



TESIS DOCTORAL

**FACTIBILIDAD DE PROYECTOS DE INVERSIÓN PARA PLANTAS DE
BIOGÁS AGROINDUSTRIAL A PEQUEÑA ESCALA USANDO COMO
SUSTRATOS PURINES Y CHUMBERAS [Opuntia ficus indica(L)
Miller]]**

HEIDI MARÍA BOLÍVAR PIMIENTA

Departamento de Física aplicada

Conformidad de los directores:

Fdo: Juan Félix González

Fdo: Luis Fernando De la Macorra

2017

RESUMEN

En esta investigación se estudió la factibilidad de proyectos de inversión para plantas de biogás agroindustrial a pequeña escala utilizando como sustratos purines y chumberas [*Opuntia ficus –indica (L) Miller*]. Para ello se realizó un análisis técnico-científico, económico y socio-ambiental.

Con el estudio técnico-científico, se estableció la forma óptima de trabajar con los sustratos seleccionados, inicialmente se realizó la caracterización de los sustratos, usando las técnicas convencionales.

Se evaluó el potencial máximo de la producción del biogás del purín, en un régimen discontinuo, midiendo diariamente la cantidad de metano producido y controlando los parámetros ambientales como el pH, potencial Rédox, sólidos volátiles (SV), sólidos totales (ST) y DQO_T. Los potenciales de rendimiento de los purines presentaron valores muy bajos.

Se analizó el efecto de la codigestión del purín con la chumbera en ensayos tipo batch, con mezclas de 5%, 7.5% 10%, 15%, 30% y 50%, se estudiaron los rendimientos, porcentajes de metano, incremento de los potenciales con respecto al purín, la relación C/N, y las constantes cinéticas. La codigestión 30% chumbera y 70% purín presento los mejores resultados, con rendimientos de metano de $159,43 \pm 6,5$ L CH₄/kg SV y con un porcentaje de metano del 63%.

Igualmente se diseñó un experimento en semicontinuo, adicionando chumbera al purín, se inició con una velocidad de carga orgánica (VCO) de 0.23 g SV/Ld, y se fue ascendiendo con 0,48 g SV/Ld, 0,71 g SV/Ld, 0,95 g SV/Ld y 1,19 g SV/Ld, donde se detuvo el proceso. Los mejores resultados se obtuvieron en 0,71 g SV/Ld, con rendimientos de metano de $415,85 \pm 38,11$ L/kg SV y con un porcentaje de metano de $59,90 \pm 1,99$.

Para determinar las condiciones de operación de la planta, se diseñó un experimento de purín en semicontinuo cuyos valores de rendimiento fueron 200 L CH₄/kg SV, con porcentaje de CH₄ de 58%.

El análisis económico se hizo sobre un caso real, teniendo en cuenta la cantidad de purines que generaba la granja, se determinó el tamaño del digestor, y se realizaron las mezclas de sustratos que optimizarán los requerimientos eléctricos y térmicos de la instalación, dando como resultado el diseño de un digestor de 440 m³ con cargas de

18,33 t/día, discriminadas así: 15,5 t/día de purines y 2,78 t/día de chumbera. Se obtuvo una potencia eléctrica instalada de 21,84 kW. La VAN y la TIR fue de 7.211,97 y 5,5% respectivamente, la recuperación de la inversión (Payback) fue de 10,30 años.

En el análisis de impacto socio-ambiental dio como resultado que las fortalezas más importantes de estos proyectos son:

- su capacidad para reducir las emisiones de GEI
- La disponibilidad de un digestato más higienizado y con mejores propiedades agronómicas,
- Generación de mano de obra y el desarrollo comercial en la zona donde se desarrolla el proyecto.

ABSTRACT

In this research the feasibility of investment projects for small-scale agro-industrial biogas plants was studied using pig slurry and prickly pear as substrates [*Opuntia ficus-indica* (L) Miller]. For this, a technical-scientific, economic and socio-environmental analysis was carried out.

With the technical-scientific study, the optimal way to work with the selected substrates, was established, initially the characterization of the substrates was carried out, using the conventional techniques.

The maximum potential of the biogas production of the slurry was evaluated in a discontinuous regime, daily measuring the amount of methane produced and controlling the environmental parameters such as, pH, Redox potential, volatile solids (SV), total solids (ST) and DQO_T. Slurry performance potentials were very low.

The effect of codigestion of the pig manure with the prickly pear was studied in batch digester, with mixtures of 5%, 7.5% 10%, 15%, 30% and 50%, the yields, methane percentages, potentials increase with respect to slurry, C/N ratio, and kinetic constants. The codigestión 30% prickly pear and 70% purín presented the best results, with yields of methane of 159.43 ± 6.5 L CH₄/kg VS and with a percentage of methane of 63%.

Also semicontinuous experiment was designed by adding prickly pear to the pig slurry, starting with an organic loading rate (VCO) of 0,23 g SV/Ld, and increasing with 0.48 g SV/Ld, 0.71 g SV/Ld, 0.95 g SV/Ld and 1.19 g SV/Ld, where the process was stopped. The best results were obtained in 0.71 g SV/Ld, with methane yield of 415.85 ± 38.11 L/kg SV and with a methane percentage of $59.90 \pm 1.99\%$.

To determine the operating conditions of the biogás plant was performed a semi-continuous slurry experiment with 200 L CH₄/kg VS, with a CH₄ percentage of 58%.

The economic analysis was made on a real case, taking into account the quantities of pig slurry generated, the size of the digester was determined, and the mixtures of substrates were made that will optimize the electric and thermal requirements of the farm. Resulting in the design of a 440 m³ digester with loads of 18.33 t/day, broken down as follows: 15.5 t/day of pig slurry and 2.78 t/day of prickly pear. An installed electrical power of 21.84 kW was obtained. The NPV and IRR were 7.211,97 and 5.5, respectively, the recovery of the investment (Payback) was 10,30 years.

