	
Hydro-electric	
Co-firing of energy crops	
Energy from waste with CHP	1 megawatt hour
Geopressure	
Co-firing of biomass with CHP	
Standard gasification	
Standard pyrolysis	
Offshore wind	
Dedicated biomass	$\frac{2}{3}$ megawatt hour
Co-firing of energy crops with CHP	
Wave	
Tidal-stream	
Advanced gasification	
Advanced pyrolysis	
AD	
Dedicated energy crops	$\frac{1}{2}$ megawatt hour
Dedicated biomass with CHP	
Dedicated energy crops with CHP	
Solar photovoltaic	
Geothermal	
Tidal impoundment – tidal barrage	
Tidal impoundment – tidal lagoon	

Figura 59. Equivalencia en ROCs por energía generada según la fuente renovable de la que proceden. En rojo, las fuentes de biogás (vertedero, depuradora y digestores no asociados, AD). Extraído de la Renewables Obligation Order, 2009.

Aparte del precio de mercado, existe una ventaja fiscal para operadores, (*Levy Exemption Certificates*, LEC). Estos certificados libran a los operadores del impuesto por el cambio climático (*Climate Change Levy*), que se recauda de electricidad, carbón y gas.

3.4. Situación del Biogás en Dinamarca

A pesar de que Dinamarca posee una población de menos de 6 millones de habitantes, constituye un referente europeo y mundial en el campo de las renovables, en general, y de la digestión anaerobia, en particular. Constituye un caso singular, por presentar un modelo de negocio muy característico, forjado a base de cooperativas agrícolas y ganaderas⁹². Es decir,

⁹² 006. USD.2000.Danish Centralised Biogas Plant. Plant Descriptions



varios pequeños productores de residuos se agrupan bajo una organización cuyo objetivo es el de explotar conjuntamente una instalación de producción de biogás. De este modo, obtienen por un lado, un destino para los residuos generados difíciles de gestionar, eliminando el coste del tratamiento, del almacenamiento, u otros costes asociados, y por otro lado, obtienen un rendimiento económico del proceso.

Además, el marco político de Dinamarca en materia de residuos, incluye las siguientes políticas, que han reforzado la apuesta por la digestión anaerobia en el país⁹³:

- Las leyes estatales prohíben el depósito en vertedero de la materia orgánica, que debe ser reciclada o incinerada.
- Los impuestos sobre las actividades de incineración de materia orgánica son muy elevados.
- Entre un 20 y un 50% del capital necesario para la instalación ha sido sufragado por el estado mediante subvenciones (actualmente ya no se subvenciona).
- El marco legal determina un precio mínimo para la electricidad obtenida mediante digestión anaerobia.
- Préstamos a bajo interés para los sistemas de calefacción urbana.

Se puede afirmar que Dinamarca es el país más especializado en codigestión a nivel mundial.

3.5. Situación del Biogás en Austria

La situación en Austria representa un modelo de desarrollo óptimo para el biogás, protagonizado por un inicio prácticamente testimonial, al principio de la primera década del milenio, por parte de la tecnología desarrollada en las plantas de biogás, junto con un fuerte aumento en el aprovechamiento del biogás de vertedero y depuradoras.

No obstante, en el año 2002, se aprobó un nuevo sistema tarifario en el país para el sector del biogás, lo que propició un espectacular aumento de la producción, tanto a nivel de vertederos-depuradoras como de plantas específicas-

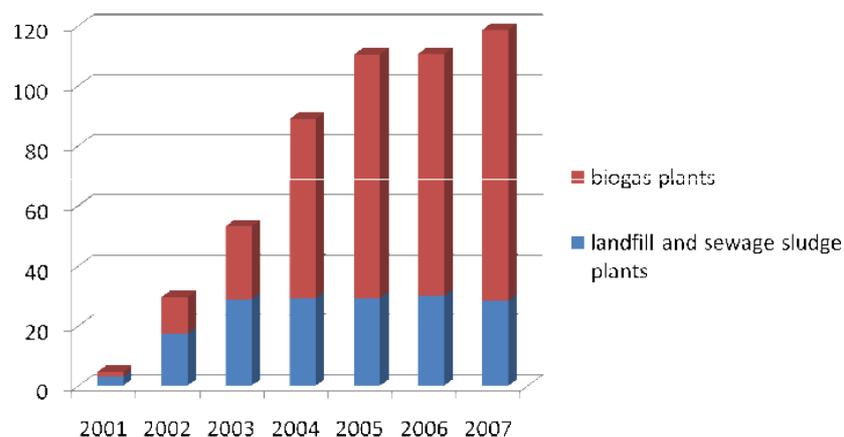


Figura 60. Desarrollo anual de las instalaciones de generación de biogás en Austria⁹⁴

⁹³ 017.NNFCC.2008.Andersons AD Report.



El desarrollo de las instalaciones en vertederos y depuradoras se frenó en el año 2003, posiblemente por la rentabilidad que ofrecen las primas de las plantas pequeñas, comparativamente mayor que en vertederos y EDARs, como se aprecia en la siguiente imagen. Además, la reducción de las primas entre 2006 y 2008 ha frenado drásticamente el ritmo de desarrollo.⁹⁵

	Capacity KW el	Feed in tarif 2008,valid for 10 years	Feed in tarif 2007,valid for 10 years	Feed in tarif 2006,valid for 10 years	Feed in tarif 2002.valid 13 years
Agricultural	To 100	16,94	16,95	17	16,5
biogas	100-250	15,14	15,15	15,2	14,5
plants	250-500	13,99	14	14,1	14,5
	500-1000	12,39	12,40	12,60	12,50
	Over 1000	11,29	11,3	11,5	10,3

Figura 61. Primas para las plantas de biogás de agricultura en Austria⁹⁶

	El.capacity in KW	Feed in tarif 2008,valid 10 years	Feed in tarif 2007,valid 10 years	Feed in tarif 2006,valid 10 years	Feed in tarif 2002,valid 13 years
Biogas	To 100	11,85	11,86	11,9	12,37
Plants	100-250	10,59	10,6	10,64	10,87
With	250-500	9,79	9,8	9,87	10,87
Coferments	500-1000	8,67	8,68	8,82	9,37
	Over 1000	7,9	7,9	8,05	7,72
Sewage sludge plants		5,94	5,95	6	6 bis 1MW
Landfill gas plants		4,04	4,05	4,1	3 über 1 MW

Figura 62. Primas para las plantas de biogás con codigestión en Austria⁹⁷

⁹⁴ 019.AEBIOM.2008.The Case of Austria

⁹⁵ 019.AEBIOM.2008.The Case of Austria

⁹⁶ 019.AEBIOM.2008.The Case of Austria

⁹⁷ 019.AEBIOM.2008.The Case of Austria



3.6. Situación del Biogás en Italia

A pesar de que existe un salto muy acusado entre la producción en Italia y la existente, por un lado, en los dos grandes productores europeos (Alemania y Reino Unido), y por otro, en los países con un modelo de alta generación de biogás por habitante (Dinamarca, Austria y otros no reseñados), merece la pena destacar el modelo de negocio de Italia, por su similitud con el caso español.

El grueso de la producción de biogás del país se debe a la generación de biogás de vertedero. No obstante, en los últimos años ha aumentado considerablemente la producción en digestores, debido a la aplicación de un modelo similar al aplicado en el Reino Unido: Existe una obligación legal para los productores eléctricos de suministrar un determinado porcentaje de energía procedente de energías renovables, lo que se acredita mediante la adquisición de “Certificados Verdes”, similares a los ROCs anteriormente mencionados.

El cambio se ha debido al reconocimiento por parte del GRTN (operador y gestor de red en Italia) de las plantas de biogás a partir de residuos vegetales y materia orgánica como posibilidad de obtención de estos certificados, lo que anteriormente no se producía.

El precio medio de los certificados verdes en Italia ha rondado los 13-15 c€/kWh en los últimos años, lo que ha revalorizado económicamente este mercado.

El modelo de mercado es, generalmente, en forma de plantas pequeñas-medianas, aunque, puntualmente, existen plantas centralizadas (cooperativas) de mayor tamaño.

La evolución del mercado italiano del biogás de digestión anaerobia ha sido la siguiente⁹⁸:

- En 1999 había 72 plantas de biogás alimentadas con purines de vacuno y de cerdo.
- En 2004 las plantas eran 100, 70 de bajo coste con una simple cobertura de las balsas de acumulación
- De 2004 a 2006 se han construido 50 plantas de biogás alimentadas en su mayoría por cultivos energéticos y purines
- La tarifa de venta de la energía eléctrica producida en el año 2008 era de unos 0,3 €/kWh.

3.7. Situación del Biogás en otros países no europeos

Fuera de la Unión Europea, los casos más destacables son los de China e India, en los que se calculan varios millones de pequeñas plantas para la producción de biogás. El modelo de planta existente es, en general, para autoconsumo de la vivienda o instalación.

En el caso de China, existe una Plan Nacional para conseguir que el 20% de las explotaciones agrícolas y ganaderas tengan implantados sistemas de digestión anaerobia para el aprovechamiento del biogás, lo que, a fecha de 2007, y con el plan en ejecución, suponía unos 15 millones de plantas.

⁹⁸ 045.AB.2008.Valorización energética del biogás_Alfredo Lietti



4. SITUACIÓN ACTUAL DEL BIOGÁS EN ESPAÑA

4.1. Marco Legal y retributivo

Actualmente, existen varios planes y normas legales que determinan, por un lado, las líneas a seguir desde el punto de vista de las actuaciones de la administración, y por otro, el marco legal aplicable para el sector del biogás. Para analizar este panorama, dividiremos este estudio en la descripción del marco de las políticas y planes que establecen las líneas de actuación, y posteriormente, las normas legales que aplican los planes.

4.1.1. Planes y políticas que definen las pautas a seguir

En primer lugar, procederemos a analizar las generalidades de los planes estatales en los que se trata la producción de biogás. Básicamente, los Planes que marcan las líneas a seguir en este campo son los siguientes:

- Plan de Energías Renovables (PER) 2005-2010⁹⁹
- Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015¹⁰⁰
- Plan de Biodigestión de Purines¹⁰¹
- Planificación Sectorial de Gas y Electricidad 2008-2016¹⁰²

Además, a nivel andaluz encontramos los siguientes planes:

- Plan Andaluz de Sostenibilidad Energética (PASENER) 2007-2013¹⁰³
- Plan Director Territorial de Gestión de Residuos Urbanos de Andalucía.¹⁰⁴

Procederemos a continuación a analizar individualmente cada uno de estos Planes.

4.1.1.1 Plan de Energías Renovables (PER) 2005-2010

El PER 2005-2010 analiza, en su capítulo 3.7, el área del biogás. Es preciso considerar que, desde la fecha de redacción del Plan, el sector del biogás ha aumentado espectacularmente en Europa, por lo que las determinaciones incluidas en dicho Plan con respecto a la digestión anaerobia resultan un tanto obsoletas. De hecho, resulta muy ilustrativo el hecho de que los objetivos que se marcaban en el plan anterior con respecto al año 2010, resultaron cubiertos ampliamente en el año 2003, con 7 años de antelación, lo que refleja el salto del mercado.

⁹⁹ 021.MITYC.2004.PER 2005-2010 9Cap37_AreaBiogas

¹⁰⁰ 022.MMARM.2009.PNIR 2008-2015 BOE

¹⁰¹ 024.MMARM.2009.PLAN BIODIGESTION PURINES

¹⁰² 023.MITYC.2008.Planificación Sectorial de Gas y Electricidad 2008-2016

¹⁰³ 020.CICE.2007.PASENER_2007-2013

¹⁰⁴ 025.CMA.1999.Decreto 218_99.PDTGRSUA



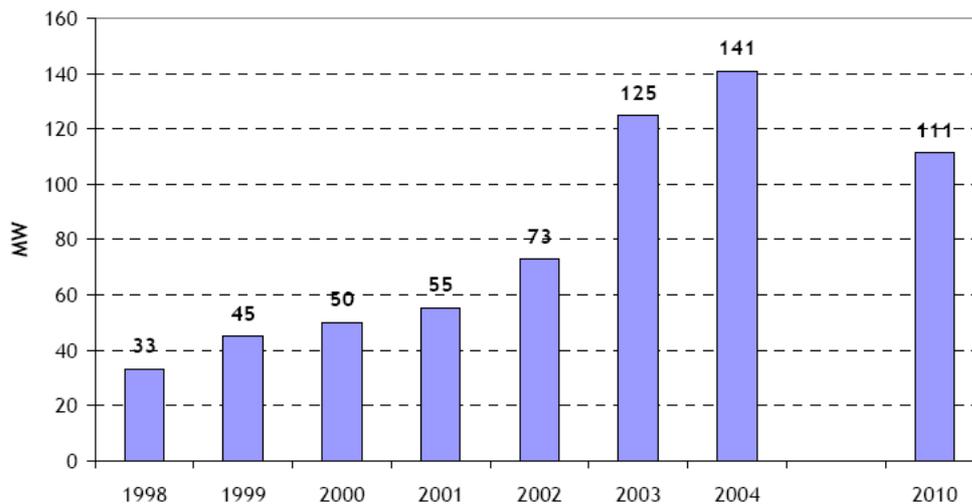


Figura 63. Evolución del consumo de biogás y previsiones en el marco del Plan de Fomento, en términos de potencia instalada (IDAE). Extraído del PER 2005-2010

Asimismo, es preciso considerar que previamente a la entrada en vigor del Plan, únicamente existían 30 proyectos de generación de biogás en explotación en España, incluyéndose vertederos y EDARs en este inventario.

Biogás: proyectos en explotación (1999-2004)

	Número de proyectos	Energía primaria (tep)	Objetivo del Plan 2010 (tep)	Cumplimiento del objetivo (%)
Tratamientos de aguas residuales	3	3.222	59.832	5,4%
Residuos ganaderos	2	3.875	7.643	50,7%
Residuos industriales	1	1.798	26.539	6,8%
Gas de vertederos	24	177.438	55.986	316,9%
TOTAL	30	186.333	150.000	379,8%

En el Plan se realiza una relación de las principales barreras que dificultan el desarrollo del uso energético del biogás, indicándose lo siguiente:

Barreras en la fase de producción:

Alternativas de interés económico, en especial el secado de purines empleando como combustible gas natural

La inclusión en el régimen especial de producción eléctrica del secado de purines con gas natural ha alejado a los posibles inversores del uso de la tecnología de digestión anaerobia para el tratamiento de este tipo de residuos, por razones puramente económicas, de rentabilidad de los proyectos.

Complicación tecnológica, con relación a la actividad tradicional del productor del residuo



En el ámbito del empleo de los residuos ganaderos, cabe señalar que el desarrollo de tecnologías de digestión anaerobia dista mucho de ser algo habitual en el medio rural, siendo percibido por parte de los ganaderos como algo ajeno a su actividad. Difundir las posibilidades de esta tecnología en las zonas productoras del residuo resultará ser algo fundamental de cara al futuro de estas aplicaciones.

Por otro lado, algo similar ocurre con el aprovechamiento de los residuos industriales biodegradables o los lodos de depuración de aguas residuales urbanas para la producción de biogás con fines energéticos, pues en ambos casos la aplicación energética suele ser algo ajeno a la actividad tradicional del productor del residuo.

Cumplimiento de lo dispuesto en la Directiva 1999/ 31 acerca de la eventualidad de depositar materia orgánica en vertederos

La Directiva sobre vertederos pretende conseguir, entre otros objetivos, que la cantidad de materia orgánica que se deposite en los mismos sea cada vez menor. Esto tiene una repercusión innegable sobre las posibilidades futuras del desarrollo de aplicaciones de aprovechamiento de biogás procedente de la desgasificación de vertederos, pues aquel se produce precisamente por la fermentación de la materia orgánica.

Barreras en la fase de aplicación:

Elevadas inversiones

El interés fundamental de desarrollar proyectos de uso energético de biogás parte de una motivación ambiental, no energética. Ello es así por la propia naturaleza de los proyectos, ligados al tratamiento de un residuo, pero también por las altas inversiones por unidad de potencia instalada. Éstas provocan además que los proyectos sean viables sólo a partir de determinada escala de tratamiento de residuos.

Para minimizar la presencia de estas barreras, se plantean en el Plan también una serie de medidas, encaminadas a fomentar el establecimiento de las energías correspondientes al aprovechamiento del biogás, mediante la promoción del sector:

Difusión de las tecnologías existentes entre estamentos afectados, como Ayuntamientos, Diputaciones y otros.

Está demostrado que, pese al avance registrado en términos relativos por las aplicaciones de uso energético del biogás en nuestro país durante los últimos años, este tipo de tecnologías siguen siendo en buena parte desconocidas para muchos de los agentes implicados en un posible desarrollo de las mismas. Esto es especialmente significativo cuando de entidades públicas se trata, lo que supone un problema pues son éstas precisamente las que deberán actuar como promotoras de los proyectos en la mayor parte de los casos.

Promoción de aquellas tecnologías, que han demostrado su viabilidad técnica y sus ventajas medioambientales, para el tratamiento de los residuos de la actividad agrícola-ganadera, mediante la digestión anaerobia de los mismos, generando biogás, y su posterior valorización energética.



El empleo de tecnologías de digestión anaerobia para el tratamiento de los residuos de la actividad agro-ganadera deberá suponer en un futuro cercano una de las mayores áreas de expansión de esta actividad en nuestro país. El empleo del secado de este tipo de residuos, y en especial de los purines, a partir de la combustión de gas natural, es poco eficiente desde el punto de vista energético y económico, por lo que debería convertirse en una prioridad el conseguir que en el corto plazo se produzca un cambio hacia un mayor empleo de la digestión anaerobia en estas aplicaciones.

Mantenimiento sin variaciones del régimen económico aplicable a las instalaciones de generación eléctrica con biogás, tal y como se redactó en su día en el RD 436/2004, de 12 de marzo.¹⁰⁵

La publicación del Real Decreto 436/ 2004, de 12 de marzo, supuso dentro del ámbito de la generación eléctrica con biogás la consolidación de un régimen económico favorable al desarrollo de este tipo de aplicaciones. Teniendo esto en cuenta, así como la positiva evolución del sector durante estos últimos años, no parece adecuado promover alteraciones en el régimen económico que afecta a la electricidad vendida a la red por este tipo de instalaciones.

Desarrollo de procesos de co-digestión.

De cara al futuro el desarrollo tecnológico resulta fundamental para conseguir unos mayores rendimientos de las instalaciones, que permitan mayores rentabilidades. Dentro de este interés, el desarrollo de procesos de co-digestión, en los que se someten a un proceso de digestión anaerobia residuos de diversas procedencias, resulta fundamental, y para conseguirlo se deberá realizar aún una importante tarea en el ámbito del I+D.

Como se puede apreciar, resulta evidente la escasa actualidad del Plan. De hecho, actualmente se encuentra en redacción el nuevo Plan, con vigencia a partir de 2011. En cualquier caso, sí que se aprecia un giro, partiendo de la base de que es un tratamiento ambiental, en el sentido de motivar el aprovechamiento energético del biogás con el fomento e investigación de las tecnologías, la difusión, el estudio de la codigestión y el mantenimiento de las primas vigentes para la generación eléctrica.

