



PROYECTO SINGULAR ESTRATÉGICO

Desarrollo de sistemas sostenibles de producción y uso de biogás agroindustrial en España (PROBIOGAS)

SUBPROYECTO 7:

Desarrollo de un modelo sostenible de producción de biogás y obtención de otros compuestos valorizables a partir de cultivos energéticos autóctonos y no alimentarios (tabaco y chumbera)



INDICE

1 Objetivo del subproyecto.....	3
2 Descripción de las plantas de demostración.....	3
3 Resultados obtenidos	5
3.1 Estudio de la disponibilidad y características básicas de los cultivos energéticos (tabaco y chumbera).....	5
3.2 Extracción de compuestos valorizables	11
3.3 Ensayos de co-digestión anaerobia	13
3.4 Pruebas de demostración	15
3.5 Aprovechamiento del digerido.....	18

PARTICIPANTES



AINIA CENTRO TECNOLÓGICO

www.ainia.es



CEBAS-CSIC

www.cebas.csic.es



BIOGAS NORD ESPAÑA S.L.

www.biogas-nord.com



UNIVERSIDAD DE LEÓN

www.unileon.es

1 Objetivo del subproyecto

El objetivo del subproyecto es demostrar la sostenibilidad de un modelo de producción y uso de biogás, fertilizantes y otros compuestos valorizables a partir de cultivos energéticos autóctonos y no alimentarios (tabaco y chumbera) en entornos rurales españoles. Se propone un esquema de biorrefinería, tal y como se indica en el diagrama siguiente.

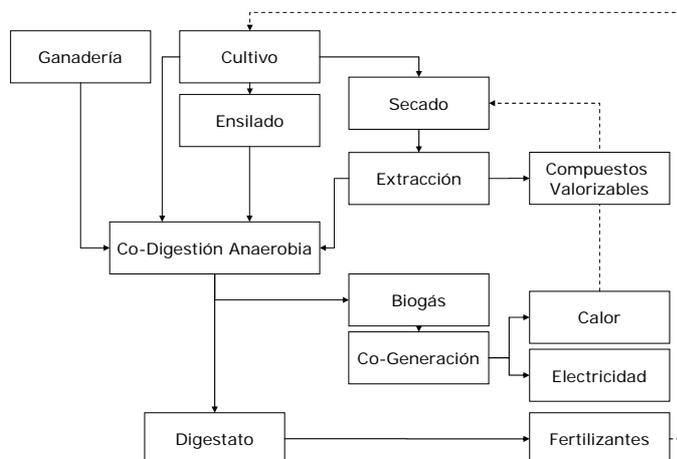


Figura 1. Diagrama de flujo de la biorrefinería de tabaco y chumbera.

2 Descripción de las plantas de demostración.

Los ensayos de simulación de la codigestión de purín y tabaco han sido realizados en la planta de 1m³ UBIMET-I1000. Esta planta piloto consta de un digestor flujo pistón de 1m³ de volumen total y 900 litros de volumen útil. El digestor está provisto de calefacción para operar a una temperatura constante de 38°C, así como de agitación temporizada. (Figura 2).



Figura 2. Planta piloto UBIMET-I1000.

En los ensayos de digestión de estiércol vacuno y chumbera, se disponía de la anterior planta piloto de digestión anaerobia de 1m³ de capacidad, que fue complementada con un digestor adicional de 2m³ para simular la planta de biogás agroindustrial existente en la Granja San Ramón en la cual se realizarían las pruebas de demostración a escala industrial. (Figura 3)



Figura 3. Planta piloto de demostración de la codigestión de cultivos y deyecciones ganaderas. UBIMET-C3000.

La demostración a escala industrial se realizó en la planta agroindustrial existente en la Granja San Ramón, ubicada en Campo Arcís (Requena, Valencia). La planta consta de dos digestores: un primer fermentador de tipo flujo pistón y un postdigestor de mezcla completa. El biogás generado se quema en un motor de cogeneración de 500 kW, vertiéndose la electricidad a la red de distribución y utilizándose la energía térmica para autoconsumo (Figura 4).



Figura 4. Planta de biogás agroindustrial de la Granja San Ramón, donde se realizaron las pruebas industriales de demostración de la codigestión de cultivos y deyecciones ganaderas.



3 Resultados obtenidos

3.1 Estudio de la disponibilidad y características básicas de los cultivos energéticos (tabaco y chumbera).

Se realizó un estudio exhaustivo desde un punto de vista agronómico, logístico, de disponibilidad y de sostenibilidad las características de los cultivos energéticos autóctonos y no alimentarios consistentes en el tabaco y la chumbera. Además, se realizaron caracterizaciones analíticas de los cultivos y se determinó su potencial de producción de biogás.

3.1.1. El cultivo de tabaco

Superficie de cultivo en España

En los últimos tiempos, en lo respectivo al cultivo de tabaco en España, ha existido una clara concentración de superficies y producciones de cultivo en unas pocas comunidades autónomas, especialmente en Extremadura y concretamente en la provincia de Cáceres, que agrupa la inmensa mayoría del total de los campos de cultivo, siguiéndole en importancia la provincia de Granada.