In the socio-environmental impact analysis it was found that the most important strengths of these projects are:

- their ability to reduce GHG emissions
- Availability of digestate with better agronomic properties and more sanitized
- the generation of labor and commercial development in the area where those projects are developed.

Agradecimientos

A Dios, por ser mi guía y mi soporte en cada momento de mi vida.

A mis directores, por su paciencia, dedicación y motivación en el desarrollo de la tesis.

A José Fernando Suarez Mejido, por sus consejos, su guía y las horas dedicadas a este proyecto.

A Alfonso, por su apoyo, paciencia y amor y por todas las horas que le he quitado durante este tiempo.

A Ana y Belén, por estar siempre conmigo, por ser mis hermanas aquí en España.

A todos los amigos que me han quedado en la universidad de Extremadura, que siempre me han ayudado y motivado en las diferentes etapas que me ha tocado vivir aquí en España.

A mi familia, por todo el amor incondicional que siempre me han dado. Los amo con el alma.

Índice General

RESUMEN	<i>i</i>
ABSTRACT	<i>iii</i>
Agradecimientos	<i>v</i>
Índice General	<i>vii</i>
Índice de figuras	<i>xiii</i>
Índice de tablas	<i>xvii</i>
1. INTRODUCCIÓN	<i>1</i>
1.1 Antecedentes	<i>3</i>
1.2 Digestión anaerobia	<i>6</i>
1.2.1 Tipos de Biogás	<i>7</i>
1.2.1.1 Biogás de Vertedero.	<i>8</i>
1.2.1.2 Biogás procedente de depuradoras.	<i>8</i>
1.2.1.3 Biogás Agroindustrial.	<i>8</i>
1.2.2 Etapas de La Digestión Anaerobia.	<i>10</i>
1.2.2.1 Etapa de hidrólisis.	<i>11</i>
1.2.2.2 Etapa acidogénica.	<i>11</i>
1.2.2.3 Etapa acetogénica.	<i>11</i>
1.2.2.4 Etapa metanogénica	<i>11</i>
1.2.3 Pretratamientos	<i>12</i>
1.2.3.1 Mecánicos	<i>13</i>
1.2.3.2 Térmicos	<i>13</i>
1.2.3.3 Biológicos	<i>13</i>
1.2.3.4 Químicos	<i>13</i>
1.2.3.5 Termoquímicos	<i>14</i>
1.2.3.6 Ultrasonidos:	<i>14</i>
1.2.4 Parámetros que regulan el proceso de D.A.	<i>14</i>
1.2.4.1 Tipos de sustratos	<i>14</i>
1.2.4.2 Relación carbono/nitrógeno.	<i>17</i>
1.2.4.3 Porcentajes de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV)	<i>17</i>
1.2.4.4 Tiempo de retención hidráulico (TRH)	<i>18</i>
1.2.4.5 Velocidad de carga orgánica (VCO)	<i>18</i>
1.2.4.6 Temperatura	<i>19</i>

1.2.4.7	Rango de pH y Alcalinidad	19
1.2.4.8	Potencial rédox	20
1.2.4.9	Agitación	20
1.2.4.10	Promotores	20
1.2.4.11	Inhibidores	21
1.2.5	Tecnología de la digestión anaerobia.	22
1.2.5.1	Digestores tipo Batch	22
1.2.5.2	Digestores tipo continuo	23
1.2.6	Almacenamiento del biogás	24
1.2.7	Cinética del proceso	25
1.2.8	Usos del Biogás	26
1.2.8.1	Combustión directa.	27
1.2.8.2	Producción de calor o vapor	27
1.2.8.3	Generación de electricidad o combinación de calor y electricidad	27
1.2.8.4	Combustible para vehiculo	27
1.2.9	Purificación del Biogás	27
1.2.9.1	Método para eliminar el H ₂ S (desulfuración)	29
1.2.9.2	Métodos para eliminar el vapor de H ₂ O	30
1.2.9.3	Métodos para eliminar el CO ₂	31
1.2.10	Aprovechamiento energético del biogás.	32
1.2.10.1	Motores de combustión Interna (MACI)	33
1.2.10.2	Microturbinas	33
1.2.10.3	Turbinas de gas	34
1.2.11	Digestato	35
1.2.11.1	Digestato en forma líquida	35
1.2.11.2	Digestato en forma sólida	35
1.3	Sustratos utilizados	35
1.3.1	<i>Chumbera [Opuntia ficus-indica(L) Miller].</i>	35
1.3.1.1	Descripción Morfológica.	37
1.3.1.2	Composición físico-química.	39
1.3.1.3	Requerimientos del cultivo.	40
1.3.1.4	Usos de la chumbera	45
1.3.2	Purines	48
1.3.2.1	Características de los purines de cerdo.	48
1.3.2.2	Usos del purín	49
1.4	Marco legal	50
1.4.1	Legislación medioambiental.	50

1.4.1.1	Directiva 2009/28/CE marco de residuos (EUR-LEX, 2009)	50
1.4.1.2	LEY 22/2011 del 28 de julio de residuos y suelos contaminados	51
1.4.1.3	Plan Estatal de marco de gestión de residuos PEMAR (2016-2022)	52
1.4.2	Cambios climáticos y reducción de gases efecto invernadero (GEI)	52
1.4.2.1	Protocolo de Kioto (Unión Europea)	52
1.4.2.2	Plan de asignación de gases de efecto invernadero (PNA) 2013-2020 (España).	53
1.4.2.3	Plan de biodigestión de purines (España).	53
1.4.3	Normativa para las instalaciones de autoconsumo	53
1.5	Rentabilidad	54
1.5.1	Costes de inversión	54
1.5.2	Costes de explotación	55
1.5.3	Valoración de beneficios	55
1.5.3.1	Beneficios económicos	55
1.5.3.2	Beneficios sociales	56
1.5.4	Indicadores de evaluación económica.	56
1.5.4.1	Periodo de recuperación (PR)	56
1.5.4.2	Valor presente Neto (VPN)	56
1.5.4.3	Tasa Interna de Rentabilidad (TIR)	57
1.5.5	Análisis de sensibilidad	57
1.6	Impactos socio-ambientales del proyecto	57
1.7	Objetivos	58
1.8	Alcance	59
2.	<i>MATERIALES Y MÉTODOS</i>	61
2.1	Preparación y caracterización de los sustratos	63
➤	Purín	64
2.2	Ensayo tipo Batch	64
2.3	Ensayo en semicontinuo	64
2.4	Digestor utilizado.	65
2.5	Medición del biogás	67
2.6	Parámetros de control	68