4.1.1.2 Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015

El Plan Nacional Integrado de Residuos, publicado en BOE de 26 de febrero de 2009, constituye el documento base para las estrategias de gestión de los diferentes residuos que se generan en España, aglutinando varios planes, como el de Neumáticos Fuera de Uso, el de Vehículos al Final de su Vida Útil, etc.

En dicho Plan se incluye la Estrategia Española de Reducción de la Cantidad de Residuos Biodegradables Destinados a los Vertederos. En la misma, se establece una serie de medidas encaminadas a minimizar el volumen de residuos biodegradables que tienen entrada en los vertederos. Entre estas medidas, podemos encontrar las siguientes:

¹⁰⁵ Nota: Actualmente, el régimen especial se regula por el RD 667/2007, que deroga al mencionado.



- Fomento de la separación de los residuos en origen, a nivel domiciliario
- Aumento de las actividades de separación en plantas de gestión
- Aumentar las exigencias por parte de los vertederos para la aceptación de los residuos
- Actividades de valorización: Compostaje, biometanización, valorización energética (incineración)
- Adecuación de los procesos de biometanización al tratamiento de FORSU

En el Plan se incluye también información sobre las plantas de triaje, compostaje y biometanización existentes en España (año 2006), resumiéndose en la siguiente tabla:

INSTALACIONES DE TRIAJE BIOMETANIZACIÓN Y COMPOSTAJE				DATOS DE 13 INSTALACIONES AÑO 2006 (t)	
Tipo de Entrada	Nº Plantas	Capacidad Total (t/a)	Capacidad biometanización (t/año)	Tipo de Entrada	Cantidad Entrada Biometanización (t)
RSU	12	1.946.781	648.510		
FO SEECT y RSU	4	927.497	497.525	FO SELECT	85.525
FO SELECT	1	25.000	25.000	RSU	397.000
FO SELECT+LODOS	1	123.250	30.000	FO SELECT+LODOS	1.927
TOTALES	18	3.022.528	1.201.035	TOTALES	484.452

En el Plan se señalan como prioritarias las siguientes actuaciones:

- Realización de proyectos piloto dirigidos a impulsar medidas para la recogida selectiva y el reciclado.
- Actuaciones destinadas a fomentar el compostaje doméstico
- Captación y aprovechamiento de biogás en vertederos de RSU
- Recuperación de suelos contaminados
- Actuaciones destinadas a erradicar el vertido ilegal

4.1.1.3 Plan de Biodigestión de Purines

El Gobierno de España ha diseñado un Plan para la reducción de las emisiones de GEIs a nivel nacional mediante el tratamiento de 9,5 millones de toneladas de purines al año, reduciéndose la emisión de CO₂ en un volumen de 1,78 millones de toneladas al año.

En el Plan se tratan, entre otros temas, la valorización agrícola del digestato generado durante los procesos de digestión anaerobia.

El documento resalta la problemática derivada de la utilización de los purines sin tratar como fertilizante agrícola, lo que genera inconvenientes debidos a la presencia excesiva de nitratos en el suelo, generando la contaminación de acuíferos y similares.

Como punto interesante en el Plan de Biodigestión de Purines, se indica la viabilidad de utilización de cubiertas para las balsas de purines, aprovechando el biogás generado de una manera barata, y eliminando la afección debida a los olores.



Con ello, se consiguen además aumentar las posibilidades de desarrollo de regiones con escasos recursos, minimizando además la dependencia energética con respecto a otras.

Este Plan sienta las bases de las subvenciones para la instalación de los mecanismos de aprovechamiento del biogás, que se explicarán más adelante dentro del presente documento, en el apartado correspondiente a la normativa.

4.1.1.4 Planificación Sectorial de Gas y Electricidad 2008-2016

La Planificación incluye la producción de energías renovables. Concretamente, sobre el biogás, se establecen los objetivos que se indican en la siguiente tabla, para 2011 y 2016:

GWh	2006	2011	2016
Hidroeléctrica sist REE	25.319	32.124	34.095
<i>Generación por bombeo</i>	-3.683	-5.130	-8.023
Hidroeléctrica resto	4.183	6.692	7.829
Eólica	23.377	48.661	64.411
Solar termoeléctrica	0	1.047	3.970
Solar fotovoltaica	107	1.693	4.596
Biomasa, biogas y residuos	8.351	16.715	24.260
<i>Residuos no renovables y tratamiento de residuos</i>	-4.665	-4.665	-4.665
TOTAL	52.989	97.137	126.472

Fuente: Subdirección General de Planificación Energética

Tabla 2.6. Generación eléctrica con energías renovables (GWh)

Como se puede apreciar, la generación eléctrica mediante biomasa, biogás y residuos debe duplicarse para el año 2011, con respecto a 2006, y triplicarse para el 2016.

4.1.1.5 Plan Andaluz de Sostenibilidad Energética (PASENER) 2007-2013

A nivel autonómico, el principal Plan existente es el PASENER, que marca unos objetivos altamente exigentes para las energías renovables en Andalucía. Este Plan sustituye al Plan Energético de Andalucía (PLEAN) 2003 – 2006.

El objetivo básico del plan es el de adaptar la estructura energética andaluza a las exigencias europeas, reduciendo las emisiones de GEIs y la importación de combustibles, mejorando la eficiencia energética autonómica, así como la utilización de fuentes de energía renovables.

Respecto al biogás, en el Plan se indica lo siguiente:

“La metanización de residuos orgánicos es una tecnología poco utilizada en Andalucía. Los sectores donde se encuentra más implantada la obtención de biogás son las plantas de aguas residuales urbanas, las plantas de residuos sólidos urbanos, y las instalaciones industriales. El potencial es elevado.”

“Es necesario realizar un esfuerzo importante en el desarrollo de tecnología de digestión anaerobia, así como de control de los procesos a fin de posibilitar el uso de un gran número de residuos, favoreciendo la aparición de los sistemas de co-digestión.”



En el PASENER se incluye el siguiente gráfico, que resulta bastante ilustrativo con respecto a la situación del biogás en nuestra comunidad:

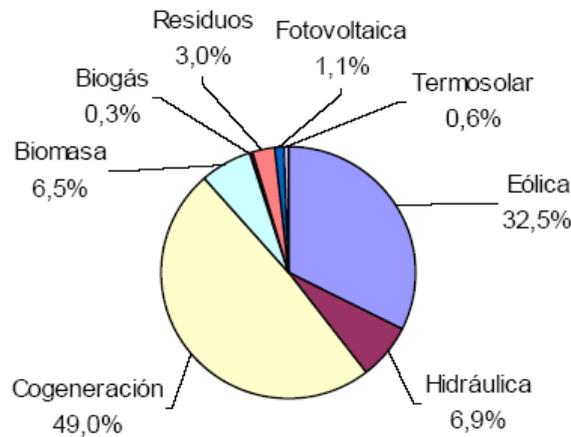


Figura 64. Potencia instalada por tecnología en Régimen Especial en el año 2006. El total es de 1.869,2 MW, por lo que la potencia instalada de biogás sería de 56,1 MW.

Fruto del análisis de la situación energética de la comunidad, y de los objetivos marcados por el Plan, surge la tabla que se muestra a continuación, en la que se incluyen los objetivos previstos para 2010 y 2013:

Cuadro 25

Energías renovables por tecnologías (paramétrico)		2007	2010	2013
Hidráulica régimen especial	MW	129,8	137,8	148,0
Hidráulica régimen ordinario	MW	464,2	476	476
Eólica	MW	1.284	4.000	4.800
Solar fotovoltaica	MWp	36,2	55,4	100,0
Solar térmica	m2	407.000	765.228	1.341.554
Solar termoeléctrica	MW	60	250	575
Biomasa uso térmico	ktep	583,5	615,6	649,0
Biomasa generación eléctrica	MW	169,9	209,9	256,0
Biomasa co-combustión	MW	0	61	122
Biogás uso térmico	ktep	2,1	2,5	3,0
Biogás generación eléctrica	MW	16,0	17,1	20,1
Biocarburantes consumo	ktep	50	220	460
Biocarburantes producción	ktep	263,7	2.000	2.300
Energía primaria procedente de fuentes renovables	ktep	1.401	2.570	3.921

Entre las medidas del PASENER para alcanzar los objetivos propuestos, se incluye, con la referencia ME7, un Programa de fomento del ahorro energético y las energías renovables en la industria agroalimentaria.



Otra de las medidas (MA20) indica la necesidad de desarrollar un reglamento para la ley de fomento de las energías renovables, que trataremos posteriormente, y que regulará el aprovechamiento energético del biogás, entre otros aspectos.

4.1.1.6 Plan Director Territorial de Gestión de Residuos Urbanos de Andalucía.

El Plan de Residuos andaluz, aunque antiguo, establece dos subprogramas que se suman al Plan de Medio Ambiente entonces vigente (1995 – 2000). Estos subprogramas son los siguientes:

- Minimización de residuos urbanos, con los objetivos de potenciar la recogida selectiva y dotar, por tanto, a los Municipios de equipamientos suficientes.
- Control y gestión de residuos urbanos, con los objetivos de completar las infraestructuras para la gestión y potenciar el aprovechamiento energético.

Para el cumplimiento de este último subprograma se proponen una serie amplia de acciones, como son:

- Construcción de plantas para recuperación y fabricación de abonos orgánicos para generación de más de 50.000 t/año de compost.
- Construcción de vertederos controlados en zonas de menor densidad de población, o como apoyo a otras instalaciones.
- **Construcciones para el aprovechamiento de biogás.**
- Promoción del reciclaje, del aprovechamiento de biomasa, de la recogida selectiva en origen, tratamiento de residuos inertes, etc.

4.1.2. Normas de aplicación básicas

Se procede a continuación a realizar un somero análisis de la normativa que afecta directamente al sector del aprovechamiento del biogás en Andalucía, con particular interés en lo que respecta a la retribución y posibilidades económicas (subvenciones, etc.).

4.1.2.1 Real Decreto 661/2007, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial

El RD 661/2007 constituye la norma básica para todas las instalaciones de generación eléctrica incluidas dentro del Régimen Especial. La norma marca el procedimiento administrativo para la inclusión en el registro, y, sobre todo, resulta de gran trascendencia porque determina el régimen retributivo de las instalaciones del RE. En concreto, las instalaciones de generación eléctrica a partir del biogás se incluyen bajo los siguientes epígrafes, dentro del citado Real Decreto¹⁰⁶.

Categoría a): productores que utilicen la cogeneración u otras formas de producción de electricidad a partir de energías residuales.

¹⁰⁶ 026.MITYC.2007.Real Decreto 661_2007



- Grupo a.1. Instalaciones que incluyan una central de cogeneración siempre que supongan un alto rendimiento energético y satisfagan los requisitos que se determinan en el anexo I.
 - Subgrupo a.1.3. Cogeneraciones que utilicen como combustible principal biomasa y/o biogás, en los términos que figuran en el anexo II, y siempre que ésta suponga al menos el 90 por ciento de la energía primaria utilizada, medida por el poder calorífico inferior.

Categoría b): instalaciones que utilicen como energía primaria alguna de las energías renovables no consumibles, biomasa, o cualquier tipo de biocombustible, siempre y cuando su titular no realice actividades de producción en el régimen ordinario.

- Grupo b.7. Centrales que utilicen como combustible principal biomasa procedente de estiércoles, biocombustibles o biogás procedente de la digestión anaerobia de residuos agrícolas y ganaderos, de residuos biodegradables de instalaciones industriales o de lodos de depuración de aguas residuales, así como el recuperado en los vertederos controlados, en los términos que figuran en el anexo II.
 - Subgrupo b.7.1. Instalaciones que empleen como combustible principal el biogás de vertederos.
 - Subgrupo b.7.2. Instalaciones que empleen como combustible principal el biogás generado en digestores empleando alguno de los siguientes residuos: residuos biodegradables industriales, lodos de depuradora de aguas urbanas o industriales, residuos sólidos urbanos, residuos ganaderos, agrícolas y otros para los cuales se aplique el proceso de digestión anaerobia, tanto individualmente como en co-digestión.
 - Subgrupo b.7.3. Instalaciones que empleen como combustible principal estiércoles mediante combustión y biocombustibles líquidos.

Es decir, en el grupo a.1.3 se encuentran las instalaciones de cogeneración a partir de biogás, en el b.7.1, los vertederos, y en el b.7.2 se incluyen las EDARs y digestores anaerobios en general.

Desde el punto de vista retributivo se caracteriza por la posibilidad de que el precio de la energía se complemente mediante una prima que podrá compensar al productor por su contribución a la mejora del medio ambiente y al incremento de eficiencia energética.

En las tablas que se muestran a continuación, se muestran las primas establecidas para la producción de energía en régimen especial a partir de fuentes relacionadas con el biogás:



Subgrupo	Combustible	Potencia	Plazo	Tarifa regulada c€/kWh	Prima de referencia c€/kWh	
a.1.3	b.7.1		primeros 15 años	8,2302	4,0788	
			a partir de entonces	6,7040	0,0000	
	b.7.2		P ≤ 500 kW	primeros 15 años	13,3474	10,0842
			a partir de entonces	6,6487	0,0000	
	b.7.3		500 kW ≤ P	primeros 15 años	9,9598	6,1009
			a partir de entonces	6,6981	0,0000	
			primeros 15 años	5,3600	3,0844	
			a partir de entonces	5,3600	0,0000	

Grupo	Subgrupo	Potencia	Plazo	Tarifa regulada c€/kWh	Prima de referencia c€/kWh	Límite Superior c€/kWh	Límite Inferior c€/kWh	
b.7	b.7.1		primeros 15 años	7,9920	3,7784	8,9600	7,4400	
			a partir de entonces	6,5100	0,0000			
	b.7.2		P ≤ 500 kW	primeros 15 años	13,0690	9,7696	15,3300	12,3500
			a partir de entonces	6,5100	0,0000			
	b.7.3		500 kW ≤ P	primeros 15 años	9,6800	5,7774	11,0300	9,5500
			a partir de entonces	6,5100	0,0000			
	b.7.3			primeros 15 años	5,3600	3,0844	8,3300	5,1000
			a partir de entonces	5,3600	0,0000			

O en esta tabla, más aplicable a la producción mediante biodigestores anaerobios¹⁰⁷:

Subgrupo	Potencia	Periodo	Tarifa regulada	Prima referencia	Límite superior	Límite inferior	Valor medio
			[c€/kWh]	[c€/kWh]	[c€/kW]	[c€/kW]	[c€/kW]
a.1.3	P ≤ 500 kW	0 - 15 años	13,3474	10,0842	15,8241	12,7474	14,2858
		> 15 años	6,6487				
	P > 500 kW	0 - 15 años	9,9598	6,1009	11,6478	10,0848	10,8663
		> 15 años	6,6981				
b.7.2	P ≤ 500 kW	0 - 15 años	13,0690	9,7696	15,3300	12,3500	13,8400
		> 15 años	6,5100				
	P > 500 kW	0 - 15 años	9,6800	5,7774	11,0300	9,5500	10,2900
		> 15 años	6,5100				

Como se ha mencionado anteriormente, por parte del sector promocional se establecen quejas en relación con la retribución establecida por el Real Decreto.

4.1.2.2 Real Decreto 949/2009. Bases reguladoras de las subvenciones estatales para fomentar la aplicación de los procesos técnicos del Plan de biodigestión de purines.

Este Real Decreto¹⁰⁸ regula las subvenciones mencionadas en el Plan de Biodigestión de Purines, anteriormente mencionado, para cumplir los siguientes objetivos:

- a) Fomentar la aplicación de los procesos técnicos del Plan de biodigestión de purines, que permitan la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero

¹⁰⁷ 032.AMGA.2008.Rentabilidad Codigestión-Amaya Garijo

¹⁰⁸ 027.MMARM.2009.RD949-2009 subvenciones plan biodig purines



(GEI), así como la valorización agrícola del digestato y facilitar la gestión y el tratamiento del nitrógeno de los purines en las zonas vulnerables o con alta concentración ganadera con el fin de reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero en la gestión de Estiércol.

b) Aplicar tecnologías complementarias a la biodigestión anaeróbica, que permitan mejorar la gestión del nitrógeno del digestato mediante procesos como por ejemplo la separación sólido-líquido, eliminación o reducción-recuperación de nitrógeno tanto para las zonas vulnerables declaradas de acuerdo con el Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura, como para las de alta concentración ganadera donde se superan una carga de ganado intensivo, que produce purín, de 1,2 Unidad de Ganado Mayor (UGM) por hectárea de superficie agraria de herbáceos.

c) Potenciar, con una mayor subvención, la valorización agrícola del digestato, directamente, y el reciclado de nutrientes frente a los postratamientos del digestato como separación sólido-líquido, eliminación o reducción-recuperación de nitrógeno, aplicando los procesos de eliminación o reducción-recuperación de nitrógeno del digestato solamente a la fracción líquida del mismo.

d) Para maximizar el tratamiento de purines, en las plantas de codigestión, donde se sobrepase el 20% de otro cosustrato distinto de los estiércoles en la mezcla a digerir con el purín, se reducirá proporcionalmente esa subvención a medida que se sobrepasa dicho límite.

Las subvenciones van encaminadas a la ayuda económica para facilitar la instalación de sistemas de aprovechamiento del biogás, diferenciando entre dos tipos de instalaciones:

- Instalaciones individuales con digestores rurales sobre balsas de explotaciones ganaderas intensivas
- Instalaciones individuales y centralizadas con codigestores industriales.

En la norma se indican los requisitos de los productores para poder optar a la ayuda, así como las obligaciones de estos en caso de obtenerla.

4.1.2.3 Ley 2/2007, de Fomento de las Energías Renovables (andaluza),

La Ley 2/2007¹⁰⁹ establece el marco normativo autonómico para el fomento de las renovables, imponiendo una primacía de las renovables con respecto a las fuentes de energía tradicionales. Con respecto al biogás, se indica, en el Artículo 17.5, lo siguiente:

5. Será obligatorio para los titulares de emplazamientos o instalaciones con potencial de producción de biogás su aprovechamiento de acuerdo con lo que reglamentariamente se determine. La Administración de la Junta de Andalucía y las autoridades locales promocionarán la instalación de sistemas de producción, captación y aprovechamiento de biogás, potenciando, siempre que sea viable, el

¹⁰⁹ 028.JA.2007.Ley 2_2007 fomento renovables



tratamiento de residuos mediante métodos de digestión anaeróbica que permitan la producción conjunta de biogás y compost.

Actualmente, los reglamentos de la Ley de Fomento de las Renovables, cuya aprobación se establece como objetivo en el PASENER¹¹⁰, se encuentran pendientes de aprobación y publicación.