Se ha trabajado con diversas fuentes bibliográficas para realizar un estudio de definición y cuantificación de las zonas actuales de cultivo de tabaco en España, obteniéndose datos evolutivos de la práctica de este cultivo en la última década. En la Tabla 1 se han recogido los datos de los últimos 8 años de producción y superficie cultivada de las explotaciones tabaqueras españolas, incluyendo la distribución por comunidades autónomas según la ESYRCE¹.

La principal zona de producción en Extremadura se concentra en 47 municipios en la provincia de Cáceres y 4 de la provincia de Badajoz. Cabe destacar Talayuela, con una superficie de 2.310 ha en 2007 (un 25,2 % del total de la producción extremeña en el 2007). También se aprecia como toda la producción tabaquera de la provincia de Badajoz se concentra en una única comarca, Don Benito, situada al norte de la provincia lindando con Cáceres.

¹ Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos (Esysrce) – Años 2002 - 2009. Ministerio de Medio Ambiente, Medio rural y marino. (Disponible en red). <http://www.mapa.es/es/estadistica/pags/encuestacultivos/resultados.htm>

SP7. Desarrollo de un modelo sostenible de producción de biogás y obtención de otros compuestos valorizables a partir de cultivos energéticos autóctonos y no alimentarios (tabaco y chumbera)



Tabla 1. Producción de tabaco y distribución en comunidades autónomas (cosechas 2002-2009) en España.

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Producción total (toneladas) (FEGA-MAPA)	41.193,160	38.353,264	40.336,062	40.578,334	33.313,125	34.064,186	33.190,859	35.887,412
Superficie total del cultivo en España (ha) (FEGA-MAPA)	12.724 (Esyrc: 91,33%)	12.552 (Esyrc: 110,9%)	12.131 (Esyrc: 110,20%)	12.101 (Esyrc: 115,12%)	10.043 (Esyrc: 95,27%)	9.947 (Esyrc: 93,81)	9.674 (Esyrc: 83,87%)	10.305 (Esyrc: 86,70%) /E
% Superficie de cultivo Comunidad de Extremadura (Esyrc)	88,98 (10.338 ha)	85,42 (11.890 ha)	84,77 (11.333 ha)	85,69 (11.937 ha)	83,98 (8.036 ha)	89,94 (8.393 ha)	91,86 (7.454 ha)	92,28 (8.244 ha)
% Superficie de cultivo Comunidad de Andalucía. (Esyrc)	9,56 (1.111 ha)	12,44 (1.732 ha)	12,68 (1.695 ha)	11,76 (1.648 ha)	13,91 (1331 ha)	9,16 (855 ha)	6,99 (567 ha)	6,68 (597 ha)
% Superficie de cultivo Comunidad de Castilla y León (Esyrc)	1,1 (128 ha)	1,95 (272 ha)	1,94 (259 ha)	1,7 (237 ha)	2,1 (201 ha)	0,9 (84 ha)	1,15 (93 ha)	1,04 (93 ha)
% Superficie de cultivo comunidad de Castilla La Mancha (Esyrc)	-	0,02 (3 ha)	0,02 (3 ha)	0,38 (53 ha)	-	-	-	-
% Superficie de cultivo de la comunidad de Navarra (Esyrc)	-	-	0,58 (77 ha)	0,29 (41 ha)	-	-	-	-
% Superficie de cultivo de la comunidad del País Vasco (Esyrc)	-	-	-	-	-	-	-	-
% Superficie de la Comunidad de Cataluña. (Esyrc)	0,1 (12 ha)	0,09 (12 ha)	-	0,11 (15 ha)	-	-	-	-
% Superficie de cultivo comunidad Valenciana (Esyrc)	0,25 (29 ha)	0,08 (11 ha)	-	-	-	-	-	-
% Tabaco Variedad Virginia (FEGA-MAPA)	71,55	74,32	74,25	75,39	78,25	79,69	80,96	81,66
% Tabaco Variedad Burley E. (FEGA-MAPA)	15,8	18,2	15,97	13,74	11,94	15,62	16,06	9,93
% Tabaco Variedad Burley F. (FEGA-MAPA)	11,84	9,07	8,82	9,95	9,4	4,31	2,65	7,45
% Tabaco Variedad Havana (FEGA-MAPA)	0,9	0,93	0,89	0,84	0,36	0,32	0,25	0,88
% Tabaco Variedad Kentucky (FEGA-MAPA)	0,07	0,08	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07



La superficie de cultivo de tabaco en Andalucía se ha concentrado históricamente en la provincia de Granada, más concretamente, en la comarca de “La Vega granadina” (destacar a los municipios de Granada y de Vegas de Genil como los principales productores de tabaco de la región. También hay otros municipios que participan con una superficie de cultivo reseñable, como Fuente Vaqueros, Santa Fe, Las Gabias, Churriana de la Vega o Chauchina), registrándose también un pequeño número de explotaciones tabaqueras en la provincia de Sevilla.