2.6.1	pH	68
2.6.2	Potencial rédox	69
2.6.3	Demanda química de oxígeno total.	69
2.6.4	Sólidos totales y volátiles	69
2.6.5	Alcalinidad	69
2.6.6	Relación C/N	69
2.6.7	Determinación de metales pesados	69
2.6.8	Ajuste cinético	69
2.6.9	Análisis estadístico	70
2.6.10	Rentabilidad de la inversión	71
2.6.11	Impactos socio-ambientales del proyecto	71
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	73
3.1	Caracterización de los sustratos utilizados	75
3.2	Ensayos tipo Batch	76
3.2.1	Batch 1: Codigestión de purín y chumbera en proporciones de 5%, 7.5%, y 10%	76
3.2.1.1	Rendimientos de biogás y metano	77
3.2.1.2	Efecto de la relación C/N en la productividad del proceso	79
3.2.1.3	Evolución del pH y potencial rédox	80
3.2.1.4	Sólidos totales y volátiles	81
3.2.1.5	Variación de la DQO _T	83
3.2.1.6	Resultados de la aplicación del modelo cinético al ensayo batch 1	84
3.2.2	Batch 2: Codigestión de purín y chumbera en proporciones de 15%, 30%, y 50%	87
3.2.2.1	Rendimiento de biogás y metano	89
3.2.2.2	Efecto de la relación C/N en la productividad del proceso	91
3.2.2.3	Evolución del pH y potencial rédox	92
3.2.2.4	Sólidos totales y sólidos volátiles	93
3.2.2.5	Variación de la DQO _T	95
3.2.2.6	Resultados de la aplicación del modelo cinético al ensayo batch 2	96
3.3	Experimento en semicontinuo: Purín+chumbera	99
3.3.1	Control de parámetros del batch 3	101
3.3.2	Producción de metano en el ensayo semicontinuo (1)	103
3.3.3	Parámetros de control en el ensayo en semicontinuo (1)	105
3.3.4	Producción de metano para el ensayo en semicontinuo (2)	108
3.3.5	Parámetros de control en el ensayo semicontinuo (2)	110
3.3.6	Producción de metano en el ensayo en semicontinuo (3)	112

3.3.7	Parámetros de control en el análisis semicontinuo (3)	116
3.4	Análisis del digestato.	118
3.5	Análisis estadístico.	119
3.6	EVALUACIÓN DE UN CASO PRÁCTICO	121
3.6.1	Tamaño del digestor	122
3.6.2	Potencia eléctrica instalada	125
3.6.3	Presupuesto de inversión	127
3.6.4	Bonos de carbono	128
3.6.5	Digestato	129
3.6.6	Costes de operación	129
3.6.7	Ingresos	130
3.6.8	Evaluación económica	130
3.6.9	Análisis de sensibilidad	131
3.6.9.1	Precio de kWh	131
3.6.9.2	Sin impuestos de conexión a la red	132
3.6.9.3	Precio de kWh y sin impuestos de conexión a la red	132
3.6.9.4	Aumento en la energía consumida.	133
	Tabla 3.34. Sensibilidad en el aumento en la energía consumida	133
3.6.9.5	Inversión	133
3.6.9.6	Precio digestato	134
3.6.10	Impacto ambiental	135
4.	CONCLUSIONES	141
5.	BIBLIOGRAFIA	145
	ANEXOS	161

Índice de Figuras

Fig. 1.1. Incremento de la temperatura desde 1850-2010.....	3
Fig. 1.2. % de contribución de los principales países productores de ganado (2015)....	4
Fig. 1.3. Principales países productores de ganado porcino (2015)	5
Fig. 1.4. Equivalencia del biogás con otras fuentes de energía.....	7
Fig. 1.5. Tipos de Biogás en España (EUROSERVE, 2014).....	8
Fig. 1.6. Tipos de Biogás en U.E. (EUROSERVE 2014).....	9
Fig. 1.7. Plantas de Biogás en Europa (2015).....	9
Fig. 1.8 Número de plantas de biogás y capacidad instalada total en Europa (2010-2014).	10
Fig. 1.9. Etapas del proceso de DA.....	12
Fig. 1.10 Esquema de una planta de biogás	24
Fig. 1.11. Curva de crecimiento de un cultivo bacteriano	25
Fig. 1.12. Requerimientos de purificación	29
Fig. 1.13. Planta de chumbera.	36
Fig. 1.14. Porcentaje de distribución de chumbera por comunidad autónoma.	37
Fig. 1.15. Cladodios de chumbera.	38
Fig. 1.16. Flor de la chumbera	38
Fig. 1.17. Fruto de la chumbera	39
Fig. 1.18. Relación entre la inversión unitaria por unidad de potencia eléctrica	54
Fig. 2.1. Palas de chumberas trituradas.....	63
Fig. 2.2 Recolección del purín.....	64
Fig. 2.3. Digestor anaerobio Lehman Maschinenbau	65
Fig. 2.4. Tapas de entrada y salida y recolección del biogás del digestor.	66
Fig. 2.5. Hélices de agitación del digestor.....	66
Fig. 2.6. Columnas invertidas para la medición del biogás.....	67
Fig. 2.7. Analizador de gases manual	67
Fig. 2.8. Extracción de mezcla	68
Fig. 3.1. Producción acumulada de metano en el ensayo batch 1	77
Fig. 3.2. % de metano durante el ensayo batch 1	78
Fig. 3.3 Rendimientos de Biogás y metano en el ensayo batch 1	78
Fig. 3.4. Efecto del incremento de la relación C/N en los rendimientos de metano en el ensayo batch 1	80
Fig. 3.5. Evolución del pH en el ensayo batch 1.....	80
Fig. 3.6. Potencial rédox en el experimento batch 1.....	81