5. ASPECTOS ECONÓMICOS PARA LA OPERATIVIDAD E INSTALACIÓN DE PLANTAS

5.1. Modelo de negocio

Un proyecto de planta de biogás pretende maximizar los ingresos minimizando la inversión. Como dicta el Plan de Energías renovables “el interés fundamental de desarrollar proyectos de uso energético de biogás parte de una motivación ambiental, no energética”. En el caso concreto del biogás el tratamiento de residuos orgánicos puede suponer una actividad de importancia estratégica con los siguientes objetivos:

- Producción de energía (electricidad o calor)
- Evitar/reducir emisiones de gases de efecto invernadero y lluvia ácida.
- Producir compuestos de valor económico.
- Contribuir a la calidad de los suelos y al reciclaje.

Esta importancia estratégica conlleva a que el planteamiento de las plantas de digestión anaerobia no se deba plantear bajo un estricto esquema de “negocio”, sino más bien bajo esquema de estrategia y oportunidad. Así, el cambio de concepto es importante, hablando de conceptos como tonelada de petróleo ahorrada, tonelada de compost fertilizante producida, tonelada de materia orgánica incorporada al suelo,... En cualquier caso el objetivo principal es reducir la producción de residuos en origen.

5.1.1. Desarrollo de nuevas plantas

La hoja de ruta de un proyecto de planta de biogás viene a quedar reflejada en la siguiente figura:

¹¹⁰ 020.CICE.2007.PASENER_2007-2013



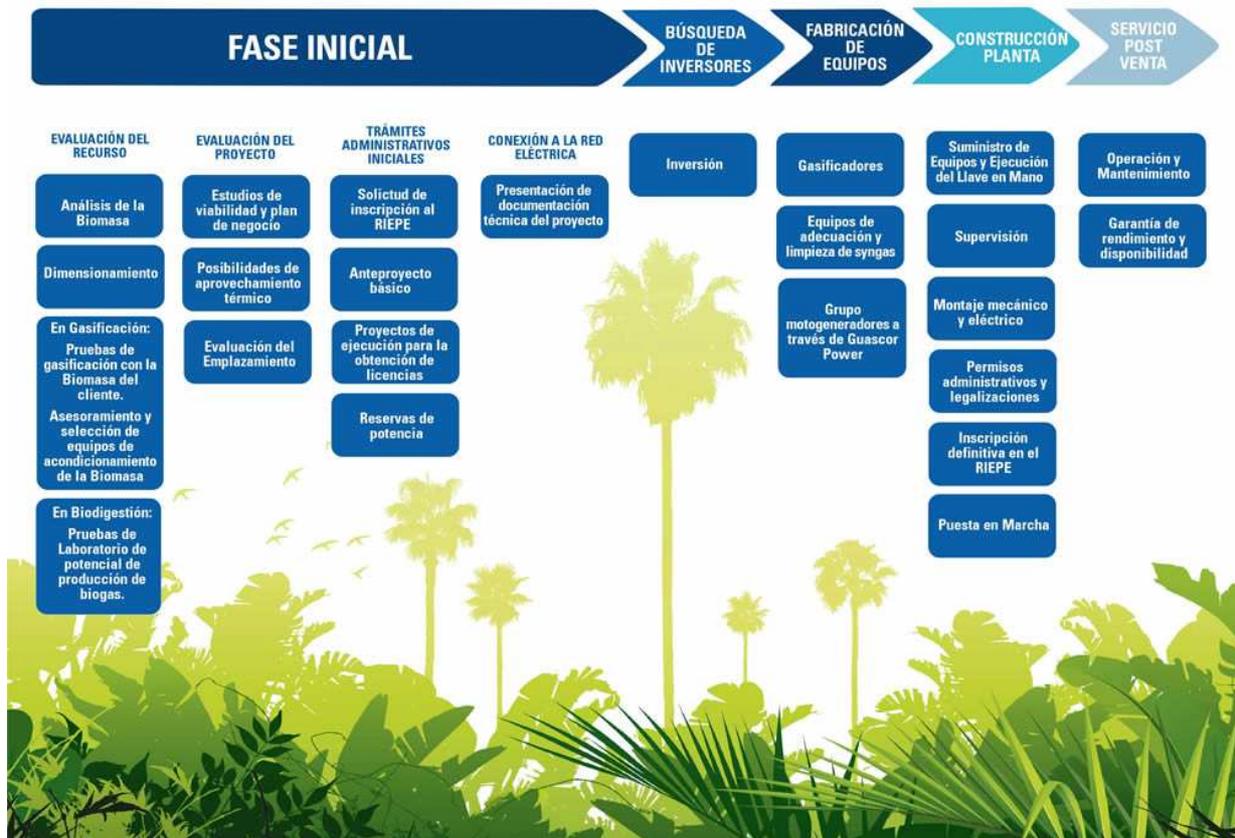


Figura 65. Hoja de ruta para el desarrollo de una planta de biogás ¹¹¹

Para asegurar el éxito en la operación de una planta y consiguientemente una mínima rentabilidad económica es vital contemplar los siguientes aspectos:

- Marco legal, tramitación y permisos.
- La disponibilidad y seguridad de los sustratos.
- La tecnología y diseño de ingeniería.
- La rentabilidad y modelo de negocio.

5.1.2. Volatilidad de sustratos: Disponibilidad y coste de sustrato. (residuo, subproducto).

Si no hay seguridad en el suministro del sustrato con que producir combustible, no hay viabilidad de una planta que produce energía a partir de biogás. El aseguramiento de su suministro es vital para la viabilidad del negocio. En plantas alemanas dada la gran cantidad de plantas se ha producido un desabastecimiento de las mismas produciendo un decaimiento del negocio, por lo tanto es vital asegurar el ajuste de plantas a la disponibilidad de residuos.

¹¹¹ www.quascorbioenergia.com



Esta viabilidad, tanto en el caso del modelo centralizado como individual, se ha de conseguir a través de contratos con los suministradores de residuos que aseguren el suministro a la planta durante un periodo de tiempo.

En el caso de diseñar un proceso en codigestión, la disponibilidad es más compleja, pues se necesita disponer de más de una materia prima, pero a la vez más flexible pues pueden ser más variadas las posibilidades de cosustratos a incluir en la mezcla. La eficiencia en la producción de biogás se ve reducida en el momento en que se emplean procesos con digestiones monosustratos.

Consiguientemente, una reducción en la incertidumbre en el suministro del residuo supone una reducción del riesgo del negocio, y consiguientemente, una mayor robustez y viabilidad a largo plazo del mismo.

Por otro lado, habría que considerar, además, el posible coste del cosustrato y coste de transporte a la planta.

5.1.3. Modelos de negocio.

Una vez asegurado el marco legal y tecnológico, son la disponibilidad del sustrato y la rentabilidad y modelo de negocio que aseguran la fiabilidad de los ingresos los factores clave que determinan la viabilidad de una planta.

Hay que considerar dos modelos básicos de gestión que es acorde con el criterio del *RD 949/2009, de 5 de junio por el que se establecen las bases reguladoras de las subvenciones estatales para fomentar la aplicación de los procesos técnicos del Plan de biodigestión de purines*, aunque es aplicable a cualquier tipo de sustrato e instalación:

- El **modelo de tratamiento centralizado**: Es la construcción de una planta que utiliza digestores, que trata conjuntamente sustratos procedentes de diferentes instalaciones, almacena el biogás y lo valoriza energéticamente. Puede ser gestionada por una entidad pública o privada.
- El **modelo de gestión individual** que atiende al tratamiento del residuo en el lugar de producción. Es la planta que utiliza digestores, que trata purín de una sola instalación sólo o con otros sustratos, almacena biogás y lo valoriza energéticamente. Podrá ser gestionado por entidad pública o privada.

Desarrollamos a continuación cada uno de los modelos.

5.1.3.1 Modelo de gestión centralizado

Presenta más riesgos en el suministro de sustrato pero admite mejor la logística de transportar otros residuos para realizar codigestión e incrementar la eficiencia del proceso y consiguientemente la producción de metano. Según Flotats (2008) la rentabilidad requiere producciones mínimas de biogás de 30-35 m³/t.

En el modelo de negocio centralizado habría que hacer una valoración del balance energético en el transporte de los residuos a la planta. De esta manera se realiza a continuación una modelización simple del transporte de un residuo a la planta centralizada para valorar si es



eficiente energéticamente y a que distancia máxima, para una eficiencia energética del 95 % se pueden transportar los residuos a una planta centralizada:

- Transporte de purín en cisternas de 38000 l de capacidad.
- El purín con un volumen de sólidos volátiles de 35,18 g/kg purín fresco. El peso específico de purín de porcino es de 1,02 kg/l. Con lo que una cisterna transporta 1.363,6 kg de Sólidos volátiles (SV).
- La producción de metano por kg de SV, varía entre 0,17 y 0,45 m³/kg SV. Tomando el valor más desfavorable se obtienen 231.812 m³ de metano en cada cisterna transportada. Lo que transformado en energía (densidad metano: 0,67 kg/m³ y 13.187 kcal/kg) supone 2.048.126 Kcal (2382 kWh, 2048 Tep)- por camión transportado.
- El consumo de combustible del vehículo que transporta el purín es de 32l/100 km de gasoil (base de datos IDAE) ¹¹² lo que supone un consumo (10,1 kWh/l gasóleo) de 232,2 kWh/100 km.
- Si calculamos la energía transportada (2382 kWh) entre la energía consumida por la cisterna de transporte (2,32 kWh/km) se observa que el transporte es energéticamente eficiente (a una eficiencia del 95 %) si el sustrato se encuentra a menos de 50 kms de la planta de biogás, siendo la eficiencia 0 a más de 1025 kms.

Consiguientemente con la hipótesis planteada es viable energéticamente llevar purín a una planta centralizada.

- Este modelo centralizado tiene como ventajas:
 - Permite el control de operación especializado mejorando la eficiencia.
 - Permite la implantación de un centro de gestión integrada de residuos orgánicos.
- Como desventajas
 - Una alta inversión inicial.
 - Hay que realizar el transporte de residuos, con un coste económico adicional.
 - No permite el aprovechamiento térmico fuera de la planta de biogás si se encuentra alejada de potenciales consumidores de calor.
 - La explotación de la planta necesita personal específico para su explotación.
 - Son menos flexibles, las ampliaciones de las instalaciones centralizadas suelen ser costosas y requieren de un incremento considerable de residuos que conlleva un incremento del transporte de posiciones más alejadas.
 - A mayor tamaño de la instalación, mayor coste del transporte pues los residuos estarán más lejos.
 - Son plantas de gran complejidad.

¹¹² 049.IDAE.2006.Guia_gestion_combustible_flotas_carretera



5.1.3.2 Modelo de gestión individual

Este modelo conlleva menor riesgo en el suministro de residuos, pero es menos flexible en cuanto a la eficiencia en la producción de metano y la posibilidad de codigestión. Según Flotats (2008) la rentabilidad requiere producciones mínimas de biogás de 30 m³/t. Es fundamental para que este modelo funcione que el proceso de digestión esté perfectamente integrado en la planta.

- El modelo de negocio tiene como ventajas las desventajas que plantea el modelo centralizado:
 - Una baja inversión inicial.
 - No hay que realizar el transporte de residuos, con un coste económico adicional, únicamente el cosustrato, si no es producido en la misma instalación.
 - Permite el aprovechamiento térmico al encontrarse normalmente asociado a la instalación que produce el residuo
 - La explotación de la planta la realiza normalmente con personal propio de la explotación, no necesita personal específico.
 - Tienen que ser plantas sencillas de fácil explotación.
 - Es más flexible al ser modular, permitiendo añadir módulos al incrementar la producción de residuos, con inversiones aceptables.
 - El tamaño de la instalación, es acorde con los residuos producidos en la misma con lo instalaciones mayores no suponen coste importantes de transporte de materia prima.
- Como desventajas:
 - El control de operación no es especializado, con lo que es difícil optimizar los rendimientos.
 - Es más difícil la codigestión al tener menos medios para traer y gestionar cosustratos a la planta y carecer de personal especializado que valore rendimientos.

5.1.3.3 Individual versus centralizado

Como se ha visto al analizar los países europeos. Los dos modelos de negocio funcionan en Europa adaptándose a cada caso particular.

No obstante, el sistema individual tiene más robustez: al necesitar menor inversión y ser más independiente de factores externos a la explotación como la fiabilidad en el suministro de materia prima por parte de terceros. Además, este tipo de planta se puede integrar en la gestión del negocio principal y con el mismo personal, no suponiendo así una actividad ajena a la explotación del negocio principal. Esto hace que los ingresos sean más fiables, aunque menores, y consiguientemente asegura la viabilidad a largo plazo de la instalación (lo que dure el negocio principal).

5.2. Rentabilidad

Se analiza a continuación los parámetros básicos que se emplean en el análisis económico de plantas de biogás. Dada la gran variedad de factores que inciden en la rentabilidad de este tipo de plantas es muy difícil valorar, de una manera general, la rentabilidad de las mismas. Es por ello que se ha preferido dar criterios generales empleados en este tipo de estudios para finalmente analizar el estudio de una planta tipo.



5.2.1. Costes de inversión.

El cálculo de los costes de inversión es muy variable para las distintas ubicaciones y tamaños de plantas. La inversión en las planta de biogás depende del tamaño de la instalación y del caudal de tratamiento, y muestra una marcada economía de escala. En la figura siguiente se observa la inversión unitaria en función de la potencia eléctrica de la instalación a partir de plantas instaladas en Dinamarca, Alemania, Austria y Cataluña o en anteproyectos en Cataluña.

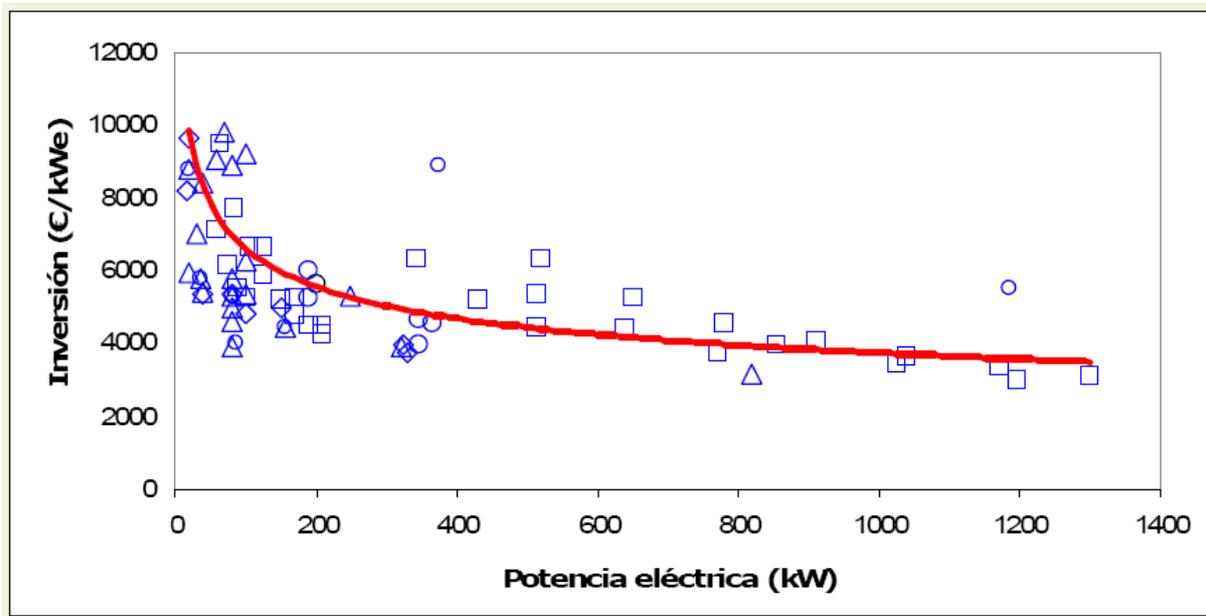


Figura 66. Relación entre la inversión unitaria por unidad de potencia eléctrica.¹¹³

Se observa una gran dispersión debida a la adaptación de cada inversión a las necesidades específicas de cada planta, de los suministradores, el diseño con cosustratos, etc. Se deduce del gráfico que a partir de unos 300 kW el coste por kW se estabiliza entre 5000 y 4000 euros el kW.

Otra referencia de coste viene a ser de entre 400-600 euros/m³ de digestor.¹¹⁴

Con otro tipo de tecnologías para plantas más pequeñas, para instalaciones ganaderas con biodigestores de geomembrana con potencias inferiores a 50kW con sistemas tipo pistón horizontal el coste viene representado por la siguiente gráfica:

¹¹³ 048.ICE.2008.Producció de biogás per codigestió anaerobia.

¹¹⁴ Rafael Borja. Comunicació oral.



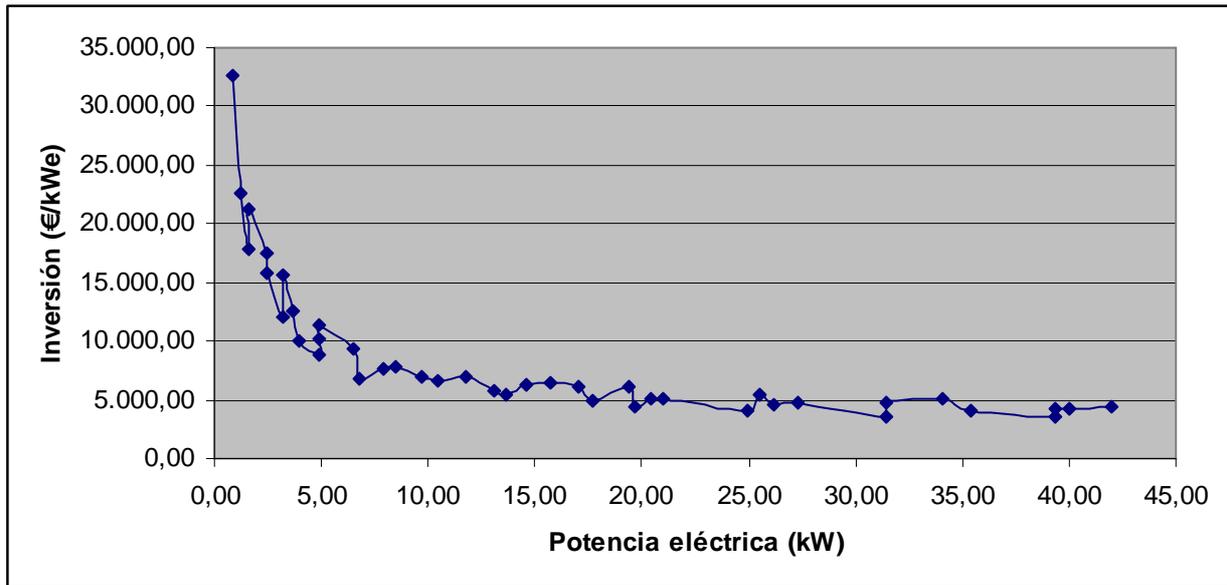


Figura 67. Relación entre la inversión unitaria por unidad de potencia eléctrica para plantas de pequeña potencia¹¹⁵.