Características del cultivo

El tabaco, perteneciente a la especie botánica *Nicotiana tabacum*, se trata de una planta de tallo herbáceo, que presenta un gran desarrollo vegetativo y de ciclo anual (ciclo corto), siendo la fecha óptima para el trasplante en abril-mayo para las especies producidas en España (Virginia y Burley). El cultivo de tabaco requiere temperaturas cálidas (14-32°C) y disponibilidad de agua, aunque puede soportar periodos de déficit acusado de humedad. Es necesario regar previamente al trasplante e inmediatamente después, siendo la dosis de riego idónea de unos 20 l/m². Se adapta mejor a terrenos arenosos con un pH óptimo entre 5,8 y 6,2 y una materia orgánica entre 1,5 y 2,2%. Los aportes de nutrientes se deben situar entre los siguientes rangos: 80-120 kg/ha de N, 40-50 kg/ha de P₂O₅, 250-300 kg/ha de K₂O, y 60-80 kg/ha de Mg. Los rendimientos medios de las explotaciones tabaqueras españolas en 2009 fueron de 3,48 t/ha.

Tabla 2. Características físico-químicas del grueso de los residuos del cultivo de tabaco

Analítica	%
Sólidos totales	97,2
Sólidos volátiles	71,9
Carbohidratos totales	25-50
Proteínas	2,7-4,8
Contenido en minerales	12-45
Nicotina	3-4
Cenizas	25

Potencial de producción de biogás del tabaco

Se analizaron las dos variedades de planta de tabaco más abundantes en España: Virginia y Burley. Se observa una mayor producción en las hojas de tabaco Virginia



que en la variedad Burley, siendo la productividad de biogás de Virginia un 25% superior a la productividad de Burley si se expresa por unidad de sólido volátil. Sin embargo, al tener mayor humedad la variedad Burley, la productividad en peso fresco es un 10% superior en el caso de Burley respecto de Virginia.

Un aspecto a destacar es la rápida biodegradación de este material; la producción máxima se alcanza en 15 días, un tiempo muy inferior al requerido por los cultivos energéticos “tradicionales” (maíz, cebada, etc.).

Tabla 3. . Producción de biogás para las variedades de tabaco Burley y Virginia.

	Virginia	Burley
Biogás, L/kg SV	725	580
Biogás, L/kg	53	58

3.1.2. El cultivo de chumbera

Por el nombre vernáculo de chumbera se suelen agrupar diversas especies del género *Opuntia*, pertenecientes a la familia de las cactáceas. Sin embargo la especie más importante desde el punto de vista de producción es *Opuntia ficus-indica* (L) Miller, también conocida como tuna, nopal, penca, higuera de chumbo o higuera de pala y que es la especie a la que nos referiremos en este documento.

Superficie de cultivo en España

En España la chumbera se encuentra ampliamente distribuida, con un área de distribución prácticamente estable, de 340 hectáreas en 2007 a 359 en 2009 (MARM, 2009). La producción de chumbera está localizada fundamentalmente en la franja mediterránea, especialmente en Andalucía (Almería, Granada y Málaga) y Región de Murcia, Islas Baleares, Islas Canarias (Figura 5).

La superficie total en plantación regular destinada a la chumbera en España se mantiene mayoritariamente en cultivo de secano, de modo que de las 359 hectáreas en plantación regular en 2009, 307 hectáreas se cultivaron siguiendo este régimen y 52 hectáreas en regadío (MARM, 2010). La producción en España en 2009 fue de 1.390 toneladas, de las cuales 397 toneladas se destinaron al mercado nacional (63 toneladas a alimentación animal y 334 toneladas para alimentación humana) y el resto para su venta al extranjero, mayoritariamente para su consumo en fresco.

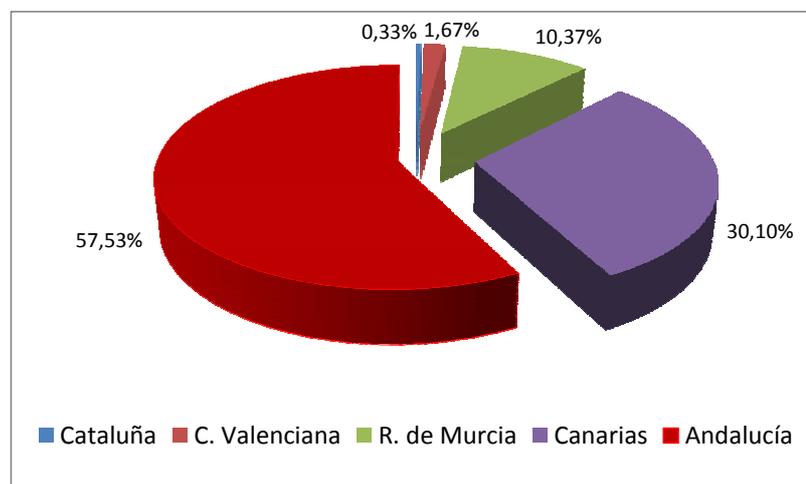


Figura 5. Distribución porcentual del número de hectáreas de producción de chumbera en España (MARM, 2010).