Fig. 3.7. Variación de ST en el ensayo batch 1	82
Fig. 3.8. Valores iniciales y finales de los ST en el ensayo batch 1.....	82
Fig. 3.9. Valores iniciales y finales de los SV en el ensayo batch 1.....	83
Fig. 3.10. Valores iniciales y finales de la DQO _T en el ensayo batch 1	84
Fig. 3.11. Comparativa de los volúmenes de metano acumulado máximos en cada uno de los experimentos realizados en batch 1 y control.....	85
Fig. 3.12. Ajuste cinético de primer orden aplicado al volumen de metano producido en un experimento con una proporción de un 5% de chumbera.	86
Fig. 3.13. Ajuste cinético de primer orden aplicado al volumen de metano producido en un experimento con una proporción de un 7.5% de chumbera.	86
Fig. 3.14. Ajuste cinético de primer orden aplicado al volumen de metano producido en un experimento con una proporción de un 10% de chumbera.	87
Fig. 3.15. Producción acumulada de metano en el ensayo batch 2.....	89
Fig. 3.16. % de metano durante el ensayo batch 2	90
Fig. 3.17. Rendimientos de biogás y metano en el ensayo batch 2.....	90
Fig. 3.18. Efecto del incremento de la relación C/N en los rendimientos de metano en el ensayo batch 2.....	91
Fig. 3.19. Evolución del pH en el ensayo batch 2.....	92
Fig. 3.20. Evolución del potencial rédox en el experimento batch 2	92
Fig. 3.21. Valores iniciales y finales de los ST en el ensayo batch 2.....	94
Fig. 3.22. Valores iniciales y finales de los SV en el ensayo batch 2.....	94
Fig. 3.23. Valores iniciales y finales de la DQO _T	95
Fig. 3.24. Comparativa de los volúmenes de metano acumulado máximos en cada uno de los experimentos realizados en batch 2	96
Fig. 3.25. Ajuste cinético de primer orden aplicado al volumen de metano producido en un experimento con una proporción de un 15% CH.....	97
Fig. 3.26. Ajuste cinético de primer orden aplicado al volumen de metano producido en un experimento con una proporción de un 30% CH.....	97
Fig. 3.27. Ajuste cinético de primer orden aplicado al volumen de metano producido en un experimento con una proporción de un 50% CH.....	98
Fig. 3.28. Producción de biogás y metano en el ensayo batch 3.....	100
Fig. 3.29. Producción acumulada de metano en el ensayo batch 3.....	100
Fig. 3.30. % de metano durante el ensayo batch 3	101
Fig. 3.31. Evolución del pH y el potencial rédox.....	101
Fig. 3.32. Evolución de los SV y ST del ensayo batch 3	102
Fig. 3.33. Evolución de la DQO _T del ensayo batch 3.....	102
Fig. 3.34. Producción de biogás y metano en el ensayo semicontinuo (1)	103

Fig. 3.35. % de metano en el ensayo en semicontinuo (1)	104
Fig. 3.36. Evolución de la DQO _T en el ensayo semicontinuo (1)	105
Fig. 3.37. Evolución de los ST en el ensayo semicontinuo (1)	106
Fig. 3.38. Evolución de los SV en el ensayo semicontinuo (1)	106
Fig. 3.39. Evolución del pH en el ensayo semicontinuo (1)	107
Fig. 3.40. Evolución del potencial rédox en el ensayo semicontinuo (1).....	107
Fig. 3.41. Producción de biogás y metano en el ensayo semicontinuo (2)	108
Fig. 3.42. Producción acumulada de CH ₄ en los experimentos semicontinuo (1) y (2)	109
Fig. 3.43. %de metano en el ensayo semicontinuo (2).....	109
Fig. 3.44. Evolución de la DQO _T en el ensayo semicontinuo (2)	110
Fig. 3.45. Evolución de los ST en el ensayo semicontinuo (2)	110
Fig. 3.46. Evolución de los SV en el ensayo semicontinuo (2)	111
Fig. 3.47. Evolución del pH en el ensayo semicontinuo (2)	111
Fig. 3.48. Evolución del potencial rédox en el ensayo semicontinuo (2).....	112
Fig. 3.49. Producción media diaria de metano durante el ensayo en semicontinuo (3)	113
Fig. 3.50. % de metano en el ensayo en semicontinuo (3).....	113
Fig. 3.51. Producción acumulada de metano en el ensayo semicontinuo (3).....	114
Fig. 3.52. Rendimiento de metano a diferentes VCO en el ensayo semicontinuo (3)	115
Fig. 3.53. Evolución de la DQOT en el ensayo en semicontinuo (3).....	116
Fig. 3.54. Evolución de los ST en el ensayo semicontinuo (3)	116
Fig. 3.55. Evolución de los SV en el ensayo en semicontinuo (3)	117
Fig. 3.56. Evolución del pH en el ensayo semicontinuo (3)	117
Fig. 3.57. Evolución del potencial rédox en el ensayo semicontinuo (3).....	118
Fig. 3.58. Prueba de normalidad (1) para una VCO de 0.71 g SV/Ld en el ensayo semicontinuo (3)	120
Fig. 3.59. Prueba de normalidad (2) para una VCO de 0.71 g SV/Ld en el ensayo semicontinuo (3)	120
Fig. 3.60. Codigestión de sustratos.....	124
Fig. 3.61. Digestores de mezcla completa	125