Para plantas pequeñas, los costes de inversión por kW son elevados esencialmente debidos a los costes de los motores de generación, de hecho el RD 949/2009 recomienda, para instalaciones porcinas pequeñas, la combustión directa en antorchas (artículo 2k). A partir de 15 kW el coste de la inversión por kW se asemeja al de plantas convencionales de más de 200 kW de potencia indicada en el gráfico de Flotats, la diferencia es el número de kW. Este tipo de sistema requiere unos costes de inversión menores en relación a los sistemas convencionales que se suelen instalar y que quedan representados en la gráfica de Flotats anterior.

Una comparativa de las plantas centralizadas versus plantas individuales para una producción equivalente de energía eléctrica en relación a la inversión se realiza en el siguiente cuadro tomando como referencia los costes de inversión de los gráficos anteriores:

	Inversión	
	Planta 40 kW	Planta de 400 kW
inversión 1 planta (€)	172.141,60	1.900.000,00
inversión equivalente para producir la misma electricidad (€)	1.721.416,00	1.900.000,00

Figura 68. Ejemplo de relación entre la inversión en plantas individuales frente a plantas centralizadas¹¹⁶.

Consiguientemente, según la tabla anterior, para estas dos tecnologías la inversión para potencias equivalentes son similares. No obstante, hay que considerar otros factores que son ventajosos para una y otra tecnología como se ha indicado anteriormente.

En relación a posibles ayudas a la inversión, para plantas de purlnes, hay que tener en cuenta que el RD 949/2009, de 5 de junio por el que se establecen las bases reguladoras de las

¹¹⁵ Elaboración propia con datos suministrados por Bioelax.

¹¹⁶ Elaboración propia con datos suministrados por Bioelax.



subvenciones estatales para fomentar la aplicación de los procesos técnicos del Plan de biodigestión de purines prevé, una serie de **subvenciones** que pueden alcanzar para algunos conceptos hasta el 40 %.

Para valorar los costes de inversión una planta tipo se parte habitualmente de las siguientes hipótesis de trabajo:

1. No se considera el coste del terreno donde se ubica la instalación.
2. No se consideran subvenciones.
3. Se suele considerar la inversión con capital propio.

5.2.2. Ingresos de explotación (volatilidad de los ingresos)



Figura 69. Modelo de negocio en cogeneración con gas natural. ¹¹⁷

Los ingresos potenciales en una planta de este tipo pueden venir de cuatro fuentes:

- Producción de electricidad.
- Producción de compost.
- Producción de calor.
- Canon de tratamiento de los residuos.

De estos cuatro ingresos potenciales el que tiene, a día de hoy, mayor seguridad de producirse y el que puede suponer unos mayores ingresos es el de producción de electricidad, que queda asegurado, al menos durante 15 años, por las tarifas introducidas por la producción en régimen especial. Para el cálculo del ingreso motivado por la producción de electricidad habría que aplicar el R.D. 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción

¹¹⁷ 047.GASNAT.2006.Tratamiento Ambiental de Purines



de energía eléctrica en régimen especial. La valorización energética se encontraría recogida en la Categoría b); instalaciones que utilicen como energía primaria alguna de las energías renovables no consumibles, biomasa o cualquier tipo de biocarburante, siempre y cuando el titular no realice actividades de producción en régimen ordinario. Dentro de dicha categoría sería el **Grupo b.7.2. Instalaciones que empleen como combustible principal el biogás generado en digestores empleando alguno de los siguientes residuos: residuos biodegradables industriales, lodos de depuradora de aguas urbanas o industriales, residuos sólidos urbanos, residuos ganaderos, agrícolas y otros para los cuales se aplique el proceso de digestión anaerobia, tanto individualmente como en co-digestión.** Según el anterior R.D. la tarifa regulada sería de 13,069 c€/kWh, durante los 15 primeros años para instalaciones con potencia inferior a 500 kW y de 9,68 c€/kWh, durante los 15 primeros años para instalaciones con potencia igual o superior a 500 kW. Estas tarifas según el R.D. se actualizan según el IPC. Según Flotats y Sarquella (2.008) con los precios de venta de energía actuales (R.D. 661/2007) se producen rentabilidades aceptables si la producción específica de biogás es superior a 25-30 m³ de tonelada de residuo tratada.¹¹⁸

El mercado del **compost**, es un mercado variable con poca confianza de los consumidores especialmente al obtener en muchos casos productos de baja calidad.

En la página web de la consejería de Medio Ambiente (<http://www.juntadeandalucia.es/organismos/medioambiente.html>) se pueden ver precios medios en función de la fuente de materia para la producción de compost, oscilando entre 12 y 72 euros/t cuando la materia prima es de origen agroindustrial, entre 4 y 30 euros /t cuando es de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos, y entre 6 y 25 euros/t cuando la materia prima son lodos de depuradora. La clave para obtener este ingreso es la comercialización, la cercanía al consumidor y la calidad del producto aspectos que hay que considerar para valorar la viabilidad de una planta.

El potencial ingreso por **producción de calor**, presenta interés normalmente en autoconsumo de la planta y si la misma está asociada a alguna instalación ganadera, agrícola o industrial, dadas las distancias entre las diferentes instalaciones potencialmente consumidoras no consideramos viable exportar calor, de manera general, en plantas centralizadas. El precio medio por venta de energía térmica es de 3c€/termia, para la energía térmica neta producida. Que se valore económicamente esta energía depende de su empleo en calefacción en la propia instalación, en invernaderos, si se vende a terceros, si se emplea en instalaciones de postratamiento, etc.

El **canon por tratamiento de residuos** es otra posibilidad de ingresos en este tipo de plantas. El gravar con un canon el tratamiento de residuos a una planta conlleva un rechazo inicial para el productor teniendo en cuenta que en muchos casos su coste actual de tratamiento es 0. Este canon habría que estudiarlo en el plan de negocio concreto de cada planta ya que puede determinar la rentabilidad o no de la misma.

Como conclusión general el ingreso que mayor fiabilidad y mayor volumen tiene es el producido por la venta de electricidad.

Para los estudios económicos se suelen tomar las siguientes hipótesis:

¹¹⁸ 048.ICE.2008.Producción de biogás per codigestión anaerobia.



- Los únicos ingresos que se tienen en cuenta son los de producción de energía eléctrica.
- El autoconsumo eléctrico de la planta se fija en un 8 %.
- En ocasiones se incluyen los ingresos por venta de calor.

5.2.3. *Gastos de explotación*

Como gastos se incluyen las amortizaciones, el personal, los gastos de consumibles, repuestos y mantenimiento y otros gastos de explotación (seguros, gastos financieros,...).

Las amortizaciones se realizan a 10-12 años.

Se estiman los costes de funcionamiento de los motores de generación de 1 c€/kWh producido anualmente. Y un 1,5 % anual de la inversión en concepto de reparaciones mantenimiento, administración y seguros.

Además de los costes de explotación normales de la planta existen otros tres costes que no son menospreciables y que no se tienen en cuenta en los estudios: por un lado el coste de tratamiento de gases para poder ser empleado como combustible de los motores eléctricos (pueden suponer 1,5 c€/kWh¹¹⁹) y el coste de depuración de las aguas residuales una vez separada la fracción sólida que se va a compostar, y el coste de preparación del compost.

Para los estudios económicos se suelen tomar las siguientes hipótesis:

- No se suelen considerar los gastos de compra de residuos, como ya se ha comentado anteriormente algunos residuos pueden suponer un coste al tener un valor de mercado.

5.2.4. *Rentabilidad económica*

Los principales parámetros económicos (VAN, TIR, Ingresos, gastos) se evalúan conjuntamente en el concepto denominado rentabilidad económica ya que están relacionados.

Para el cálculo de la rentabilidad económica se realizan los balances económicos de cada una de las alternativas y se calcula la rentabilidad del Proyecto.

Las bases de cálculo habituales suelen ser:

- No se considera en las hipótesis de cálculo ninguna subvención ni ayuda para las infraestructuras, financiándose con fondos propios a través de un préstamo.
- La vida útil de estas instalaciones se considera de 15 años y con un valor residual nulo.

¹¹⁹ Rafael Borja. Comunicación oral.



5.2.5. Estudio de planta tipo de 500 kW.

Se ha estudiado bajo las hipótesis de cálculo enumeradas en este capítulo un estudio de rentabilidad de una planta con las siguientes características:

- Potencia eléctrica: 500 kW
- Total de residuos: 55.000 t/año.
- Volumen de digestores aproximado: 5000 m³
- Producción de biogás por tonelada: 35 m³/t.
- Energía eléctrica por m³ biogás: 2,07 Kwh
- Autoconsumo eléctrico: 8 %.
- Energía térmica por m³ biogás: 2,67 Kwh
- Inversión total: 1.950.000 euros.
- Se trabaja con las hipótesis apuntadas anteriormente:
 - No se considera el coste del terreno donde se ubica la instalación.
 - No se consideran subvenciones.
 - Se considera la inversión con capital propio.
 - Los únicos ingresos que se tienen en cuenta son los de producción de energía eléctrica.
 - El autoconsumo eléctrico de la planta se fija en un 8 %.
 - No se considera los gastos de compra de residuos.
 - incremento de precios en las tarifas del 3 % anual.
 - Incremento de mano de obra de un 3 % anual.

Los cálculos se incluyen en el Anejo nº X. Estudio económico planta tipo. Se ha calculado la rentabilidad para una tasa de descuento del 6,5 %. Se obtienen los siguientes resultados: VAN es de 114.969 euros y el TIR obtenido del 7,4 % y un tiempo de retorno de la inversión de entre 9 y 10 años. Consiguientemente, con las precauciones debidas parece que existe viabilidad para este tipo de plantas.

5.3. Aspectos clave para la rentabilidad

En relación, a la rentabilidad económica, se encuentra muy relacionada con las condiciones locales reales de **ingresos y de suministro de sustrato (tamaño de la explotación)**. Estas plantas se encuentran en el límite de la rentabilidad, por lo que para el aseguramiento de los ingresos deben fijarse acuerdos de antemano asegurando la entrada de materia prima, fijando un canon de tratamiento, asegurando la venta de compost y de calor. Asimismo, la subida en la prima por producción de electricidad es otro de los factores que reclaman los promotores para asegurar la rentabilidad.



Respecto a la inversión (que depende del tamaño de la explotación) dentro de cada tecnología a emplear, presenta una marcada economía de escala, que puede ser superada cambiando a tecnologías más básicas conforme se reduce el tamaño de la planta. Las subvenciones existentes para plantas de tratamiento de purines ayudan también a mejorar la rentabilidad.

Diversos autores indican que son necesarias producciones de más de 30 m³ por tonelada de residuo para asegurar la rentabilidad de una planta.

Por otro lado, al incrementar el tamaño de la planta se reduce la inversión unitaria pero se incrementan los costes de instalaciones complementarias para tratar los materiales al incrementarse el caudal de tratamiento y la necesidad de tratar un volumen superior de residuos con un volumen superior de digestatos.

5.4. Generación de Empleo

El empleo generado en este tipo de instalaciones es bajo. Flotats (2008) estima una persona por debajo de 200 kW, y se va incrementando una persona más a tiempo completo por cada 200 kW adicionales de potencia. Por otro lado, el empleo indirecto generado por el mantenimiento de motores, instalaciones de depuración de gases, depuración de aguas, etc. De esta manera se puede indicar que para plantas individuales se emplea a una persona a tiempo parcial, mientras que en plantas centralizadas el número de personas oscila entre 2 y cuatro personas.

Como ejemplo, la planta de Ecologic Biogás en Vila-Sana, Lérida planta centralizada con 9.000 m³ de purines y 2200 t residuos orgánicos al año la maneja una sólo persona que dedica tres o cuatro horas diarias.¹²⁰ Sus tareas son:

- Supervisar las descargas de residuos desde el exterior, es decir, los que provienen de fábricas vecinas.
- Preparar la mezcla adecuada de sólidos/purines con la que alimentar el proceso de digestión.
- Supervisar la cantidad de aire que se introduce en los gasificadores y, en su caso, reajustarla.
- Supervisar el funcionamiento del grupo moto-alternador. Esta tarea se puede realizar a distancia a través de un conexión GSM.

¹²⁰ 003.IDAE.2007.Biomasa. Digestores Anaerobios.



6. PLANTAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA EXISTENTES EN ANDALUCÍA

6.1. Inventario de Plantas de Digestión Anaerobia en Andalucía

Se han consultado diferentes fuentes de información para determinar cuántas y qué plantas de digestión anaerobia existen en Andalucía. Existen fuentes que afirman la existencia de unas 100 – 150 plantas de digestión anaerobia en Andalucía.

No obstante, el equipo redactor ha consultado diversas fuentes de información, que abarcan desde el sector promocional hasta las administraciones, pasando por tecnólogos y empresas del sector agroalimentario. Podemos indicar que las instalaciones actualmente existentes, con la precaución debida dada la falta de información, son las siguientes 31 instalaciones:

- EDARs con aprovechamiento de biogás: 9 instalaciones con una potencia estimada de 6,428 MW
- Vertederos con recuperación de biogás: 10 instalaciones, con una potencia estimada de 13,5 MW en 7 de ellas.
- Digestores industriales: Únicamente se ha podido tener conocimiento de 12 instalaciones en Andalucía.

Las principales fuentes de información “no verbales” que se han consultado han sido las siguientes:

- Registro de instalaciones incluidas en el Régimen Especial en Andalucía, regulado por el RD 661/2007 (Ministerio de Industria, Turismo y Comercio).
- EDARs con producción eléctrica en Andalucía. Listado suministrado por la Agencia Andaluza de la Energía.
- Búsqueda directa e investigación de las instalaciones.



7. IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE ELEVADO POTENCIAL PARA LA INSTALACIÓN DE NUEVAS PLANTAS EN ANDALUCÍA

7.1. Metodología y condicionantes analizados

El objetivo de este apartado es el de determinar zonas propicias para el desarrollo de la tecnología del biogás en Andalucía. Para ello, pretendemos analizar el territorio andaluz para localizar las áreas con mayor capacidad de producción de residuos valorizables para la generación de biogás. En este sentido, tal y como se ha ido analizando a lo largo de todo el estudio son de interés los siguientes datos:

1. Producción en materias primas biometanizables. Tanto cantidad total como específica para cada sustrato. De esta manera, podemos estudiar la digestión anaerobia de un único tipo de residuo, como la codigestión de varios residuos valorizables.

Así pues, por las razones expuestas en el análisis de materia prima para producción de biogás realizados en este Estudio, los principales residuos metanizables son:

- Residuos ganaderos, particularmente purín de cerdo
 - Residuos de la industria agroalimentaria
 - Residuos de cultivos energéticos y similares
 - Residuos animales: Mataderos y pesqueros
 - Glicerina y aceites
 - Lodos de depuradora
 - Residuos Sólidos Urbanos
2. El segundo criterios es la consideración del criterio de cercanía espacial entre los productores, de forma que las áreas propuestas tengan una dimensión coherente con la presencia de residuos valorizables.

En primer lugar, procederemos a analizar el potencial de producción de cada uno de estos grupos de residuos por separado. Con ello, obtendremos áreas localizadas en las que la generación de residuos valorizables será, por un lado, adecuada en cuanto a volumen, y por otro, variada en cuanto a los residuos disponibles, de cara a una posible codigestión.

7.1.1. Información Disponible. Datos de partida

Para la elaboración de este apartado del Estudio, se ha tomado la siguiente información disponible, procedente de diversas fuentes:

- Registro de instalaciones andaluzas sometidas a autorización IPPC (Consejería de Medio Ambiente): Se han tomado de este registro las instalaciones agroindustriales existentes en Andalucía, que supondrían una fuente de materia residual



- Estudio del *Potencial energético de la biomasa residual agrícola y ganadera en Andalucía*¹²¹ (Consejería de Agricultura y Pesca)
- Listado productores de biodiésel en Andalucía (Agencia Andaluza de la Energía)
- Mapas de producción y potencialidad generados a raíz del proyecto *Probiogás*.

Con ello, se obtiene un panorama muy claro sobre la potencialidad de las diferentes zonas de Andalucía para la producción de biogás, como veremos en los siguientes apartados.

7.1.2. Registro IPPC

La Ley 16/2002¹²², en su anexo I, establece las categorías a las que resulta aplicable la Ley de Prevención y Control Integrado de la Contaminación (IPPC). Dentro de las categorías que resultan de interés para este Estudio, se encuentran las siguientes:

5. Gestión de residuos.

5.4 Vertederos de todo tipo de residuos que reciban más de 10 toneladas por día o que tengan una capacidad total de más de 25.000 toneladas con exclusión de los vertederos de residuos inertes.

9. Industrias agroalimentarias y explotaciones ganaderas.

9.1 Instalaciones para:

- a) *Mataderos con una capacidad de producción de canales superior a 50 toneladas/día.*
- b) *Tratamiento y transformación destinados a la fabricación de productos alimenticios a partir de:*
 - b.1) *Materia prima animal (que no sea la leche) de una capacidad de producción de productos acabados superior a 75 toneladas/día.*
 - b.2) *Materia prima vegetal de una capacidad de producción de productos acabados superior a 300 toneladas/ día (valor medio trimestral).*
- c) *Tratamiento y transformación de la leche, con una cantidad de leche recibida superior a 200 toneladas por día (valor medio anual).*

9.2 Instalaciones para la eliminación o el aprovechamiento de canales o desechos de animales con una capacidad de tratamiento superior a 10 toneladas/día.

9.3 Instalaciones destinadas a la cría intensiva de aves de corral o de cerdos que dispongan de más de:

- a) *40.000 emplazamientos si se trata de gallinas ponedoras o del número equivalente para otras orientaciones productivas de aves.*
- b) *2.000 emplazamientos para cerdos de cría (de más de 30 Kg).*

¹²¹ 029.CAP.2008.POTENCIAL ENERGETICO BIOMASA RESIDUAL

¹²² 037.MAM.2002.ley 16-2002 IPPC



- c) 750 emplazamientos para cerdas.

La Consejería de Medio Ambiente dispone de un registro en el que se inscriben todas las instalaciones de estas características existentes en Andalucía, en formato cartográfico. Se ha tomado esta información, colocándola en un plano, con el objetivo de localizar las zonas en que se produce una mayor acumulación de puntos en Andalucía.

7.1.3. Instalaciones de producción de biodiésel en Andalucía

La Agencia Andaluza de la Energía dispone de un listado de productores de biodiésel, con plantas actualmente en funcionamiento en territorio andaluz.

Es preciso indicar que durante el proceso de producción de biodiésel se genera un subproducto de elevado interés para la digestión anaerobia, por su elevada capacidad de producción de biogás. Este subproducto es la glicerina.

Así pues, conocer la ubicación de las plantas de biodiésel supone poder determinar fuentes de producción de glicerina que podrían aprovecharse para la biometanización.