Características del cultivo

La chumbera puede crecer con una elevada eficiencia bajo condiciones limitadas de agua. El límite de humedad ambiental para esta especie está en torno al 40%. Requiere precipitaciones anuales de 400-600 mm para un desarrollo óptimo. Es necesario que no se produzcan períodos de tiempo largos con temperaturas inferiores a los 3° C, pues si la temperatura llega a bajar de los -4° C se pueden producir daños importantes en la plantación. Necesita climas donde haya buena y abundante insolación. Los mejores suelos para la chumbera son los de textura arenosa y pH neutro o ligeramente alcalino. La chumbera puede desarrollarse en suelos pobres en materia orgánica, si bien la adición de enmiendas orgánicas puede aumentar significativamente la producción. Se reproduce tanto por semillas como asexualmente gracias a la capacidad de las palas de enraizar y formar un nuevo individuo. En las producciones españolas de chumbera los rendimientos oscilan entre los 1.573 y 6.045 kg/ha/año en los cultivos de secano y regadío respectivamente. En cuanto a las necesidades de fertilización, en el sistema intensivo se puede utilizar fertilización inorgánica N-P-K, siendo una aplicación común 150 N, 100 P₂O₅ y 50 K₂O kg/ha/año, repartiéndose su adición mensualmente a lo largo del ciclo de cultivo en función de las necesidades de la especie. Según informes del Ministerio de Agricultura, el cultivo de la chumbera en zonas áridas requiere por hectárea: 60 kg de N, 50 kg de P₂O₅ y 25 kg de K₂O.



Debido a su rusticidad y baja demanda tecnológica comparada con otros productos la chumbera es un cultivo perenne que requiere un cuidado mínimo. El cultivo de la chumbera se puede llevar a cabo en zonas semiáridas o áridas con un pequeño aporte de agua de regadío. Se sugiere la plantación solo en tierras semiáridas, usando tierras secundarias donde existe un bajo potencial para otras especies. Los sitios iniciales de expansión deben ser cuidadosamente localizados, con acceso todo el año y proximidad a los mercados para reducir costes de transporte. Las chumberas pueden también suplementar el cultivo de cereales de secano usando los bordes de las parcelas agrícolas, proporcionando protección del ganado y un ingreso adicional para el agricultor.

Tabla 4. Variabilidad en la composición química de la pulpa de higo chumbo (FAO, 2006).

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Humedad (%)	84-91	Vitamina C (mg/100g)	5-41
Proteína (%)	0,2-1,6	Ca (mg/100 g)	13-49
Grasas (%)	0,1-0,7	Mg (mg/100g)	16-98
Fibra (%)	0,02-3,16	Fe (mg/100g)	0,4-2,6
Cenizas (%)	0,4-0,5	Na (mg/100g)	0,6-5,0
Azúcar total (%)	8-17	P (mg/100g)	15-33

Tabla 5. Composición química de palas de distintas edades (% respecto a materia seca) (Pimienta, 1990).

Edad (años)	Proteína	Grasa	Cenizas	Fibra
0,5	9,4	1,00	21,0	8,0
1	5,4	1,29	18,2	12,0
2	4,2	1,40	13,2	14,5
3	3,7	1,33	14,2	17,0
4	2,5	1,67	14,4	17,5



Potencial de producción de biogás de la chumbera

La producción de biogás a partir del fruto es superior a la del cladodio, como era de esperar debido a su mayor contenido en sólidos volátiles. Por causa de su elevada humedad, la productividad de biogás en peso fresco es mucho menor que los cultivos energéticos tradicionales, aunque su rápida degradación (inferior a 10 días) podría hacer este sustrato interesante para su co-digestión con residuos ganaderos.

Tabla 6. Producción de biogás para el cladodio y los frutos de chumbera.

	Cladodio	Frutos
Biogás, L/kg SV	320,8	492,2
Biogás, L/kg	30,1	61,7

3.2 Extracción de compuestos valorizables

3.2.1. Identificación de los compuestos valorizables

Se identificaron los compuestos valorizables presentes en el tabaco y la chumbera, así como las técnicas de extracción disponibles.

En el **tabaco** se han encontrado diversos compuestos de interés industrial, tales como:

- Productos biofarmacéuticos, por ejemplo anticuerpos, hasta un 0,5%.
- Ácido p-hidroxibenzoico en un 25%.
- Enzimas, al menos 5%.
- Otras proteínas, hasta un 47% (peso seco).

En la evaluación preliminar de los procesos de extracción de compuestos de alto valor a partir del tabaco, se observó que para que éstos sean económicamente viables precisan de modificaciones genéticas previas para que los compuestos a obtener se sinteticen o aumente su productividad. La alternativa sin modificación genética es la extracción de aceite de las semillas, pero su rendimiento es muy bajo e incompatible con la producción de biogás, pues el momento de la recolección



necesario para la extracción del aceite es anterior al momento de la recolección para la producción de biogás.