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Composición del Biogás (MARM, 2010).....	6
Tabla 1.2. Producción de biogás para diferentes sustratos orgánicos.....	17
Tabla 1.3. Concentración inhibidora de sustancias en un proceso anaerobio	22
Tabla 1.4. Composición de Biogás.....	28
Tabla 1.5. Tecnologías utilizadas para la valorización del biogás	33
Tabla 1.6. Comparación de las características de los motores de cogeneración con las microturbinas	34
Tabla 1.7. Composición química de los cladodios de distintas edades (% materia seca)	40
Tabla 1.8. Producción teórica de biomasa bajo diferentes condiciones de suelo	42
Tabla 1.9. Composición de materia fresca de purines de cerdo.....	48
Tabla 3.1. Caracterización de los sustratos utilizados.....	75
Tabla 3.2. Resultados de la codigestión batch 1	76
Tabla 3.3. Evolución de los ST en el ensayo batch 1	81
Tabla 3.4. Evolución de los SV en el ensayo batch 1.....	82
Tabla 3.5. Evolución de la DQO _T en el ensayo batch 1	83
Tabla 3.6. Resultados de la codigestión en el ensayo batch 2	88
Tabla 3.7. Evolución de los ST en el ensayo batch 2.....	93
Tabla 3.8. Evolución de los SV en el ensayo batch 2.....	93
Tabla 3.9. Evolución de la DQO _T en el ensayo batch 2.....	95
Tabla 3.10. Constantes cinéticas obtenidas en todos los experimentos batch.	98
Tabla 3.11. Resultados del batch 3.....	99
Tabla 3.12. Resumen de las producciones de biogás y metano	104
Tabla 3.13. Rendimiento de biogás y metano en el ensayo semicontinuo (3)	114
Tabla 3.14. Análisis del digestato.....	118
Tabla 3.15. Estadístico de prueba.....	119
Tabla 3.16. Estadístico de prueba.....	121
Tabla 3.17. Resultados del Purín en semicontinuo (4).....	122
Tabla 3.18. Producción de purines del ganado porcino	123
Tabla 3.19. Potencia eléctrica instalada.....	126
Tabla 3.20. Disponibilidad de energía.....	126
Tabla 3.21. Energía consumida en la granja y coste por kWh.....	127
Tabla 3.22. Energía disponible después del autoconsumo de la planta	127
Tabla 3.23. Presupuestos de inversión	127
Tabla 3.24. Reducción de CO ₂ por emisión de CH ₄	128

Tabla 3.25. Incremento por valorización energética en el biogás.....	128
Tabla 3.26. Incremento de CO ₂ , por valorización energética de CH ₄	128
Tabla 3.27. Producción de digestato.....	129
Tabla 3.28. Costes de operación	129
Tabla 3.29. Ingresos de la planta.....	130
Tabla 3.30. Resumen de los indicadores	130
Tabla 3.31. Sensibilidad al precio del kWh.....	131
Tabla 3.32. Sensibilidad al impuesto de conexión.....	132
Tabla 3.33. Sensibilidad variación del precio del kWh y al impuesto de conexión.....	132
Tabla 3.34. Sensibilidad en el aumento en la energía consumida.....	133
Tabla 3.35. Sensibilidad en la inversión	133
Tabla 3.36. Sensibilidad al precio del digestato	134
Tabla 3.37. Matriz de Leopold: Evaluación de impactos	136
Tabla 3.38. Análisis de la alteración atmosférica	137
Tabla 3.39. Análisis del medio socio-económico.....	138
Tabla 3.40. Análisis del impacto en los suelos.....	139

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El cambio climático es actualmente uno de los graves problemas ambientales a nivel mundial (Zamasiya, et al 2017), se produce principalmente por el incremento del efecto invernadero sobre la tierra, y es causado por una serie de componentes gaseosos presentes en la atmósfera principalmente el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido de nitrógeno (N_2O). El cambio climático está formado por interacciones entre procesos climáticos, ambientales, económicos, sociales y tecnológicos (Vavrus, et al., 2008), un aumento en la temperatura terrestre comenzó a evidenciarse por las múltiples actividades humanas, que son diferentes en cada país y que dependen de su nivel de desarrollo (Nannos et al, 2013). La Figura 1.1. muestra que las últimas tres décadas ha habido un aumento en la temperatura (IPCC, 2014).

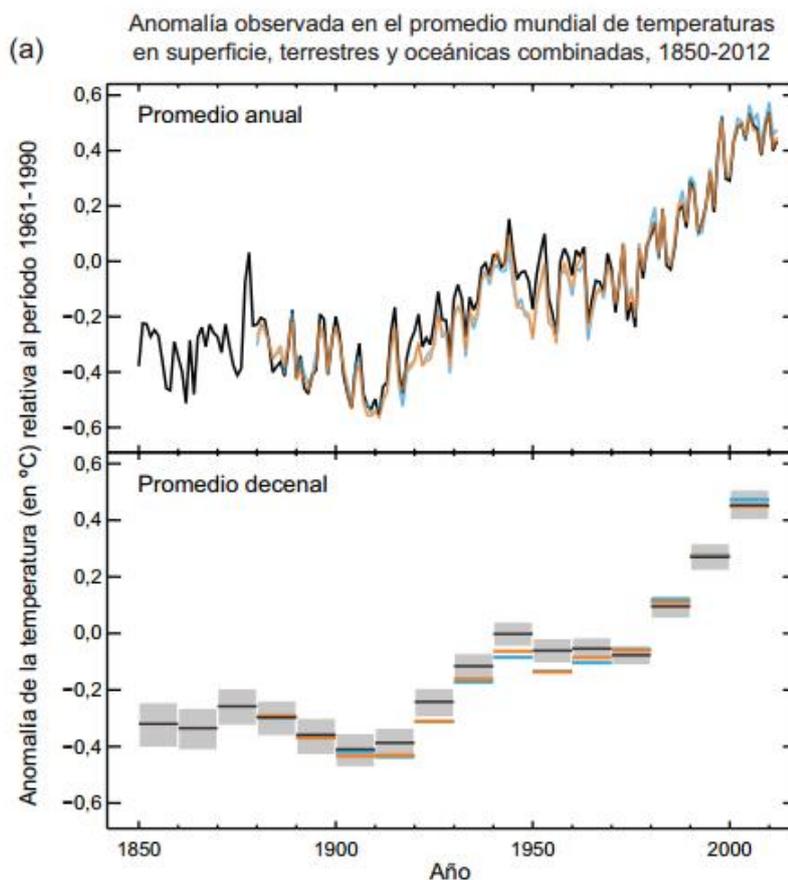


Fig. 1.1. Incremento de la temperatura desde 1850-2010.