Al igual que con el Registro IPPC, se ha situado cartográficamente la información en un plano, ubicando las plantas en funcionamiento en el mapa de Andalucía. Debemos reseñar que el detalle aplicado a este plano es relativo, pues no se dispone de la ubicación exacta de las instalaciones, habiéndose recurrido a ubicarlas por términos municipales.

7.1.4. Estudio del potencial energético de la biomasa residual¹²³

La Consejería de Agricultura y Pesca realizó, durante el año 2008, un análisis de la producción de residuos global en Andalucía procedente de los sectores agrícola y ganadero, de cara a una cuantificación del potencial energético que alberga nuestra comunidad en forma de residuos de estas fuentes. En la siguiente tabla se muestran los cultivos analizados para el estudio:

¹²³ 029.CAP.2008.POTENCIAL ENERGETICO BIOMASA RESIDUAL



Grupo	Subgrupo	Subgrupo	Tipo de residuo
Cultivos herbáceos	Cultivos COP (excepto arroz)	Trigo Maíz Cebada Avena Sorgo Girasol	Paja de cereal Cañote de girasol
	Arroz	Arroz	Paja de arroz
	Tomate al aire libre	Tomate al aire libre	Mata de tomate
	Cultivos industriales	Algodón	Mata de algodón
		Remolacha	Restos aéreos y corona
Cultivos protegidos	Hortícolas de invernadero Fresa	Residuos biodegradables	
Cultivos leñosos	Cultivos leñosos	Olivar Cítricos Viñedo Frutos secos (almendro) Otros frutales (melocotonero y aguacate)	Leña Ramón Hoja

Figura 70. Cultivos analizados para la realización de estudio de la biomasa residual

En la siguiente tabla se refleja la potencialidad de producción energética de los residuos del sector ganadero:

Especie ganadera		tep/año		
		2005	2006	Promedio
Bovino	Lechero	20.880	18.970	19.925
	Carne	7.552	6.887	7.220
Ovino		986	1.453	1.219
Caprino		15.060	14.808	14.934
Porcino		154.643	136.026	145.335
Avícola	Gallina ponedora		4.926	4.926
	Pollo		14.029	14.029
	Pavo		19.035	19.035
TOTAL			216.134	226.622

Figura 71. Potencial energético del residuo procedente del sector ganadero

A continuación se muestran los planos resultantes de dicho Estudio, en los que se muestra la potencialidad de los residuos generados por el sector ganadero y por el agrícola en Andalucía.



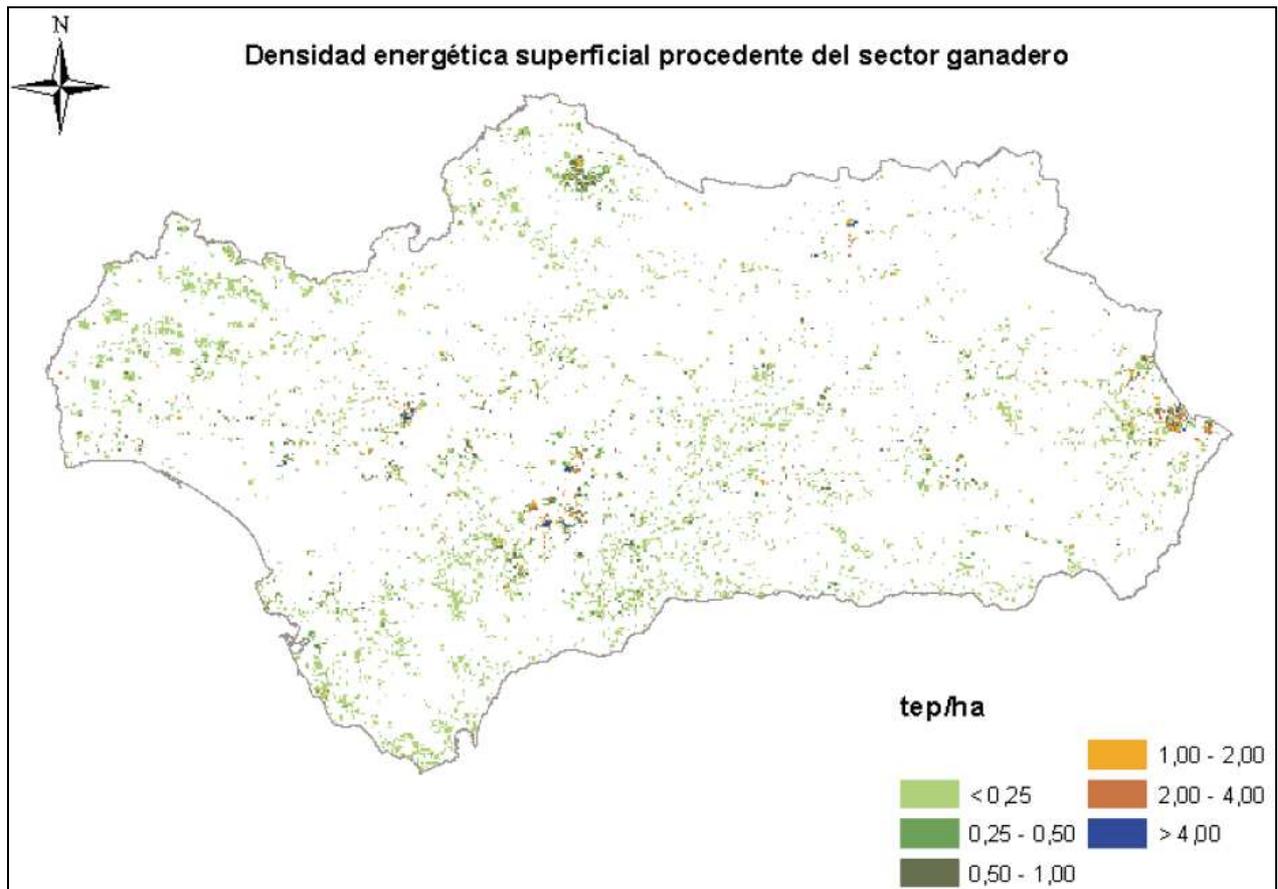


Figura 72. Densidad energética superficial de los residuos procedentes del sector ganadero



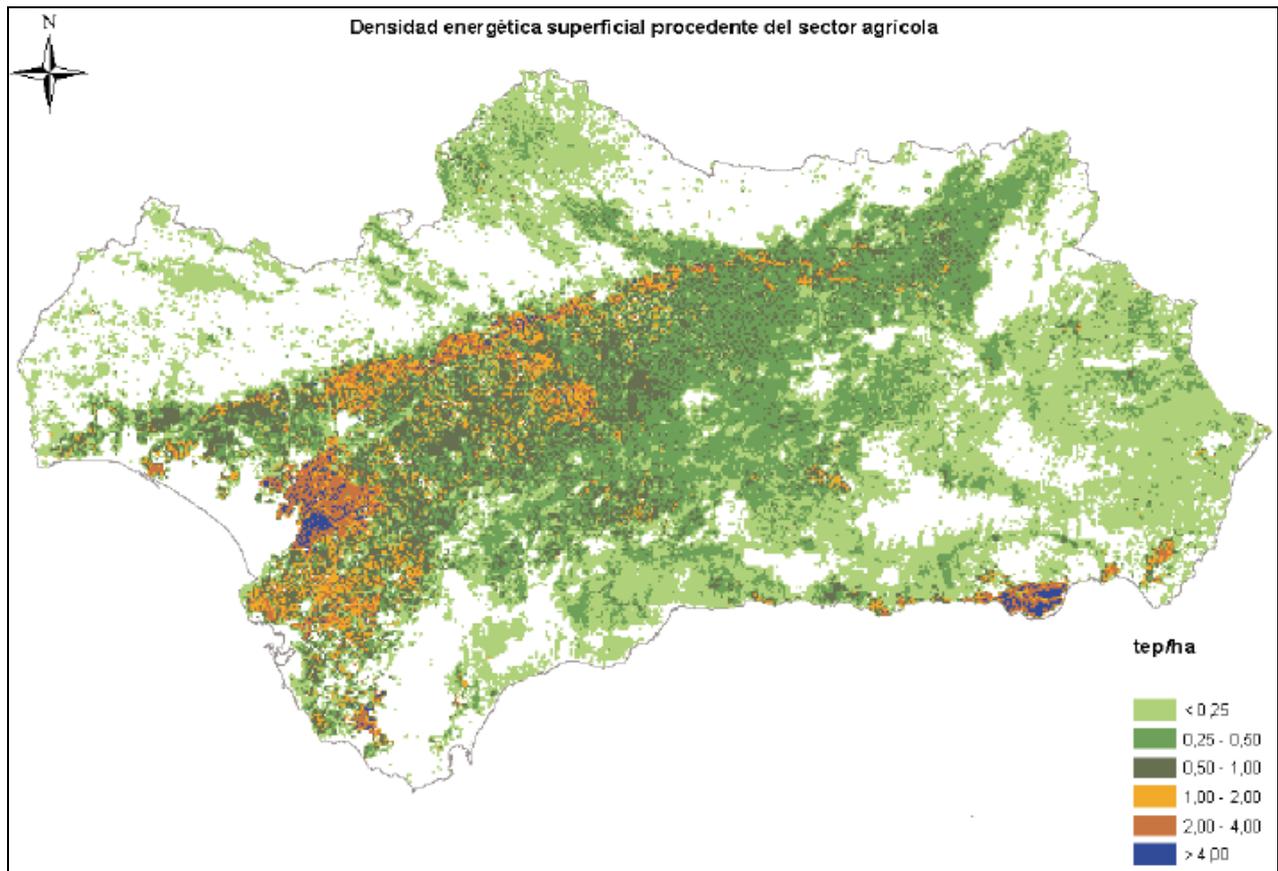


Figura 73. Densidad energética superficial de los residuos procedentes del sector agrícola

7.1.5. Proyecto Probiogás

Fruto de uno de los subproyectos del proyecto Probiogás, se han elaborado una serie de Mapas del Potencial de producción de residuos de los sectores de interés para el sector de la producción de biogás mediante digestión anaerobia, analizando, por comarcas, las toneladas al año que se producen en España de los siguientes grupos de residuos:

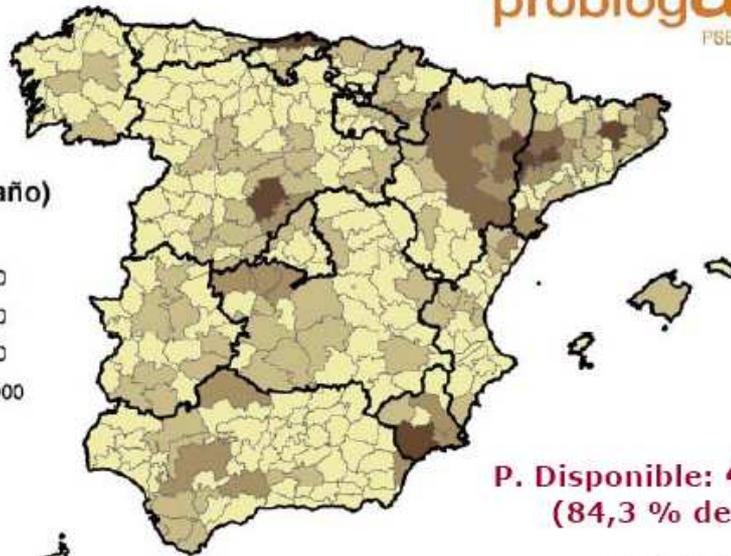
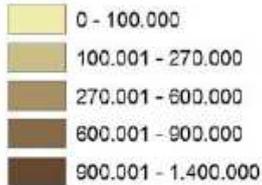
- Residuos ganaderos
- Residuos de industrias cárnicas
- Residuos de industrias lácteas
- Residuos de pescado
- Residuos vegetales

A continuación se incluyen los mapas generales, a nivel nacional, para los 5 tipos de residuos anteriormente señalados¹²⁴.

¹²⁴ 038.PBG.2009.POTENCIAL DISPONIBLE



M.P. Ganaderas (t/año)



P. Disponible: 41,2 mill T/año
(84,3 % del P. Accesible)

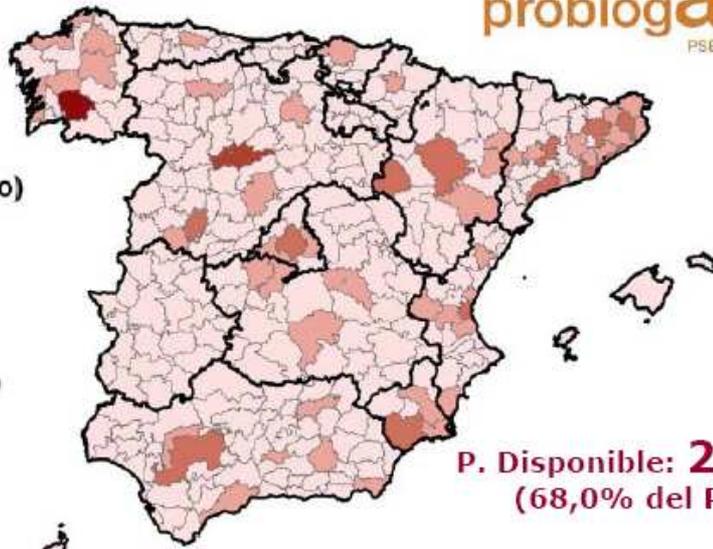
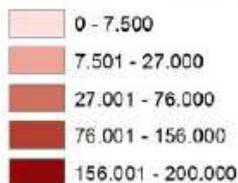
1.130 ktep/año



Mapa por COMARCAS de potencial "DISPONIBLE" de producción de biogás (m3/año) a partir de materias primas de origen GANADERO
 Última actualización: 20 de octubre de 2009

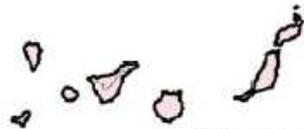


M.P. Cárnicas (t/año)



P. Disponible: 2,2 mill T/año
(68,0% del P. Accesible)

32 ktep/año

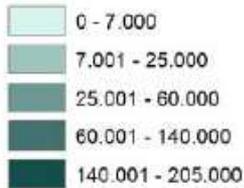


Mapa por COMARCAS de potencial "DISPONIBLE" de producción de biogás (m3/año) a partir de materias primas de origen ANIMAL (CÁRNICO)
 Última actualización: 20 de octubre de 2009





M.P. Lácteas (t/año)



P. Disponible: 1,9 mill T/año
(61,9% del P. Accesible)

45 ktep/año

Mapa por COMARCAS de potencial "DISPONIBLE" de producción de biogás (m3/año) a partir de materias primas de origen ANIMAL (LÁCTEO)
 Última actualización: 20 de octubre de 2009



M.P. Pescado (t/año)

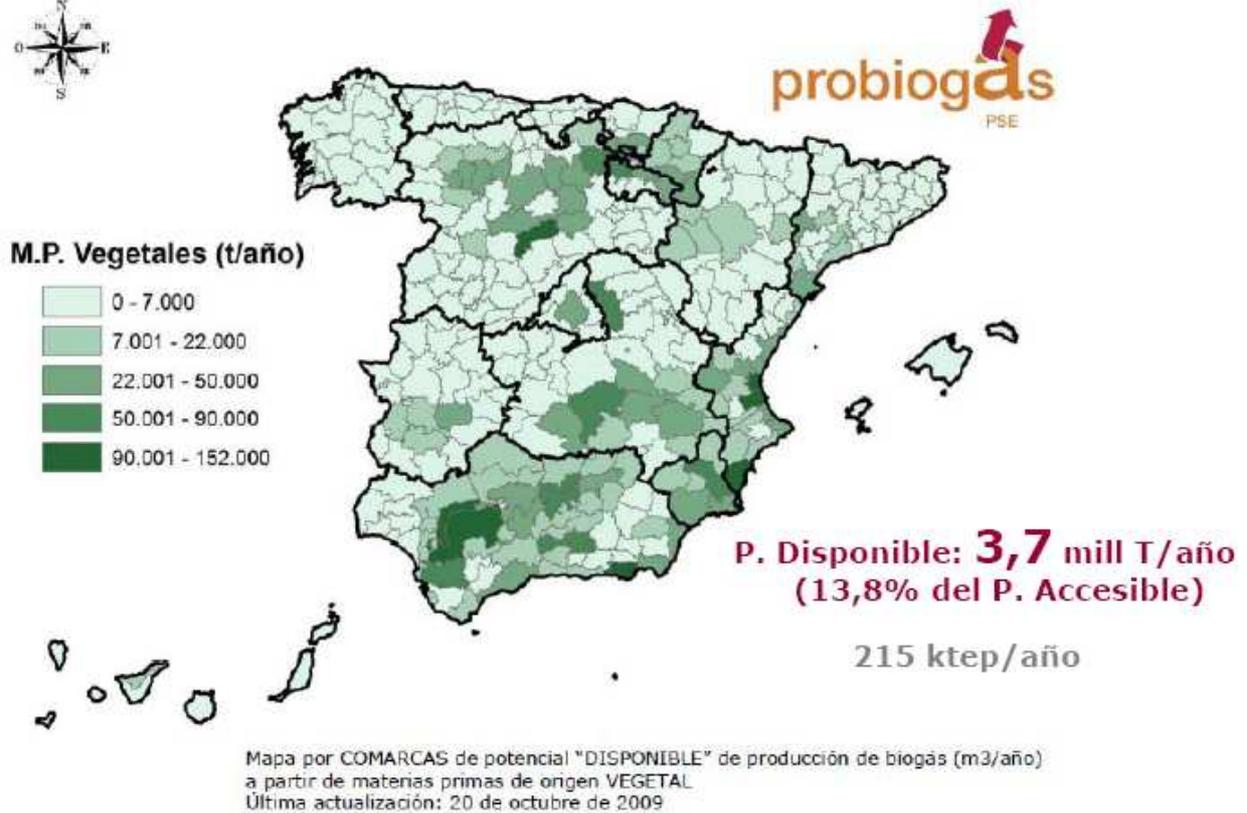


P. Disponible: 0,3 mill T/año
(64,3% del P. Accesible)

15 ktep/año

Mapa por COMARCAS de potencial "DISPONIBLE" de producción de biogás (m3/año) a partir de materias primas de origen ANIMAL (PESQUERO)
 Última actualización: 20 de octubre de 2009





Adicionalmente, ha generado una serie de fichas comarcales (comarca agraria), en las que se indica el desglose de la producción anual de cada tipo de materia prima de interés para la producción de biogás desglosado en agrupaciones. Dicha producción tiene doble entrada: potencial de materia prima accesible y potencial de materia prima disponible. La materia prima disponible sería la que realmente podría ser aprovechada para la producción de biogás.

7.2. Determinación de núcleos de elevada potencialidad

Partiendo de los estudios y análisis enumerados anteriormente se ha procedido a la realización de una tabla en la que se identifican las zonas de Andalucía en las que se produce una mayor producción de los diferentes tipos de materias primas, mostrándose a continuación la tabla resultante.