La **chumbera** también ofrece un amplio abanico de posibilidades en cuanto a productos industriales derivados.

- Carmín de cochinilla (una plaga de la chumbera). Se utiliza como colorante alimentario.
- Aceite, de las semillas. Este proceso de extracción tiene un bajo rendimiento y sólo tiene sentido asociado a una industria de elaboración de jugo de frutos de chumbera.
- Mucílago, del cladodio y de las cáscaras de los frutos. Estos productos son hidrocoloides, y tienen utilidad como espesantes en la industria alimentaria, y también como estabilizantes de espumas y emulsiones.
- Pigmentos: betalaínas de las cáscaras de variedades rojas o púrpuras, carotenoides de las chumberas anaranjadas.
- Harina de chumbera, a partir del cladodio. Estas harinas son un ingrediente de las industrias de aditivos alimentarios y farmacéutica. El uso farmacéutico de la harina de chumbera está extendido en América Latina, principalmente en Méjico.
- Productos cosméticos y complementos alimenticios. Existe una gran variedad de este tipo de productos elaborados a partir de chumbera o de jugo de chumbera, teniendo este tipo de productos gran demanda en Méjico.

3.2.2. Pruebas exploratorias de obtención de extractos a partir de hojas de chumbera

Se estudiaron diferentes tipologías de estrategias de procesado, orientadas a los siguientes objetivos: obtención de la fracción mucilaginoso; obtención de extractos globales y eliminación de sustancias inhibitoras de la producción de biogás. Los resultados de las pruebas preliminares de extracción fueron los siguientes:

- En lo referente a la obtención de fracción mucilaginoso, se alcanzaron rendimientos entre el 1,3 y el 2,3%.
- En lo referente a la obtención de extractos globales los mejores rendimientos resultaron superiores al 3%, verificándose además un elevado contenido polifenólico de los extractos.



- En relación con la eliminación de sustancias inhibitoras de la producción de biogás, se considera que la aplicación de la tecnología de extracción por arrastre de vapor resulta adecuada.

En cuanto a las tecnologías, se ensayaron procesos de extracción sólido-líquido con agua, extracción por arrastre de vapor y extracción sólido-líquido con etanol. Se observaron diferencias significativas en cuanto a la aptitud del refinado (chumbera tras la extracción) para digestión anaerobia. En el caso de la extracción con etanol, el refinado queda impregnado con esta sustancia, inhibiendo la digestión anaerobia como se puede observar en la curva de producción de biogás acumulada del ensayo de digestión anaerobia en discontinuo (Figura 6).

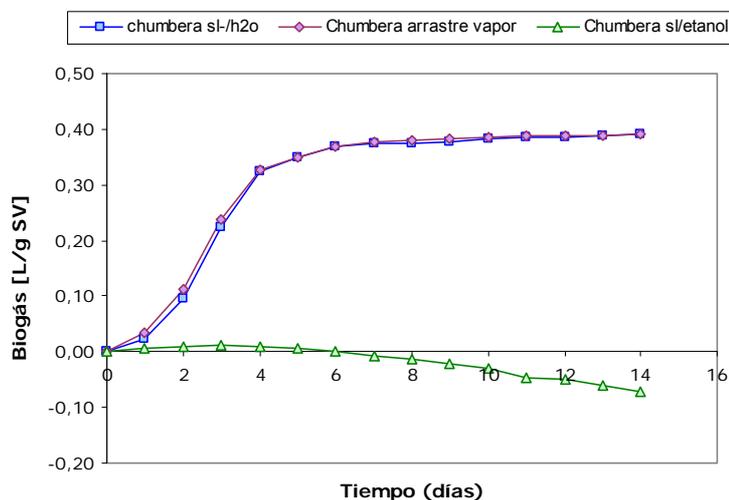


Figura 6. Producción de biogás acumulada (refinados de chumbera).

3.3 Ensayos de co-digestión anaerobia

Tras la determinación de los potenciales de producción de biogás de tabaco y chumbera, se realizaron de pruebas de digestión anaerobia en semi-continuo, para optimizar los parámetros de operación y detectar posibles problemas de inhibición.

3.3.1. Ensayos de simulación a escala de laboratorio: purín y tabaco

Se comenzó a trabajar con una proporción 50% de purines y 50% de cada uno de los tabacos (porcentajes expresados en base sólido volátil, SV). En vista de las dificultades encontradas en la estabilización de los reactores, se redujo la



proporción de los tabacos pasando a trabajar con una proporción del 65% SV de purines y 35% SV de tabaco. En estas nuevas condiciones la producción de biogás es más estable a lo largo del tiempo. En lo referente al reactor con mezcla de tabaco variedad Virginia se observa una producción de metano notablemente incrementada con respecto al reactor control (solamente purín) en cada uno de los TRH ensayados (50, 35 y 25 días). En el caso del reactor con mezcla tabaco de variedad Burley, este incremento fue menor en líneas generales.