Algunos de los sectores que influyen desfavorablemente en el cambio climático se encuentra la agricultura (Mehedi et al, 2017), la ganadería intensiva, algunos de los

1. Introducción

subproductos y residuos que generan emiten gases de efecto invernadero como: (CH₄), (CO₂), (N₂O), (Arthur y Baidoo 2011).

En el 2015, la mayoría de las producciones ganaderas de los 28 países que conformaban la Unión Europea (EU-28) se concentraban en Francia, Alemania, España y el Reino Unido (EUROSTAT, 2015), ver Figura 1.2.

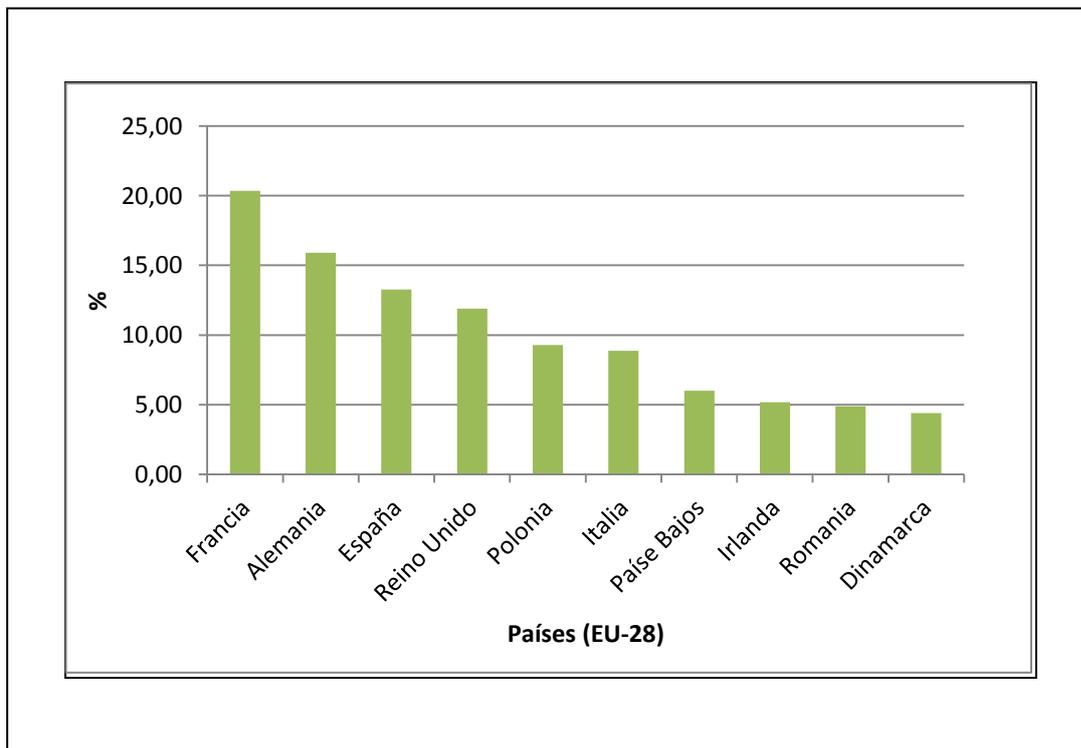


Fig. 1.2. % de contribución de los principales países productores de ganado (2015)

El primer sector de la ganadería española es el sector porcino, situándose en el segundo lugar de la UE-28, después de Alemania (EUROSTAT, 2015) como se muestra en la Figura 1.3.

Estas grandes producciones de porcino producen entre 40-50 millones de toneladas de purines por año. Los purines son las excretas sólidas y líquidas del ganado porcino mezcladas con aguas de lluvia, de limpieza, de los abrevaderos, y residuos de alimentos y piensos.

El uso más adecuado de estos purines es en la fertilización de tierras de cultivos, pero el problema aparece cuando excede la capacidad autodepurativa de los suelos (Bian et al, 2014), originando acumulación de sales y metales pesados.