ZONA	RESIDUOS AGRÍCOLAS	RESIDUOS GANADEROS	RES CÁRNICAS Y LÁCTEAS	RESIDUOS DE PESCADO	BIODIÉSEL	RES AGRO-ALIMENTARIA
Bajo Guadalquivir (SE)	X	X	X			X
Campaña de Jaén (JA)	X				X	X
Campaña Sevillana (SE)	X	X	X			
Campaña Sur Córdoba (CO)	X					
Costa del Sol Occidental (MA)			X	X		
Costa Occidental de Huelva (HU)				X		
Guadalteba (MA)		X	X			X
La Janda (Cádiz)	X	X				
Levante Almeriense (AL)		X				X
Palos de la Frontera (HU)					X	
Poniente Almeriense (AL)	X		X			
Valle de los Pedroches (CO)		X	X			
Vega de Granada (GR)	X		X			X
Vega del Guadalquivir (CO)	X					

Figura 74. Núcleos de mayor producción potencial de los diferentes tipos de residuos estudiados en Andalucía

Estas zonas prácticamente coinciden con las determinaciones presentes en el Estudio del Potencial Energético de la Biomasa Residual Agrícola y Ganadera en Andalucía, de la Consejería de Agricultura y Pesca, tal como se aprecia en el plano que se incluye a continuación:





Densidad energética superficial procedente de los sectores agrícola y ganadero

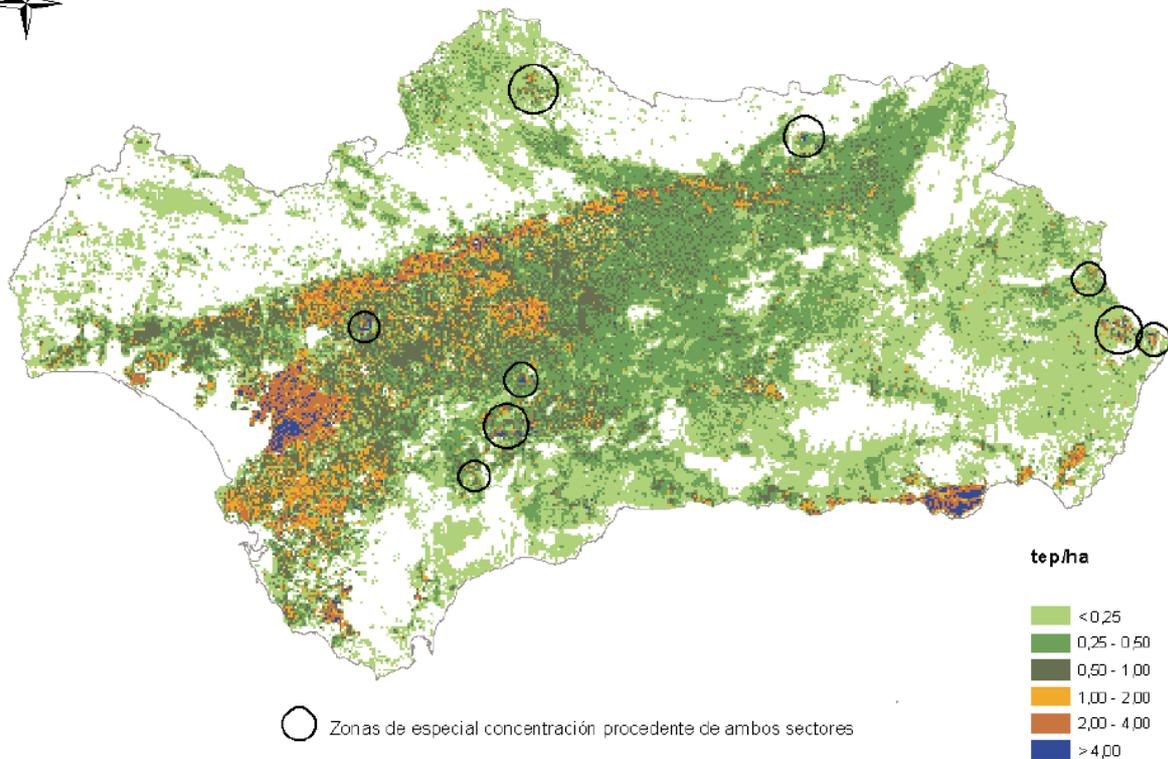


Figura 75. Densidad energética superficial procedente del sector agrícola y ganadero (tep/ha y píxel) (media de los años 2005 y 2006)¹²⁵

Por otro lado, como se aprecia en el Estudio del Potencial Energético de la Biomasa Residual, la potencialidad de generación energética de los residuos agrícolas es muy superior a la de los residuos ganaderos, aunque no generan problemas ambientales y su disponibilidad real es mucho más baja.

Asimismo, las instalaciones generadoras de otros residuos industriales (alimentaria, biodiésel, industria láctea, almazaras...) suponen una posibilidad adicional para la digestión anaerobia. Hay que considerar en este punto, que la principal materia prima para la producción de biogás en Andalucía es el purín por los siguientes aspectos:

- Debido a los problemas ambientales que genera. Su poder contaminante de suelos por la baja relación Carbono/Nitrógeno, sumado a la elevada emisión de GEIs (y de olores) del residuo suponen que su eliminación sea prioritaria, como muestra el Plan de Biodigestión de Purines¹²⁶.
- Existe un respaldo normativo que conmina a su reducción existiendo ayudas a la inversión para su tratamiento.
- Existe una alta disponibilidad, como se pone de manifiesto en el estudio probiogás.

¹²⁵ 029.CAP.2008.POTENCIAL ENERGETICO BIOMASA RESIDUAL

¹²⁶ 024.MMARM.2009.PLAN BIODIGESTION PURINES



En base a estos argumentos y dado que el objetivo principal de este estudio es proponer zonas en Andalucía en las que la disponibilidad de materia prima sea suficiente como para poder generar una cantidad aceptable de biogás (lo que permitirá un mínimo de rentabilidad económica), los objetivos que deben cumplir estas zonas son los siguientes:

- Elevada producción de residuos ganaderos, particularmente de purín. El purín de cerdo es un residuo cuyo aprovechamiento resulta crucial desde el punto de vista ambiental, en lo que respecta a los GEIs, contaminación de suelos y olores.
- Debido al escaso potencial energético del purín, será preciso codigerirlo con otros residuos que maximicen el potencial de producción de biogás. En este sentido, se deberá contar con cierto potencial de producción de residuos de otros tipos: Hortofrutícolas, de la industria agroalimentaria, de matadero y pesqueros, industriales, lodos de depuradora, FORSU... La cantidad total de materias primas da una idea de las probabilidades de codigestión que existen en una comarca determinada. En general, el purín, por sí solo alcanza unas producciones máximas de 20-25 m³ de biogás por tonelada de residuo, por lo que para alcanzar el umbral de rentabilidad de 30-35 m³/t, es preciso usar un cosustrato, en cuyo caso, los residuos vegetales y hortofrutícolas, residuos de matadero, residuos pesquero, residuos de la industria aceitera, glicerina, y los lodos de EDAR y EDARi resultan ser adecuados para alcanzar dicho umbral.
- Los núcleos deberán tener un diámetro razonable, que pueda permitir el transporte de los residuos de manera relativamente rentable, pensando en un modelo de gestión centralizado.

De las comarcas agrarias que se han analizado en el proyecto Probiogás, se han tomado las comarcas que concuerdan con alguna de estas características (todas las cifras y cantidades que se mencionan se refieren a la cantidad de materias primas disponibles, es decir, sin un uso comprometido):

- **Producción de purines de cerdo por encima de 30.000 t/año**
- **Producción total de materias primas por encima de las 100.000 t/año.**

Con los condicionantes mencionados anteriormente, se obtiene la siguiente tabla:



COMARCA AGRARIA	PURÍN DE CERDO (t/año)	MATERIA PRIMA PRINCIPAL	MATERIA PRIMA PRINCIPAL (t/año)	MATERIA PRIMA SECUNDARIA	MATERIA PRIMA SECUNDARIA (t/año)	MATERIAS PRIMAS TOTALES (t/año)	COSUSTRATO POSIBLE	COSUSTRATO POSIBLE (t/año)
Bajo Alanzora (AL)	303.301	Purín de cerdo	303.301	Restos ganaderos de otras especies	28.535	380.364	Excedentes hortalizas	14.741
Norte o Antequera (MA)	292.177	Purín de cerdo	292.177	Restos ganaderos de otras especies	35.613	376.114	Alperujo	8.914
La Campiña (SE)	188.170	Purín de cerdo	188.170	Estiércol de vaca	160.926	691.784	Lactosuero	50.700
El Condado (JA)	68.811	Purín de cerdo	68.811	Alperujo	17.581	101.874	Alperujo	17.581
Campiña del Norte (JA)	61.474	Purín de cerdo	61.474	Materias primas de la industria azucarera	40.861	151.812	Materias primas de la industria azucarera	40.861
Sierra de Cádiz (CA)	59.092	Purín de cerdo	59.092	Restos ganaderos de otras especies	44.266	149.503	Lactosuero	17.231
Los Vélez (AL)	53.547	Purín de cerdo	53.547	Restos ganaderos de otras especies	30.473	85.347	Excedentes hortalizas	352
Estepa (SE)	31.222	Purín de cerdo	31.222	Estiércol de vaca	14.337	72.089	Alperujo	2.994
Campiña de Cádiz (CA)	30.905	Estiércol de vaca	127.832	Materias primas de la industria azucarera	53.188	262.596	Materias primas de la industria azucarera	53.188
Sierra Morena (JA)	30.513	Purín de cerdo	30.513	Estiércol de vaca	11.312	66.432	Alperujo	10.492
Centro-Sur o Guadalhorce (MA)	26.604	Restos ganaderos de otras especies	31.597	Purín de cerdo	26.604	172.384	Bagazo - Industria cervecera	13.573
Guadix (GR)	24.686	Restos ganaderos de otras especies	34.177	Purín de cerdo	24.686	100.968	Lodos de EDARi	5.573
La Vega (SE)	16.055	Estiércol de vaca	66.630	Bagazo - Industria cervecera	55.299	290.805	Bagazo - Industria cervecera	55.299
De la Vega (GR)	15.180	Estiércol de vaca	81.012	Bagazo - Industria cervecera	47.032	209.895	Bagazo - Industria cervecera	47.032
Sierra Norte (SE)	13.855	Restos ganaderos de otras especies	109.672	Estiércol de vaca	20.832	163.269	Paja de cereal	4.860
Campiña Baja (CO)	12.776	Estiércol de vaca	41.957	Restos ganaderos de otras especies	13.689	119.085	Alperujo	12.160
Pedroches (CO)	12.466	Estiércol de vaca	236.771	Restos ganaderos de otras especies	135.490	410.437	Alperujo	6.373
La Janda (CA)	11.391	Estiércol de vaca	77.939	Purín de cerdo	11.391	107.658	Excedentes hortalizas	2.397
Campo de Gibraltar (CA)	9.491	Estiércol de vaca	127.690	Restos ganaderos de otras especies	14.995	163.016	Glicerina	2.068
Campiña del Sur (JA)	7.105	Alperujo	32.805	Bagazo - Industria cervecera	28.949	106.453	Alperujo	32.805
Costa Noroeste de Cádiz (CA)	3.761	Estiércol de vaca	105.201	Excedentes hortalizas	6.674	131.809	Excedentes hortalizas	6.674
Campo Dalías (AL)	208	Excedentes hortalizas	54.618	Transformación hortalizas	32.509	115.278	Excedentes hortalizas	54.618

A raíz del resultado obtenido, y con el objetivo de seleccionar cinco zonas en las que la potencialidad para producir biogás sea la mayor posible, se realiza una primera criba, en la que se descartan las comarcas que:

- Tienen una producción total de materias primas de menos de 140.000 t/año
- La producción anual de purín sea inferior a 12.000 t/año



- La producción de cosustratos para codigerir con el purín no sea adecuada, bien sea por la cantidad o por la variedad de dichos cosustratos.

Con ello, se seleccionan las siguientes comarcas (marcadas en azul):

COMARCA AGRARIA	PURÍN DE CERDO (t/año)	MATERIA PRIMA PRINCIPAL	MATERIA PRIMA PRINCIPAL (t/año)	MATERIA PRIMA SECUNDARIA	MATERIA PRIMA SECUNDARIA (t/año)	MATERIAS PRIMAS TOTALES (t/año)	COSUSTRATO POSIBLE	COSUSTRATO POSIBLE (t/año)
Bajo Almanzora (AL)	303.301	Purín de cerdo	303.301	Restos ganaderos de otras especies	28.535	380.364	Excedentes hortalizas	14.741
Norte o Antequera (MA)	292.177	Purín de cerdo	292.177	Restos ganaderos de otras especies	35.613	376.114	Alperujo	8.914
La Campiña (SE)	188.170	Purín de cerdo	188.170	Estiércol de vaca	160.926	691.784	Lactosuero	50.700
El Condado (JA)	68.811	Purín de cerdo	68.811	Alperujo	17.581	101.874	Alperujo	17.581
Campiña del Norte (JA)	61.474	Purín de cerdo	61.474	Materias primas de la industria azucarera	40.861	151.812	Materias primas de la industria azucarera	40.861
Sierra de Cádiz (CA)	59.092	Purín de cerdo	59.092	Restos ganaderos de otras especies	44.266	149.503	Lactosuero	17.231
Los Vélez (AL)	53.547	Purín de cerdo	53.547	Restos ganaderos de otras especies	30.473	85.347	Excedentes hortalizas	352
Estepa (SE)	31.222	Purín de cerdo	31.222	Estiércol de vaca	14.337	72.089	Alperujo	2.994
Campiña de Cádiz (CA)	30.905	Estiércol de vaca	127.832	Materias primas de la industria azucarera	53.188	262.596	Materias primas de la industria azucarera	53.188
Sierra Morena (JA)	30.513	Purín de cerdo	30.513	Estiércol de vaca	11.312	66.432	Alperujo	10.492
Centro-Sur o Guadalhorce (MA)	26.604	Restos ganaderos de otras especies	31.597	Purín de cerdo	26.604	172.384	Bagazo - Industria cervecera	13.573
Guadix (GR)	24.686	Restos ganaderos de otras especies	34.177	Purín de cerdo	24.686	100.968	Lodos de EDARi	5.573
La Vega (SE)	16.055	Estiércol de vaca	66.630	Bagazo - Industria cervecera	55.299	290.805	Bagazo - Industria cervecera	55.299
De la Vega (GR)	15.180	Estiércol de vaca	81.012	Bagazo - Industria cervecera	47.032	209.895	Bagazo - Industria cervecera	47.032
Sierra Norte (SE)	13.855	Restos ganaderos de otras especies	109.672	Estiércol de vaca	20.832	163.269	Paja de cereal	4.860
Campiña Baja (CO)	12.776	Estiércol de vaca	41.957	Restos ganaderos de otras especies	13.689	119.085	Alperujo	12.160
Pedroches (CO)	12.466	Estiércol de vaca	236.771	Restos ganaderos de otras especies	135.490	410.437	Alperujo	6.373
La Janda (CA)	11.391	Estiércol de vaca	77.939	Purín de cerdo	11.391	107.658	Excedentes hortalizas	2.397
Campo de Gibraltar (CA)	9.491	Estiércol de vaca	127.690	Restos ganaderos de otras especies	14.995	163.016	Glicerina	2.068
Campiña del Sur (JA)	7.105	Alperujo	32.805	Bagazo - Industria cervecera	28.949	106.453	Alperujo	32.805
Costa Noroeste de Cádiz (CA)	3.761	Estiércol de vaca	105.201	Excedentes hortalizas	6.674	131.809	Excedentes hortalizas	6.674
Campo Dalías (AL)	208	Excedentes hortalizas	54.618	Transformación hortalizas	32.509	115.278	Excedentes hortalizas	54.618

Resultando por tanto, las siguientes comarcas:



COMARCA AGRARIA	PURÍN DE CERDO (t/año)	MATERIA PRIMA PRINCIPAL	MATERIA PRIMA PRINCIPAL (t/año)	MATERIA PRIMA SECUNDARIA	MATERIA PRIMA SECUNDARIA (t/año)	MATERIAS PRIMAS TOTALES (t/año)	COSUSTRATO POSIBLE	COSUSTRATO POSIBLE (t/año)	OTROS COSUSTRATOS
Bajo Almansora (AL)	303.301	Purín de cerdo	303.301	Restos ganaderos de otras especies	28.535	380.364	Excedentes hortalizas	14.741	Otros residuos hortofrutícolas
Norte o Antequera (MA)	292.177	Purín de cerdo	292.177	Restos ganaderos de otras especies	35.613	376.114	Alperujo	8.914	Otros residuos hortofrutícolas
La Campiña (SE)	188.170	Purín de cerdo	188.170	Estiércol de vaca	160.926	691.784	Lactosuero	50.700	Residuos de matadero, lodos EDARi, residuos hortofrutícolas, paja de cereal
Campiña del Norte (JA)	61.474	Purín de cerdo	61.474	Materias primas de la industria azucarera	40.861	151.812	Materias primas de la industria azucarera	40.861	Alperujo, alpechín, glicerina
Sierra de Cádiz (CA)	59.092	Purín de cerdo	59.092	Restos ganaderos de otras especies	44.266	149.503	Lactosuero	17.231	Lodos EDARi, residuos hortofrutícolas
Campiña de Cádiz (CA)	30.905	Estiércol de vaca	127.832	Materias primas de la industria azucarera	53.188	262.596	Materias primas de la industria azucarera	53.188	Residuos hortofrutícolas, de fabricación del vino, cultivos energéticos
Centro-Sur o Guadalhorce (MA)	26.604	Restos ganaderos de otras especies	31.597	Purín de cerdo	26.604	172.384	Bagazo - Industria cervecera	13.573	Residuos de matadero, lodos EDARi, residuos hortofrutícolas
La Vega (SE)	16.055	Estiércol de vaca	66.630	Bagazo - Industria cervecera	55.299	290.805	Bagazo - Industria cervecera	55.299	Residuos de matadero, industria azucarera, hortofrutícolas, lodos EDARi
De la Vega (GR)	15.180	Estiércol de vaca	81.012	Bagazo - Industria cervecera	47.032	209.895	Bagazo - Industria cervecera	47.032	Alperujo, residuos hortofrutícolas
Pedroches (CO)	12.466	Estiércol de vaca	236.771	Restos ganaderos de otras especies	135.490	410.437	Alperujo	6.373	Residuos de matadero, lodos EDARi

A priori, todas estas zonas serían compatibles con la instalación de una planta de 500 kW, aunque se seleccionarán solamente cinco tomando los siguientes supuestos:

- En base al estudio económico, una planta de 500 kW con una media de producción de biogás de 35 m³/t de residuo requeriría 55.000 toneladas anuales de sustrato (en codigestión) para obtener rentabilidad.
- La proporción utilizada debe contar con al menos un 80% de purín de cerdo, con lo que el promotor podría beneficiarse al máximo de las subvenciones reguladas en el RD 949/2009 Bases reguladoras de las subvenciones estatales para fomentar la aplicación de los procesos técnicos del Plan de biodigestión de purines (es decir, una planta de 500 kW requeriría un aporte de 44.000 toneladas de purín de cerdo anuales).
- El 20% restante de la mezcla de codigestión correspondería al cosustrato, es decir, se requerirían 11.000 toneladas anuales de cosustrato. Además, debería existir variedad de cosustratos en la comarca.