En resumen, las principales conclusiones de estos ensayos fueron:

- La co-digestión de purín y tabaco es técnicamente viable en una proporción 65% SV purín – 35% SV tabaco.
- La velocidad de carga orgánica (VCO) máxima para la codigestión con tabaco Burley fue de $1,4 \text{ kg}_{\text{SV}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, mientras que con tabaco Virginia fue de $1,6 \text{ kg}_{\text{SV}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$.
- La producción de biogás a la VCO máxima fue de $1 \text{ m}^3/\text{m}^3_{\text{digestor}}$, con un 67% de metano, lo que equivaldría aproximadamente a $0,7 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{m}^3_{\text{digestor}}$

3.3.2. Ensayos de simulación de co-digestión de purines y chumbera

El objetivo de los ensayos de codigestión de purines de cerdo y chumbera era evaluar la viabilidad técnica de esta codigestión, y determinar los parámetros de operación óptimos de la misma. Los ensayos realizados de codigestión de chumbera y purín de cerdo en proporción 1:1 (base húmeda) han permitido extraer las siguientes conclusiones:

- El purín porcino y los cladodios de *Opuntia ficus indica* son complementarios para la digestión anaerobia, especialmente en lo que se refiere a la relación C/N.
- La codigestión anaerobia de una mezcla 1:1 de purín porcino y *Opuntia ficus indica* es técnicamente viable.
- Los parámetros de control predictivos en este caso son los ácidos grasos volátiles, en especial el ácido acético y el ácido propiónico.
- Dada la concentración de sulfuro de hidrógeno en el biogás, sería necesario un sistema de desulfurización del biogás externo.
- La producción de biogás máxima se observa a unas velocidades de carga orgánica de:

- $VCO = 1,5 \text{ kg}_{SV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ en términos de utilización de sustrato (mejor calidad del digestato). Producción de biogás de 406,5 NL /kg SV, con 56,0% de metano.
- $VCO = 3,5 \text{ kg}_{SV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ en términos de utilización de volumen de digestor (mejores resultados económicos de la planta de biogás). La producción de biogás en estas condiciones fue de 939,9 NL/m³, con un 56,3% de metano.

3.4 Pruebas de demostración

Se desarrollaron las pruebas experimentales de digestión anaerobia a escala semi-industrial (piloto) e industrial con los cultivos de tabaco y chumbera, junto con la optimización y obtención de datos para el estudio de sostenibilidad.

3.4.1. Ensayos de codigestión a escala piloto de purín y tabaco

Se realizó una prueba experimental de codigestión a escala piloto de purín y tabaco en un digestor de 2 m³, con una mezcla de 65:35 de purín-tabaco (en base sólidos volátiles), lo que equivale a un 97:3 en base húmeda. Se consiguió una operación estable con un VCO de 1,65 kg_{SV}/(m³·d), un TRH de 35 días y temperatura mesofílica (35°C) durante dos tiempos de retención. El resultado en cuanto a producción de metano fue muy similar a los ensayos en reactores de laboratorio (390 L_N/kg_{SV} vs. 400 L_N/kg_{SV}), y la eliminación de sólidos volátiles fue de 64,5%.



Variedad Burley



Variedad Virginia

Figura 7. Muestras de tabaco utilizadas para los ensayos experimentales.

3.4.2. Ensayos de demostración a escala piloto de estiércol vacuno y chumbera

El objetivo de los ensayos de demostración a escala piloto realizados en el reactor UBIMET C-3000 (Figura 3) era validar los resultados experimentales obtenidos a escala de laboratorio y determinar las condiciones de operación más adecuadas para la demostración a escala industrial.

Antes de su empleo en la planta, se redujo el tamaño de los cladodios y se procedió a su mezcla con el estiércol, según se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Preparación de los sustratos antes de su alimentación.

La alimentación se inició en las mismas condiciones que los ensayos en continuo a escala piloto de laboratorio: 50% chumbera y 50% estiércol en base húmeda. Sin embargo, esta mezcla de alimentación dio lugar a problemas hidráulicos y hubo que reducir el porcentaje de chumbera hasta un 15% para posibilitar la alimentación.

Los ensayos de codigestión de chumbera y estiércol de vaca realizados en planta piloto en proporción 15:85 han permitido extraer las siguientes conclusiones:

- El estiércol de vaca y los cladodios de *Opuntia ficus indica* son complementarios para la digestión anaerobia, especialmente en lo que se refiere a la relación C/N.
- La producción de biogás observada es superior a la obtenida con la digestión anaerobia de estiércol, y estable a lo largo del periodo experimental. Con VCO $1 \text{ kg}_{\text{SV}} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ la producción de biogás es de 514,5 NL/kg SV, con un 50 % de concentración de metano en el biogás.
- La codigestión anaerobia de una mezcla 15:85 de estiércol de vaca y *Opuntia ficus indica* es técnicamente viable, pero un porcentaje mayor de chumbera puede presentar limitaciones en cuanto a su comportamiento mecánico.