1. Introducción

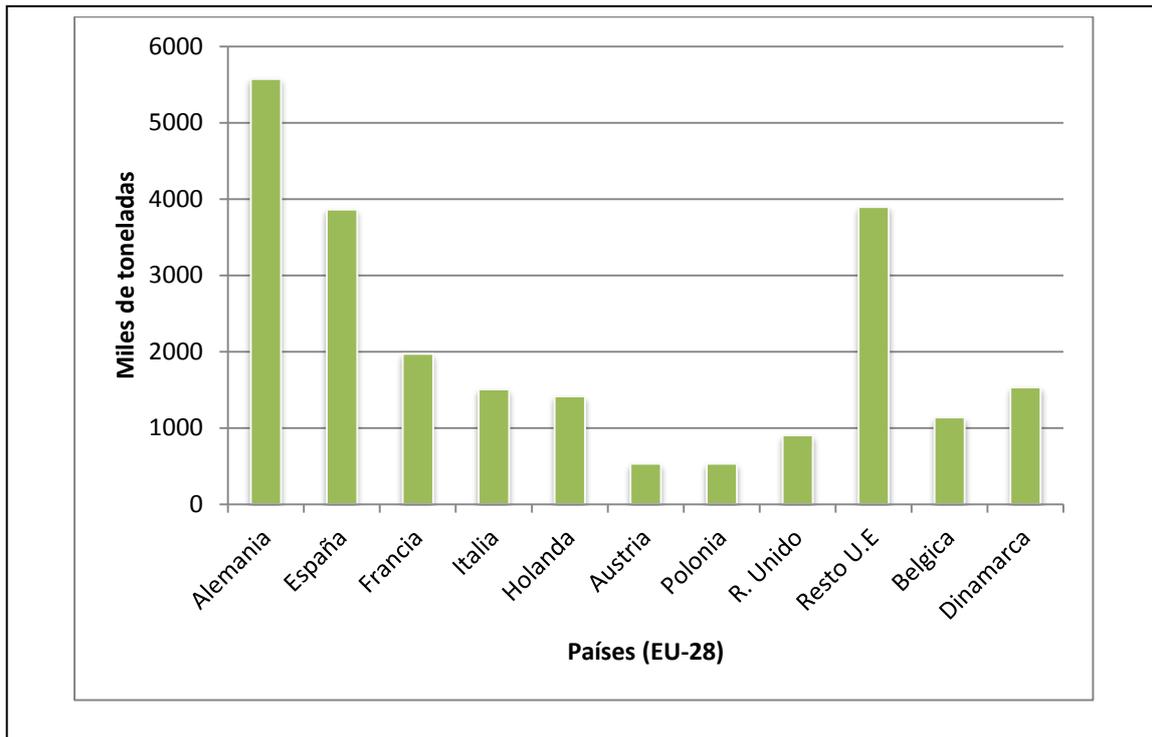


Fig. 1.3. Principales países productores de ganado porcino (2015)

Los purines también producen exceso de nitratos que se lixivian hacia los acuíferos. Adicionalmente si se aplican a terrenos con fuertes pendientes topográficas se produce escorrentía superficial que al ser arrastrados a las aguas produce eutrofización, por las grandes cantidades de fósforo.

Otro problema es que constituyen una fuente contaminante de las aguas cuando son vertidos sin ningún tipo de tratamiento a los cauces naturales. Los fuertes olores que emite también afecta la calidad del aire, por la descomposición de la materia orgánica.

Debido a los impactos negativos de los purines en el medio ambiente es necesario un correcto tratamiento y gestión (Astals *et al.*, 2011). Una efectiva tecnología que puede ser utilizada para ello es la digestión anaerobia (DA) (Ahmad *et al.*, 2016).

La DA permite disminuir la cantidad contaminante de materia orgánica, produciendo un material más estable (digestato) que puede ser almacenado y usado cuando se requiera, además de generar energía gaseosa en forma de biogás (Madsen *et al.*, 2011). El biogás está formado por CH_4 y CO_2 y es aprovechable energéticamente si tiene altos porcentajes CH_4 (50%-70%). Por lo tanto el problema que conlleva la gestión de las deyecciones ganaderas debe verse como una oportunidad de generar energía y fertilizante en forma sostenible (Garfi *et al.*, 2016).

1. Introducción

Sin embargo el uso de purines como sustrato de la DA tiene un inconveniente y es su bajo contenido de nutrientes (Feng *et al*, 2011), por lo que los rendimientos en metano suelen ser bajos, por lo tanto para aumentar la productividad de estos procesos se recurre a la adición de otros tipos de sustratos ricos en carbono, normalmente son de origen vegetal, permiten mejorar los rendimientos y ayudan a reducir las concentraciones de sólidos volátiles (Molinuevo-Salces *et al* 2010).

En esta investigación se realizará un análisis socio-ambiental, técnico y económico para evaluar la factibilidad de usar la chumbera [*Opuntias ficus indica (L.) Miller*] y los purines en proyectos de inversión para plantas de biogás agroindustrial a pequeña escala.

1.2 Digestión anaerobia

La DA es la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno y mediante la acción de una serie de bacterias específicas que se descomponen para producir biogás (CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S , etc.) (Lin *et al*, 2013) y digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación.

La composición final de biogás producido depende de los sustratos digeridos, y las condiciones de operación. La Tabla 1.1. muestra la posible composición del biogás.

Tabla 1.1. Composición del Biogás (MARM, 2010).

Compuestos	Porcentaje (%)
Metano, CH_4	50-75
Dióxido de Carbono, CO_2	25-45
Vapor de agua, H_2O	1-2
Monóxido de carbono, CO	0-0,3
Nitrógeno, N_2	1-5
Hidrogeno, H_2	0-3
Sulfuro de Hidrogeno, H_2S	0,1-0,5
Oxígeno, O_2	0,1-1

El poder calorífico del biogás depende del porcentaje de metano que tenga, la equivalencia del biogás con otras fuentes de energía se muestra en la Figura. 1.4. (ALTERCEXA, 2010).

El metano, CH_4 , puede ser expresado por:

1. Introducción

- Cantidad de residuo: $\text{CH}_4/\text{kg-residuo}$.
- Volumen de residuo: $\text{CH}_4/\text{l - residuo}$.
- Por cantidad de SV añadido : $\text{CH}_4/\text{kg-SV}$
- Por DQO añadido: $\text{CH}_4/\text{kg-COD}$.

El volumen es expresado en presión estándar (1 at) y temperatura a 0°C.

El digestato resultante tiene menos contenido en materia orgánica, porque parte de ella se transforma en metano, el nitrógeno orgánico disminuye y el nitrógeno amoniacal aumenta por la mineralización de la materia orgánica.