Es decir, tomaremos las 5 comarcas agrarias en las que la producción de purines supera las 44.000 toneladas al año.

No obstante, mención especial requiere la comarca de los Pedroches, en Córdoba, en la que hay un potencial residual amplísimo, aunque el residuo ganadero procedente de cerdos es limitado. En este caso, podría codigerirse el estiércol de vaca con otros residuos (por ejemplo, lácteos), con buenos resultados. En este caso, tendríamos el inconveniente de no eliminar los purines de cerdo, y por tanto, el promotor no podría beneficiarse de las subvenciones del RD 949/2009. Además, debemos mencionar que, en el marco del Proyecto Probiogás, se está implantando una planta piloto para el aprovechamiento del biogás en la zona, por lo que un promotor podría encontrar cierta competencia en esta zona.



Así pues, las comarcas agrarias seleccionadas serían las siguientes (se incluye la de los Pedroches)

COMARCA AGRARIA	PURÍN DE CERDO (t/año)	MATERIA PRIMA PRINCIPAL	MATERIA PRIMA PRINCIPAL (t/año)	MATERIA PRIMA SECUNDARIA	MATERIA PRIMA SECUNDARIA (t/año)	MATERIAS PRIMAS TOTALES (t/año)	COSUSTRATO POSIBLE	COSUSTRATO POSIBLE (t/año)	OTROS COSUSTRATOS
Bajo Almansora (AL)	303.301	Purín de cerdo	303.301	Restos ganaderos de otras especies	28.535	380.364	Excedentes hortalizas	14.741	Otros residuos hortofrutícolas
Norte o Antequera (MA)	292.177	Purín de cerdo	292.177	Restos ganaderos de otras especies	35.613	376.114	Alperujo	8.914	Otros residuos hortofrutícolas
La Campiña (SE)	188.170	Purín de cerdo	188.170	Estiércol de vaca	160.926	691.784	Lactosuero	50.700	Residuos de matadero, lodos EDARi, residuos hortofrutícolas, paja de cereal
Campiña del Norte (JA)	61.474	Purín de cerdo	61.474	Materias primas de la industria azucarera	40.861	151.812	Materias primas de la industria azucarera	40.861	Alperujo, alpechín, glicerina
Sierra de Cádiz (CA)	59.092	Purín de cerdo	59.092	Restos ganaderos de otras especies	44.266	149.503	Lactosuero	17.231	Lodos EDARi, residuos hortofrutícolas
Pedroches (CO)	12.466	Estiércol de vaca	236.771	Restos ganaderos de otras especies	135.490	410.437	Alperujo	6.373	Residuos de matadero, lodos EDARi

8. PROPUESTA DE NUEVAS PLANTAS

8.1. Proposición de nuevas plantas

Del análisis de rentabilidad de este tipo de plantas podemos indicar:

- Los dos modelos de gestión (individual y centralizado) presentan ventajas e inconvenientes y niveles de rentabilidad muy dependientes del caso concreto, siendo de una elevada dificultad la generalización de la rentabilidad pues el valor de los ingresos está muy condicionado por la situación local (intercambio de calor, venta de compost, canon de tratamiento). Esta dificultad conlleva que un análisis de rentabilidad se tenga que realizar prácticamente caso a caso.
- En cualquier caso, estas instalaciones son difícilmente rentables para producciones de biogás inferiores a 30 m³/t con los ingresos derivados únicamente de la producción eléctrica con lo que la selección de las zonas potenciales se ha escogido pensando en la codigestión de purín con otro cosustrato en cantidad suficiente que permita una mínima rentabilidad.
- El desarrollo de plantas de biogás es factible prácticamente en cualquier punto de Andalucía, especialmente las individuales, con una cantidad de residuos suficiente al tamaño de la planta.
- Que el desarrollo de plantas centralizadas es económica, eficiente y energéticamente más viable en las comarcas potenciales enumeradas. Para este tipo de planta centralizado el tamaño aconsejable sería inferior a 500 kW para obtener el máximo ingreso de la prima, el cual desciende a partir de esta potencia. Como se ha visto en el modelo de negocio y análisis de rentabilidad. En la planta tipo propuesta para producir esta energía serían necesarios unas 55.000 t /año para una materia prima que produzca 36 m³/t.



- Que las plantas de purines cuentan con subvenciones que facilitan la inversión, además de contar con una elevada producción de residuo en todas las zonas de concentración, con lo que es uno de los sustratos básicos a contemplar en la propuesta de plantas en estas zonas.

En base a estos argumentos la propuesta de nuevas plantas es la siguiente.

1. Las zonas donde se propone la ubicación de nuevas plantas son las siguientes:

COMARCA AGRARIA	PURÍN DE CERDO (t/año)	MATERIA PRIMA PRINCIPAL	MATERIA PRIMA PRINCIPAL (t/año)	MATERIA PRIMA SECUNDARIA	MATERIA PRIMA SECUNDARIA (t/año)	MATERIAS PRIMAS TOTALES (t/año)	COSUSTRATO POSIBLE	COSUSTRATO POSIBLE (t/año)	OTROS COSUSTRATOS
Bajo Almansora (AL)	303.301	Purín de cerdo	303.301	Restos ganaderos de otras especies	28.535	380.364	Excedentes hortalizas	14.741	Otros residuos hortofrutícolas
Norte o Antequera (MA)	292.177	Purín de cerdo	292.177	Restos ganaderos de otras especies	35.613	376.114	Alperujo	8.914	Otros residuos hortofrutícolas
La Campiña (SE)	188.170	Purín de cerdo	188.170	Estiércol de vaca	160.926	691.784	Lactosuero	50.700	Residuos de matadero, lodos EDARi, residuos hortofrutícolas, paja de cereal
Campiña del Norte (JA)	61.474	Purín de cerdo	61.474	Materias primas de la industria azucarera	40.861	151.812	Materias primas de la industria azucarera	40.861	Alperujo, alpechín, glicerina
Sierra de Cádiz (CA)	59.092	Purín de cerdo	59.092	Restos ganaderos de otras especies	44.266	149.503	Lactosuero	17.231	Lodos EDARi, residuos hortofrutícolas
Pedroches (CO)	12.466	Estiércol de vaca	236.771	Restos ganaderos de otras especies	135.490	410.437	Alperujo	6.373	Residuos de matadero, lodos EDARi

Figura 76. Zonas con mayor potencial de recurso para la instalación de plantas de digestión anaerobia en Andalucía

2. La materia prima que se propone es purín de cerdo en combinación con los cosustratos que se recogen en la tabla anterior para cada comarca.
3. El modelo de negocio que se propone es un modelo centralizado con plantas con producción de electricidad de potencia de 500 kW, cuya ubicación final esté ligada a una instalación que aproveche el calor (invernaderos, secado de lixiviados, secado de lodos, refrigeración,...), con una buena comercialización del compost. En función de la optimización de estos ingresos y de la rentabilidad también el acuerdo de un canon de tratamiento.
4. La inversión tipo para estas plantas sería de 2 millones de euros, a los que habría que descontar la potencial subvención al tratarse de purines.
5. La viabilidad final de estas plantas habría que analizarla con la resolución de las variables locales que condicionan la inversión (coste de terrenos, tecnología final aceptada,...) y de los ingresos (calor, compost, canon). Esta viabilidad vendría finalmente dada de los acuerdos alcanzados con los suministradores de materia prima, los consumidores de compost y de calor.

9. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

El interés fundamental de desarrollar proyectos de uso energético de biogás parte de una motivación ambiental, no energética. El proceso de digestión anaerobia es un componente



importante en el **tratamiento de residuos** con importante carga orgánica. Su importancia se debe fundamentalmente a:

- 1. Es un proceso necesario para reducir emisiones GEIs y olores..
- 2. Es un proceso que puede ayudar a solventar el problema del tratamiento de determinados residuos como los ganaderos, especialmente los purines de cerdos, evitando la contaminación de aguas subterráneas y ayudando a los ganaderos a dirigir los flujos para los cuales no tienen tierras donde emplearlos.
- 3. Frente a un tratamiento aerobio de los residuos es un proceso con un balance energético positivo. Asimismo, se consigue un producto final, digestato, con un poder fertilizante elevado, con los nutrientes mejor mineralizados y consiguientemente con mayor disponibilidad para la planta, además de suponer un aporte de materia orgánica al terreno.

La tendencia tecnológica es a mezclar distintos sustratos (**codigestión**). La principal ventaja radica en el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas, compensando las carencias de cada uno de los sustratos por separado. Además de incrementar el potencial de producción de biogás, la adición de co-sustratos fácilmente biodegradables confiere una estabilidad adicional al sistema. Otra ventaja de esta técnica es el hecho de optimizar la entrada de sustratos en la planta, reduciendo por tanto el volumen de residuos global no aprovechable. Dicho de otro modo, el aprovechamiento conjunto de dos sustratos diferentes, por ejemplo, purines de cerdo y residuos hortofrutícolas, supone no sólo la reducción de los volúmenes de ambos tipos de residuos, sino también disminuir la dependencia que tendría la planta del aporte de un único residuo del que nutrir a la instalación.

Por el propio mecanismo metabólico de la metanización los sustratos ricos en grasas (glicerinas, grasas animales, aceites de pescado) son los que potencialmente producen más biogás por unidad de sustrato. Sin embargo, la disponibilidad de este tipo de sustrato es menor, por lo que son excelentes candidatos para actuar de cosustratos con otros residuos de mayor disponibilidad. Para el caso andaluz, la mezcla más viable son el purín y restos de la industria agroalimentaria y alperujo.

De las **tecnologías existentes** la más eficiente en la actualidad en producción de biogás es la basada en reactores de tipo granular. Dentro de estas, el reactor tipo UASB es el más extendido aunque tiende a evolucionar a reactores tipo EGSB (una variante del anterior). Todavía se están desarrollando nuevas tecnologías que optimizan los rendimientos de producción de biogás por las diferentes mezclas, realizando pretratamientos cada vez más eficaces. Por otro lado, también están desarrolladas y se sigue investigando en técnicas de depuración del biogás para su introducción en otros circuitos (gas natural, pilas de combustible, automoción).

En relación, a la **rentabilidad económica**, se encuentra muy relacionada con las condiciones locales reales de ingresos y de suministro de sustrato (tamaño de la explotación). Estas plantas se encuentran en el límite de la rentabilidad, por lo que para el aseguramiento de los ingresos deben fijarse acuerdos de antemano asegurando la entrada de materia prima, fijando un canon de tratamiento, asegurando la venta de compost y de calor. Asimismo, la subida en la prima por producción de electricidad es otro de los factores que reclaman los promotores para asegurar la rentabilidad.

Respecto a la inversión (que depende del tamaño de la explotación) dentro de cada tecnología a emplear, presenta una marcada economía de escala, que puede ser superada cambiando a tecnologías más básicas conforme se reduce el tamaño de la planta. Las subvenciones



existentes para plantas de tratamiento de purines ayudan también a mejorar la rentabilidad. Diversos autores indican que son necesarias producciones de más de 30 m³ por tonelada de residuo para asegurar la rentabilidad de una planta.

Respecto a las **Plantas con aprovechamiento energético de biogás en Andalucía**, al encontrarse generalmente englobadas en otras instalaciones, hay un desconocimiento generalizado de las mismas, al no existir registros obligatorios de las mismas salvo que se encuentren en el Registro de productores en Régimen especial. Se puede decir que las instalaciones actualmente existentes, con la precaución debida dada la falta de información, son las 31 instalaciones siguientes:

- EDARs con aprovechamiento de biogás: 9 instalaciones.
- Vertederos con recuperación de biogás: 10 instalaciones
- Digestores industriales: Únicamente se ha podido tener conocimiento de 12 instalaciones en Andalucía.

La **potencialidad para la instalación de nuevas plantas** es elevada pues el principal condicionante existente (la disponibilidad de materia prima biodegradable) se ha puesto de manifiesto en numerosos estudios realizados por la Consejería de Agricultura y Pesca y en el proyecto del Ministerio de Ciencia e Innovación denominado probiogás. Hay que considerar que la principal materia prima para la producción de biogás en Andalucía debe ser el purín por los siguientes aspectos:

- Debido a los problemas ambientales que genera. Su poder contaminante de suelos por la baja relación Carbono/Nitrógeno, sumada a la elevada emisión de GEIs (y de olores) del residuo suponen que su eliminación sea prioritaria, como muestra el Plan de Biodigestión de Purines.
- Existe un respaldo normativo que conmina a su reducción existiendo ayudas a la inversión para su tratamiento.
- Existe una alta disponibilidad.

La comarcas agrarias propuestas para la instalación de nuevas plantas centralizadas en Andalucía es la siguiente:

COMARCA AGRARIA	PURÍN DE CERDO (t/año)	MATERIA PRIMA PRINCIPAL	MATERIA PRIMA PRINCIPAL (t/año)	MATERIA PRIMA SECUNDARIA	MATERIA PRIMA SECUNDARIA (t/año)	MATERIAS PRIMAS TOTALES (t/año)	COSUSTRATO POSIBLE	COSUSTRATO POSIBLE (t/año)	OTROS COSUSTRATOS
Bajo Alanzora (AL)	303.301	Purín de cerdo	303.301	Restos ganaderos de otras especies	28.535	380.364	Excedentes hortalizas	14.741	Otros residuos hortofrutícolas
Norte o Antequera (MA)	292.177	Purín de cerdo	292.177	Restos ganaderos de otras especies	35.613	376.114	Alperujo	8.914	Otros residuos hortofrutícolas
La Campiña (SE)	188.170	Purín de cerdo	188.170	Estiércol de vaca	160.926	691.784	Lactosuero	50.700	Residuos de matadero, lodos EDARi, residuos hortofrutícolas, paja de cereal
Campiña del Norte (JA)	61.474	Purín de cerdo	61.474	Materias primas de la industria azucarera	40.861	151.812	Materias primas de la industria azucarera	40.861	Alperujo, alpechín, glicerina
Sierra de Cádiz (CA)	59.092	Purín de cerdo	59.092	Restos ganaderos de otras especies	44.266	149.503	Lactosuero	17.231	Lodos EDARi, residuos hortofrutícolas
Pedroches (CO)	12.466	Estiércol de vaca	236.771	Restos ganaderos de otras especies	135.490	410.437	Alperujo	6.373	Residuos de matadero, lodos EDARi

Figura 77. Zonas con mayor potencial de recurso para la instalación de plantas de digestión anaerobia en Andalucía



La materia prima que se propone es purín de cerdo en combinación con los cosustratos que se recogen en la tabla anterior para cada comarca.

El modelo de negocio que se propone es un modelo centralizado con plantas con producción de electricidad de potencia de 500 kW, cuya ubicación final esté ligada a una instalación que aproveche el calor (invernaderos, secado de lixiviados, secado de lodos, refrigeración,...), con una buena comercialización del compost. En función de la optimización de estos ingresos y de la rentabilidad también el acuerdo de un canon de tratamiento.

La inversión tipo para estas plantas sería de 2 millones de euros, a los que habría que descontar la potencial subvención al tratarse de purines.

La viabilidad final de estas plantas habría que analizarla con la resolución de las variables locales que condicionan la inversión (coste de terrenos, tecnología final aceptada,...) y de los ingresos (calor, compost, canon). Esta viabilidad vendría finalmente dada de los acuerdos alcanzados con los suministradores de materia prima, los consumidores de compost y de calor.



ANEXOS

- ANEXO I BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN CONSULTADAS
- ANEXO II FICHAS DE PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN EUROPA



ANEXO I

BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN CONSULTADAS



REFERENCIA	1
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	001.GIRO.2008.Codigestión anaerobia de deyecciones ganaderas.ppt
AUTOR / PROMOTOR	Xavier Flotats - Gestió Integral de Residus Orgànics (GIRO)
AÑO	2008
TÍTULO	Codigestión Anaerobia de Deyecciones Ganaderas

REFERENCIA	2
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	002.PBG.2009.Manual Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Probiogás
AÑO	2009
TÍTULO	Manual de Estado del Arte de la Co-Digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales

REFERENCIA	3
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	003.IDAE.2007.Biomasa. Digestores Anaerobios.pdf
AUTOR / PROMOTOR	IDAE
AÑO	2007
TÍTULO	Biomasa. Digestores Anerobios



REFERENCIA	4
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	004.PBG.2009.Genera 2009.Producción de biogás.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Belén Fernández (GIRO) - Probiogás
AÑO	2009
TÍTULO	Producción de Biogás (Conferencia en Genera 2009)

REFERENCIA	5
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	005.ITA.2009.Valorización de purines, gallinaza y residuos vegetales mediante codigestión anaerobia.pdf
AUTOR / PROMOTOR	M ^a Cruz García - Instituto Tecnológico Agrario
AÑO	2009
TÍTULO	Valorización de Purines, Gallinaza y Residuos Vegetales mediante Codigestión Anaerobia: Estudio de la Producción de Biogás

REFERENCIA	6
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	006.USD.2000.Danish Centralised Biogas Plant. Plant Descriptions.pdf
AUTOR / PROMOTOR	University of South Denmark
AÑO	2000
TÍTULO	Danish Centralised Biogas Plant. Plant Descriptions



REFERENCIA	7
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	007.ULL.2001.Aplicación Agrícola de Residuos Orgánicos.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Universidad de Lérida
AÑO	2001
TÍTULO	Aplicación Agrícola de Residuos Orgánicos

REFERENCIA	8
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	008.AIDIS.2002.Codigestión de RSU y lodos.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental
AÑO	2002
TÍTULO	Codigestión de RSU y Lodos Aerobios Residuales, como Alternativa a Procesos de Tratamiento Tradicionales

REFERENCIA	9
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	009.TBG.2000.Tecnología del biogás.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Juan Pablo Silva Velasco - Universidad del Valle
AÑO	2000
TÍTULO	Tecnología del Biogás



REFERENCIA	10
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	010.EurObserv'ER.2008.Le baromètre du biogaz.pdf
AUTOR / PROMOTOR	EurObserv'ER
AÑO	2008
TÍTULO	Le baromètre du biogaz - 2008

REFERENCIA	11
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	011.UTECE.2007.Biogás-Sustratos, desarrollo técnico y costes.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Héctor Miranda - UTECE GmbH
AÑO	2007
TÍTULO	Biogás: Sustratos, Desarrollo de la Técnica y Costos

REFERENCIA	12
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	012.UE.2009.DIRECTIVA RENOVABLES 2009-28-CE2.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Unión Europea
AÑO	2009
TÍTULO	Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009, Relativa al Fomento del Uso de Energía Procedente de Fuentes Renovables y por la que se Modifican y se Derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE



REFERENCIA	13
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	013.BERR.2009. Renewables obligation order 2009.pdf
AUTOR / PROMOTOR	UK Department for Business, Innovation and Skills
AÑO	2009
TÍTULO	The Renewables Obligation Order 2009

REFERENCIA	14
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	014.DBT.2008.EEG.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
AÑO	2008
TÍTULO	Novellierung Erneuerbare-Energien-Gesetz

REFERENCIA	15
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	015.NAO.2005.Renewable Energy.pdf
AUTOR / PROMOTOR	National Audit Office
AÑO	2005
TÍTULO	Renewable Energy



REFERENCIA	16
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	016.AAB.2009.Asoc Alemana Biogas David Wilken Fachverband Biogas.pdf
AUTOR / PROMOTOR	David Wilken - Asociación Alemana del Biogás
AÑO	2009
TÍTULO	El Mercado Europeo del Biogás Agroindustrial

REFERENCIA	17
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	017.NNFCC.2008.Andersons AD Report.pdf
AUTOR / PROMOTOR	National Non-Food Crops Centre
AÑO	2008
TÍTULO	A Detailed Economic Assessment of Anaerobic Digestion Technology and its Suitability to UK Farming and Waste Systems

REFERENCIA	18
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	018.AAB.2008.Biogas in Germany.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Claudius Da Costa Gomez - Asociación Alemana del Biogás
AÑO	2008
TÍTULO	Biogas in Germany



REFERENCIA	19
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	019.AEBIOM.2008.The Case of Austria.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Josef Plank - Asociación Austriaca de Biogás
AÑO	2008
TÍTULO	The Case of Austria

REFERENCIA	20
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	020.CICE.2007.PASENER_2007-2013.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa
AÑO	2007
TÍTULO	Plan Andaluz de Sostenibilidad Energética 2007 – 2013 (PASENER)

REFERENCIA	21
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	021.MITYC.2004.PER 2005-2010 9Cap37_AreaBiogas.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Ministerio de Industria, Turismo y Comercio
AÑO	2004
TÍTULO	Plan de Energías Renovables 2005 - 2010. Área del Biogás



REFERENCIA	22
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	022.MMARM.2009.PNIR 2008-2015 BOE.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino
AÑO	2009
TÍTULO	Resolución de 20 de enero de 2009, de la Secretaría de Estado de Cambio Climático, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015

REFERENCIA	23
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	023.MITYC.2008.Planificación Sectorial de Gas y Electricidad 2008-2016.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Ministerio de Industria, Turismo y Comercio
AÑO	2008
TÍTULO	Planificación De Los Sectores De Electricidad Y Gas 2008-2016. Desarrollo De Las Redes De Transporte

REFERENCIA	24
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	024.MMARM.2009.PLAN BIODIGESTION PURINES.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino
AÑO	2009
TÍTULO	Plan de Biodigestión de Purines



REFERENCIA	25
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	025.CMA.1999.Decreto 218_99.PDTGRSUA.rtf
AUTOR / PROMOTOR	Consejería de Medio Ambiente
AÑO	1999
TÍTULO	Decreto 218/1999, de 26 de Octubre, por el que se aprueba el Plan Director Territorial de Gestión de Residuos Urbanos de Andalucía

REFERENCIA	26
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	026.MITYC.2007.Real Decreto 661_2007.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Ministerio de Industria, Turismo y Comercio
AÑO	2007
TÍTULO	Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la Actividad de Producción de Energía Eléctrica en Régimen Especial

REFERENCIA	27
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	027.MMARM.2009.RD949-2009 subvenciones plan biodig purines.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino
AÑO	2009
TÍTULO	Real Decreto 949/2009, de 5 de junio, por el que se establecen las bases reguladoras de las subvenciones estatales para fomentar la aplicación de los procesos técnicos del Plan de Biodigestión de Purines



REFERENCIA	28
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	028.JA.2007.Ley 2_2007 fomento renovables.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Junta de Andalucía
AÑO	2007
TÍTULO	Ley 2/2007, de 27 de marzo, de Fomento de las Energías Renovables y del Ahorro y Eficiencia Energética de Andalucía

REFERENCIA	29
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	029.CAP.2008.POTENCIAL ENERGETICO BIOMASA RESIDUAL.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Consejería de Agricultura y Pesca
AÑO	2008
TÍTULO	Potencial Energético de la Biomasa Residual Agrícola y Ganadera en Andalucía

REFERENCIA	30
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	030.CMA.2009.INFORME MEDIO AMBIENTE 2008.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Consejería de Medio Ambiente
AÑO	2009
TÍTULO	Medio Ambiente en Andalucía. Informe 2008



REFERENCIA	31
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	031.LEAF.2008.LOOK HULSHOFF.BIOGAS TECHNOLOGY IN EUROPE.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Look Hulshoff et al - Lettinga Associates Foundation
AÑO	2008
TÍTULO	Biogas Technology in Europe

REFERENCIA	32
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	032.AMGA.2008.Rentabilidad Codigestión-Amaya Garijo.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Amaya Garijo - Asociación Española de Biogás
AÑO	2008
TÍTULO	La Co-Digestión, una Solución Rentable

REFERENCIA	33
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	033.UE.2008.Directiva 2008_98_CE directiva marco residuos.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Unión Europea
AÑO	2008
TÍTULO	Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los Residuos y por la que se derogan determinadas Directivas



REFERENCIA	34
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	034.CSIC.2008.La Experiencia del biogás en Andalucía_Rafael Borja.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Rafael Borja - Consejo Superior de Investigaciones Científicas
AÑO	2008
TÍTULO	La Experiencia del Biogás en Andalucía

REFERENCIA	35
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	035.APPA.2009.Josep Turmo-GENERA-Mayo 2009.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Josep Turmo - Asociación de Productores de Energías Renovables (APPA)
AÑO	2009
TÍTULO	Situación Actual del Biogás en España

REFERENCIA	36
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	036.AVEBIOM.2008.Fco.Repullo.Biogas_Case of Spain.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Francisco Repullo - Asociación Española de Valorización de la Biomasa (AVEBIOM)
AÑO	2008
TÍTULO	Biogas from Anaerobic Digestion: Case of Spain



REFERENCIA	37
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	037.MAM.2002.ley 16-2002 IPPC.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Ministerio de Medio Ambiente
AÑO	2002
TÍTULO	Ley 16/2002, de 1 de julio, de Prevención y Control Integrados de la Contaminación

REFERENCIA	38
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	038.PBG.2009.POTENCIAL DISPONIBLE.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Probiogás
AÑO	2009
TÍTULO	Potencial de Materias Primas y Biogás

REFERENCIA	39
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	039.ESE.2009.Biogás de vertedero para automoción.ppt
AUTOR / PROMOTOR	Energía Sur de Europa
AÑO	2009
TÍTULO	Biogás de Vertedero para Automoción



REFERENCIA	40
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	040.CE-ET.2008.From biogas to green gas.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Creative Energy. Energy Transition
AÑO	2008
TÍTULO	From Biogas to Green Gas

REFERENCIA	41
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	041.IVIA.2009.Utilización de digestato como fertilizante.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Remedios Albiach - Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias
AÑO	2009
TÍTULO	Aprovechamiento como Fertilizante de los Digestatos derivados de la Producción de Biogás a partir de Residuos Agroalimentarios

REFERENCIA	42
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	042.ENVISO.2008.Tratamiento del digestato de EnvioMembrana.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Enviso Servicios Ambientales
AÑO	2008
TÍTULO	Tratamiento del Digestato de EnvioMembrana



REFERENCIA	43
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	043.SN.2008.Perspectives for the injection of biogas into the natural gas grid.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Mathieu Dumont - Senter Novem
AÑO	2008
TÍTULO	Perspectives for the Injection of Biogas into the Natural Gas Grid

REFERENCIA	44
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	044.GIRO.2008.Biogás_y_gestión_de_purines.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Xavier Flotats - Gestió Integral de Residus Orgànics (GIRO)
AÑO	2008
TÍTULO	Producción de Biogás y Gestión de Purines

REFERENCIA	45
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	045.AB.2008.Valorización energética del biogás_Alfredo Lietti.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Alfredo Lietti - AB Grupo Industrial
AÑO	2008
TÍTULO	La Valorización Energética del Biogás de Digestión Anaeróbica



REFERENCIA	46
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	046.NE.2008.BioElax.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Grupo Nova Energía
AÑO	2008
TÍTULO	Biogás: Combustible Renovable - BioElax

REFERENCIA	47
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	047.GASNAT.2006.Tratamiento Ambiental de Purines.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Trinidad Carretero - Gas Natural
AÑO	2006
TÍTULO	El Gas Natural y la Gestión Ambiental de los Purines

REFERENCIA	48
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	048.ICE.2008.Producció de biogás per codigestió anaerobia.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Instituto Catalán de la Energía
AÑO	2008
TÍTULO	Producció de biogás per codigestió anaerobia



REFERENCIA	49
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	049.IDAE.2006.Guia_gestion_combustible_flotas_carretera.pdf
AUTOR / PROMOTOR	IDAE
AÑO	2006
TÍTULO	Guía para la Gestión del Combustible en las Flotas de Transporte por Carretera

REFERENCIA	50
CÓDIGO - NOMBRE DEL ARCHIVO	050.BR.2008.Biogas Regions Shining Example.pdf
AUTOR / PROMOTOR	Biogas Regions
AÑO	2008
TÍTULO	Biogas Regions Shining Examples



ANEXO IX

FICHAS DE PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN EUROPA



NOMBRE DE LA PLANTA	Miralcamp	Vila-Sana	Tracjusa	Almazán	Jühnde BioEnergy Village	Frankenför
LOCALIZACIÓN	Lérida	Lérida	Lérida	Soria	Alemania	Alemania
SUSTRATO/S UTILIZADO/S	Purín de cerdo; Residuos agroindustriales, aceite de soja, fangos de depuradoras agroindustriales	Purín de cerdo (80%); derivados de alcohol, de aceites vegetales, lodos de depuradoras industriales, derivados de frutas, cebolla y leche (20%)	Purín de cerdo y lodos de depuradora de matadero	Purín de cerdo	Purín de Vacuno (51%) Silo de hierba y maíz (42%) maíz en grano (7%)	Residuos ganaderos (75% cerdo), residuos matadero y de industria aceitera (25%)
REACTOR/ES	1 CSTR de 1360 m3	2 digestores de 1270 m3	2 CSTR de 3000 m3	2 reactored de 1200 m3	Uno de 3000 m3 y otro de 5000 m3	2 CSTR de 450 m3
TEMPERATURA DE OPERACIÓN	35°C	52-55°C	35-38°C	35°C	38°C	37°C
TIEMPO DE RESIDENCIA	30 días	15 días	21 días	6-8 días	66 días	18 días
CAPACIDAD DE TRATAMIENTO	50 t/día	30,7 t/día	300 t/día	240 t/día	55-60 t/día	47 t/día
MATERIA SECA	3,50%	-	3,50%	-	26%	7,5% ST
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	40 m3/t	71,4 m3/t	20-25 m3/t	14 m3/t	131 - 140 m3/t	54 m3/t
CONTENIDO EN METANO	>65%	-	>65%	>65%	50%	70%
PRODUCCIÓN ELÉCTRICA	-	191 kW	2,7 MW	250 kW	680 kW	150 kW
PRODUCCIÓN CALOR	-	214 kW	-	250 kW	700 kW	-



NOMBRE DE LA PLANTA	Archea	Löningen	Büren - Ahden	Im Brahm, Essen	Rohkraft	Studsgaard
LOCALIZACIÓN	Alemania	Alemania	Alemania	Alemania	Austria	Dinamarca
SUSTRATO/S UTILIZADO/S	Purín cerdo (12,5%); hierba fresca (12,5%); Silo (75%)	Residuos ganaderos (77%), Silo de maíz (23%)	Residuos ganaderos (28,5% cerdo); Residuos de comida (71,5%), adición de glicerina y mezcla de glicerina con agua	Purín de cerdo y FORSU	Purín de cerdo (30%) y cultivos energéticos y restos vegetales (70%)	Residuos ganaderos (19% vacuno; 67,5% porcino); residuos domésticos y de industria alimentaria (13,5%)
REACTOR/ES	1º: 270 m ³ (higienización); 2º:340 m ³	2 horizontales EUCCO de 400 m ³ ; 5 verticales COCCUS de 1800 m ³	2 reactores primarios verticales de 1527 m ³ cada uno; 2 reactores secundarios verticales de 2661 m ³ cada uno	CSTR de 1205 m ³	1 CSTR 2000 m ³ ; 1 CSTR 1850 m ³	2 de 3300 m ³ cada uno
TEMPERATURA DE OPERACIÓN	1º: 37-38°C; 2º: 50-53°C	38-42°C	38-40°C	35°C	39°C	52°C
TIEMPO DE RESIDENCIA	1º: 15-20 días; 2º: 15-20 días	12 horas	Primario <48 días; secundario <46 días	-	77 días	16 días
CAPACIDAD DE TRATAMIENTO	10 t/día	120 t/día	38 t/día	-	50 t/día	266 t/día
MATERIA SECA	12%	5-8%	15%	-	33,7% SV	-
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	>200 m ³ /t	83,3 m ³ /t	-	500 m ³ /t	220 m ³ /t	58,7 m ³ /t
CONTENIDO EN METANO	52-56%	52-55%	65-70%	-	-	-
PRODUCCIÓN ELÉCTRICA	240 kW	800 kW	750 kW	380 kW	8030 MWh/año	-
PRODUCCIÓN CALOR	-	-	-	-	8223 MWh/año	-



NOMBRE DE LA PLANTA	Hegndal - Hemmet	Blåbjerg	Skovbaekgaard	Vegger	Lintrup	Hasjøj
LOCALIZACIÓN	Dinamarca	Dinamarca	Dinamarca	Dinamarca	Dinamarca	Dinamarca
SUSTRATO/S UTILIZADO/S	Residuos ganaderos (95% cerdo), residuos pescado (5%)	Ganaderos (72%), residuos pesqueros y lodos de EDAR (28%)	Vacuno: 450 animales; Glicerina: 1000 m3/año; Grasas vegetales: 100 t/año	Purín de vacuno (71%), residuos de mataderos y otros residuos (29%)	Purín vacuno (40%), Purín cerdo (35%), residuos animales (25%)	Residuos ganaderos (72,5%, vacuno y cerdo); residuos de mataderos, de industria alimentaria y de pescado (27,5%)
REACTOR/ES	1 vertical de 800 m3	2 de 2500 m3	Digestor primario de 1200 m3	4 reactores CSTR de 230 m3	3 reactores CSTR de 2400 m3	1 CSTR de 3000 m3
TEMPERATURA DE OPERACIÓN	termofílico	53,5°C	51°C	55°C	53°C	37°C
TIEMPO DE RESIDENCIA	16 días	-	18 días	-	-	-
CAPACIDAD DE TRATAMIENTO	52,7 t/día	309 t/día	-	59 t/día	547 t/día	138 t/día
MATERIA SECA	-	-	-	-	-	-
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	67,6 m3/t	27,5 m3/t	3000-3500 m3/día sin adición de glicerina; 10000 m3/día con glicerina	97,5 m3/t	28,5 m3/t	59,6 m3/t
CONTENIDO EN METANO	-	-	52-55%	>65%	>65%	-
PRODUCCIÓN ELÉCTRICA	350 kW	7840 kW	1,8 - 2,9 GWh/año	2830 kW	2037 kW	-
PRODUCCIÓN CALOR	-	-	-	-	2600 kW	-



NOMBRE DE LA PLANTA	Thorsø	Sinding - Ørre	Eissen	Nistelrode	Emilia Romagna	Pawłówko
LOCALIZACIÓN	Dinamarca	Dinamarca	Holanda	Holanda	Italia	Polonia
SUSTRATO/S UTILIZADO/S	Purín de vacuno (35%), Purín de cerdo (53%), Residuos de matadero, de pescado y otros (12%)	Purín de vacuno (35%), Purín de cerdo (52%), Residuos de matadero y otros (13%)	Purín de cerdo (22%), Purín de vacuno (22%), silo de maíz (56%)	Residuos avícolas (59,2%); residuos porcinos (22,3%); lodos floculados de la industria cárnica y del pescado (18,5%)	Purín de vacuno (62% 1º periodo, 40% 2º periodo); Residuos agroindustriales: Cebollas, remolacha, patata, maíz (38% 1º periodo, 60% 2º periodo)	Residuos ganaderos (87% cerdo), residuos matadero (13%)
REACTOR/ES	2 digestores de 2325 m3 (CSTR/PFR)	3 reactores de 750 m3	3 reactores de 500 m3	Principal de 75 m3; secundario de 35 m3	2 digestores de 1200 m3 cada uno	-
TEMPERATURA DE OPERACIÓN	53°C	51°C	-	-	38°C	-
TIEMPO DE RESIDENCIA	-	-	-	-	-	-
CAPACIDAD DE TRATAMIENTO	261 t/día	135 t/día	90 t/día	9,1 m3/día	18,5 t/día (1º periodo); 28,5 t/día (2º periodo)	75 t/día
MATERIA SECA	<6%	-	28%	-	-	-
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	27,3 m3/t	48,7 m3/t	222 m3/día	71,4 m3/t	75 m3/t (1º periodo); 100,7 m3/t (2º periodo)	16 m3/t + 2,65 m3/t (almacenamiento)
CONTENIDO EN METANO	-	-	54%	64%	55% (1º periodo); 53% (2º periodo)	65%
PRODUCCIÓN ELÉCTRICA	-	400 kW	1250 kW	146 kW	-	1,4 GWh/año
PRODUCCIÓN CALOR	-	700 kW	-	-	-	2,6 GWh/año





NOMBRE DE LA PLANTA	Holsworthy	Laholm	Aby - Linkoping	Kalmar
LOCALIZACIÓN	Reino Unido	Suecia	Suecia	Suecia
SUSTRATO/S UTILIZADO/S	Estiércol vacuno, porcino y avícola (80%); residuos orgánicos de comida (20%)	Purín cerdo (35%), purín vacuno (25%), Residuos de matadero (40%)	Residuos ganaderos (10%), de matadero (75%), subproductos alimenticios (15%)	Estiércol y aguas residuales (proporción no conocida)
REACTOR/ES	2 de 4000 m ³ cada uno	1 tanque de mezcla de 700 m ³ ; 2 digestores de 220 m ³	2 de 3700 m ³	-
TEMPERATURA DE OPERACIÓN	37°C	35°C	37°C	35°C
TIEMPO DE RESIDENCIA	20 días	21 días	50 días	-
CAPACIDAD DE TRATAMIENTO	400 t/día	150 t/día	150 t/día	-
MATERIA SECA	-	10% ST	10-14% ST	-
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	26,7 m ³ /t	60 m ³ /t	97 m ³ /t	2,5 Mm ³ /año
CONTENIDO EN METANO	-	75%	67,60%	50-88%
PRODUCCIÓN ELÉCTRICA	14,6 MWh/año	20-30 GWh/año	-	-
PRODUCCIÓN CALOR	-	-	-	-