- El pretratamiento de trituración de los cladodios de la chumbera esencial a la hora de asegurar el buen funcionamiento mecánico e hidráulico del proceso de digestión anaerobia de la mezcla.
- Dada la alta concentración de H₂S encontrada en el biogás, sería necesario probablemente un sistema de desulfurización del biogás externo.

3.4.3. Ensayos de demostración a escala industrial

Se evaluó el comportamiento mecánico de los cladodios de chumbera en una planta de biogás agroindustrial existente.

Los sustratos de alimentación de la planta fueron los empleados normalmente por ésta (estiércol de vacuno generado en la Granja San Ramón y cosustratos vegetales), añadiéndose a la mezcla de alimentación los cladodios de chumbera hasta un porcentaje en torno al 1%.



Figura 9. Sistema de trituración de la chumbera a escala industrial.

Los ensayos de demostración de codigestión de chumbera y estiércol de vaca realizados en la planta industrial de Granja San Ramón han permitido extraer las siguientes conclusiones principales:

- La codigestión anaerobia de estiércol de vaca y *Opuntia ficus indica* como cosustrato parece viable técnicamente a nivel industrial, ya que no modificó sustancialmente los parámetros de estabilidad del proceso de digestión anaerobia.
- Debe realizarse un pretratamiento previo para eliminar los trozos más lignificados.



- Desde el punto de vista del comportamiento hidráulico y mecánico de la utilización de chumbera como cosustrato se destaca la importancia de la adecuada trituración previa de cladodios, debido a las incidencias provocadas en la alimentación de la planta agroindustrial.

3.5 Aprovechamiento del digerido

Se realizó una caracterización de las muestras orientada a su posible aplicación en los cultivos de la chumbera y el tabaco.

3.5.1. Caracterización química y microbiológica del digerido

El digerido, obtenido de la planta experimental de generación de biogás operando en co-digestión de estiércol de vacuno y tabaco se caracterizó químicamente previamente a su aplicación en el suelo para establecer su valor como abono orgánico. Los valores de (DBO_5) de $16,9 \text{ g L}^{-1}$ encontrados, indican alta inestabilidad biológica del material que precisa de post-tratamiento para su aplicación agrícola.

Tabla 7. Caracterización de los materiales digeridos y del compost de digerido.

	Digerido Bruto (p.f.)	Fracción Líquida (p.f.)	Fracción Sólida (p.s)	Compost (p.s)
pH	8,1	7,9	8,7	6,9
CE (dS m^{-1})	35,6	29,2	6,1	6,2
Humedad (%)	90,7	96,8	82,6	66,8
MO^{\dagger} (%)	67,3	60,3	69,4	69,1
COT (g kg^{-1})	28,9	10,8	311	346
NT (g kg^{-1})	4,4	3,1	22,8	29
N-NH_4^+ (g kg^{-1})	3,1	2,2	10,5	0,1
N-NO_3^- (g kg^{-1})	<0,1	<0,1	<0,1	1,8
C/N	6,5	3,4	13,6	11,9
P total	0,7	0,1	8,5	7,0
K total	7,1	4,7	23,9	16,4



3.5.2. Capacidad fertilizante del digerido

Se determinó la dinámica de mineralización de C y N de los digeridos en el suelo, evaluándose los siguientes materiales: digerido bruto, fracción sólida del digerido, fracción líquida del digerido, fracción sólida compostada y purín bruto.

La aplicación al suelo de la fracción sólida de digerido provoca una inmovilización microbiana de nitrógeno, que inhibe la formación de nitratos, limitando su valor fertilizante. El compost es el único material que no provoca inmovilización de N, más al contrario produce la lenta y progresiva mineralización del N-orgánico con la formación de nitratos, forma fácilmente asimilable por las plantas. Así, desde el punto de vista agronómico, el valor fertilizante de N de los materiales, disminuye en el orden: compost < digerido ≤ fracción líquida < purín < fracción sólida. Por tanto de los materiales sólidos, el compost es el que posee mayor valor agronómico, aportando mayor cantidad de N disponible para los cultivos y con materia orgánica estable. De los materiales líquidos el digerido sin separar posee una mayor riqueza fertilizante nitrogenada, y también posee la ventaja de mayor estabilidad que el purín sin tratar. Por tanto la combinación de ambos procesos anaerobio y aerobio (compostaje) parece recomendable para obtener el mayor beneficio agronómico.

3.5.3. Utilización del digerido como abono orgánico

Para determinar las posibilidades de utilización y revalorización agronómica de los productos residuales de la planta de generación de biogás se llevó a cabo un estudio agronómico en el cual se aplicaron las distintas fracciones de los materiales digeridos como abono de fondo en un cultivo de tabaco (*Nicotiana tabacum*) y chumbera (*Opuntia ficus-indica*).

3.5.3.1. Utilización del digerido como abono orgánico en un cultivo de tabaco (*Nicotiana tabacum*)

El experimento se llevó a cabo en macetas en un invernadero de la finca experimental propiedad del CEBAS situada en Santomera (Murcia). Las plantas de tabaco (*Nicotiana tabacum*) var. Virginia K326 utilizadas en el experimento se plantaron en macetas (35 cm de diámetro, dos plantas por maceta) tras 55 días de desarrollo vegetativo en semillero.



Figura 10. Distribución de los tratamientos de tabaco en el invernadero.

El desarrollo vegetal del cultivo tratado con fertilización inorgánica fue significativamente mayor al resto de los tratamientos aplicados en el estudio agronómico. Producción de biomasa de tabaco (en kg ha^{-1}) disminuyó en el orden: digerido bruto (3475) < fracción sólida del digerido (2630) < fracción líquida del digerido (2840) < control sin fertilización (1390). Se aprecia, por tanto, que el digerido bruto se puede considerar un buen material fertilizante.

La concentración de nutrientes de las plantas indicó que los materiales digeridos fueron menos eficientes en la nutrición de N de las plantas de tabaco que el fertilizante mineral, aunque el digerido bruto llevó a una mayor producción de planta. Sin embargo, el compost actuó como un buen fertilizante orgánico, obteniendo una correcta nutrición de las plantas. Ello indica que los materiales digeridos por biometanización pueden sustituir a los fertilizantes inorgánicos en el cultivo de tabaco, pero de una forma parcial. Su utilización debe realizarse como fertilización de fondo antes de plantar, complementando con fertilización inorgánica durante la etapa de mayor desarrollo vegetal.

Los resultados obtenidos en el presente experimento indican que sería factible plantear un abonado de fondo máximo de $13 \text{ m}^3/\text{ha}$ de digerido anual en este cultivo, suplementando con fertilizante mineral durante su desarrollo vegetativo.

3.5.3.2. Utilización del digerido como abono orgánico en un cultivo de chumbera (*Opuntia ficus-indica*)

El experimento se llevó a cabo en invernadero en la finca experimental propiedad del CEBAS situada en Santomera (Murcia), plantando en macetas palas jóvenes de chumbera recientemente propagadas.



Figura 11. Vista del cultivo de chumbera, donde aprecian los nuevos brotes generados durante el experimento.

La producción de biomasa, expresada como peso de palas nuevas desarrolladas durante el experimento, fue significativamente superior en las chumberas abonadas que en las plantas control.

Tabla 8. Producción de biomasa de la chumbera durante el desarrollo del estudio.

Tratamiento	Biomasa (g palas jóvenes)
Control	23,76 b
Digerido bruto	50,92 a
Fracción sólida	48,72 a
Fracción líquida	56,68 a
Compost	55,38 a
Fertilización inorgánica	50,32 a

Para un mismo parámetro, valores seguidos distintas letras indican diferencias significativas entre tratamientos.

La concentración foliar de macronutrientes (N, P, K) no mostró diferencias significativas entre los distintos tratamientos aplicados. Por tanto, los materiales digeridos y el compost pueden sustituir a la fertilización inorgánica en el cultivo de chumbera para la producción de biogás, con un óptimo estado nutricional de las plantas. A partir de los resultados obtenidos se estima que anualmente se puede reciclar 13,6 m³ de digerido bruto por hectárea de cultivo de chumbera.



Se plantea una alternativa factible para el reciclado del digerido en cultivos energéticos, basada en alternar ambos cultivos estudiados, es decir, disponer de superficie para establecer una zona de cultivo de tabaco (cultivo anual), y otra zona de cultivo de chumbera, que al ser una especie perenne, no habría que propagar todos los años. Además la chumbera admite podas intensas en el otoño, lo que permitiría plantear una estrategia de cultivo basada en alternar las podas anuales en diferentes hileras del cultivo. El suministro de sustrato para digestión anaerobia estaría garantizado durante el otoño-invierno a partir de chumbera. Mientras que el desarrollo del cultivo de tabaco en primavera aseguraría el suministro de sustrato para digestión anaerobia durante el verano.

3.5.4. Fertilidad del suelo

El análisis del suelo tras la aplicación de los tratamientos orgánicos puso de manifiesto que el valor fertilizante más evidente que presentaron los digeridos se debió a la presencia de nitrógeno en forma amónica, que es rápidamente transformado en nitrato tras su adición al suelo, y es directamente disponible para el cultivo. Junto a este nutriente también destacaron elevados contenidos en fósforo y potasio. La aplicación agronómica éstos materiales digeridos debe programarse en función del requerimiento nutricional del cultivo, a fin de evitar una aplicación excesiva que pudiera causar problemas de contaminación ambiental por lixiviación.

El aporte de materia orgánica de éstos materiales llevó a una mejora en las propiedades biológicas del suelo que repercute positivamente en la calidad y productividad del mismo, favoreciendo un óptimo desarrollo del cultivo debido al efecto positivo de las poblaciones microbianas del suelo asociadas a la rizosfera.