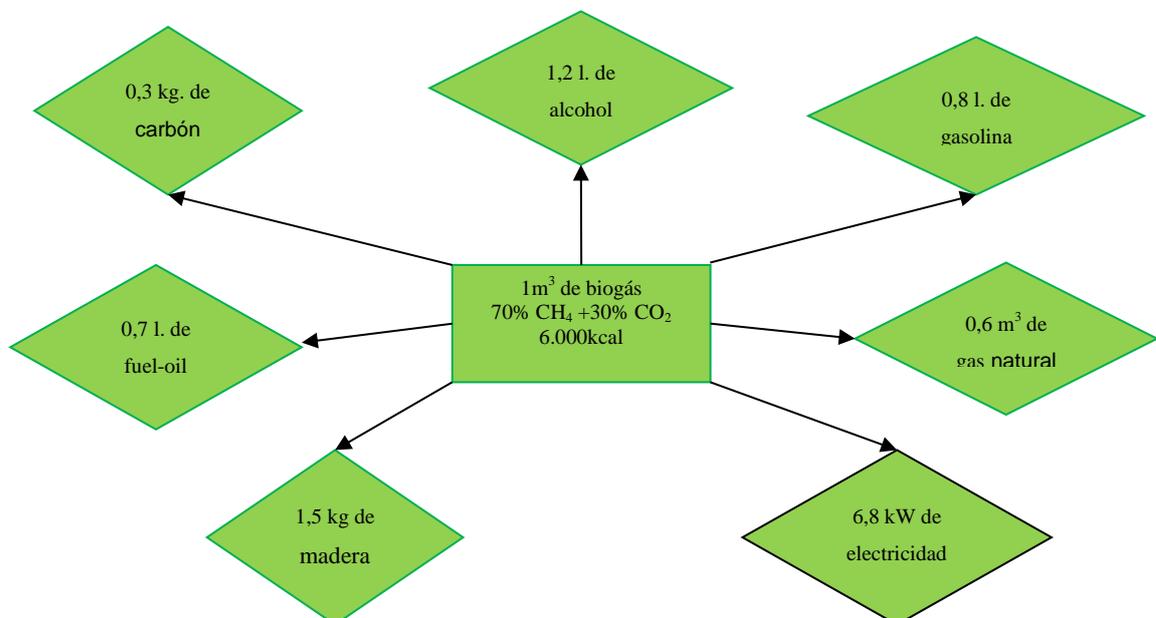


Fig. 1.4. Equivalencia del biogás con otras fuentes de energía

1.2.1 Tipos de Biogás

De acuerdo al tipo de materia orgánica utilizada y las características de las instalaciones de generación-captación, se pueden agrupar en los siguientes grupos (MARM, 2010) : Biogas de vertedero, de depuradora y agroindustrial.

1.2.1.1 Biogás de Vertedero.

Es el biogás que se produce una vez sellados los vertederos de residuos sólidos urbanos (RSU), una parte del metano que se genera puede ser capturado y usado como fuente de energía renovable (Dada & Mbohwa, 2017). El poder calorífico del gas de vertedero es suficientemente alto para permitir su uso como combustible en procesos de combustión, como pueden ser en los motores de combustión interna y en la producción de electricidad (Gewal et al 2012).

1.2.1.2 Biogás procedente de depuradoras.

Es el biogás generado a partir de la DA de los fangos primarios de las plantas de aguas residuales urbanas, constituye además una reducción en los costes del proceso global de depuración.

1.2.1.3 Biogás Agroindustrial.

Cuando los sustratos utilizados para la obtención del biogás son residuos de los sectores agrícolas y ganadero.

También se utilizan cultivos energéticos, como el sorgo, maíz, chumbera, etc.

En España la mayor parte de las instalaciones de biogás pertenecen a vertederos como se muestra en la Figura. 1.5.

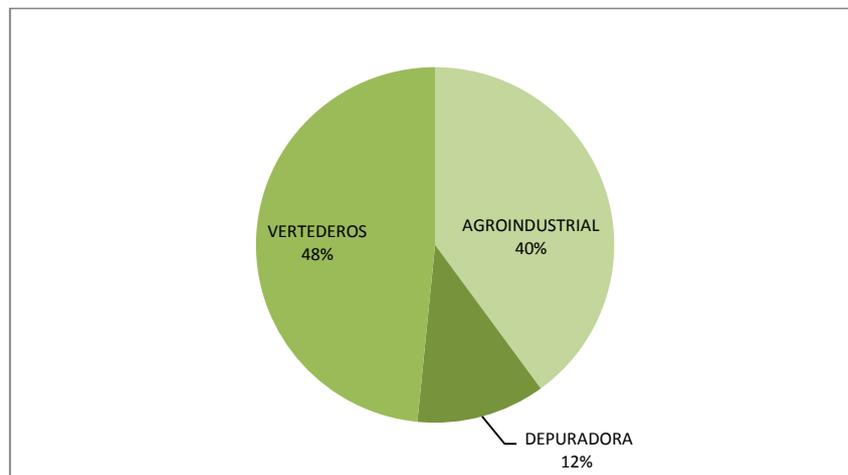


Fig. 1.5. Tipos de Biogás en España (EUROBSERVE, 2014)

Por el contrario en la unión europea las instalaciones de biogás agroindustrial representan la mayoría de las instalaciones, ver Figura.1.6.

1. Introducción

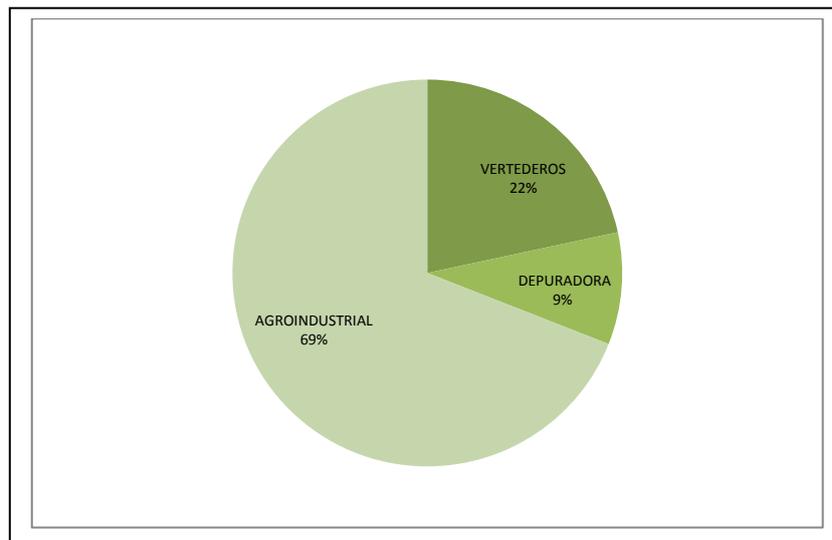


Fig. 1.6. Tipos de Biogás en U.E. (EUROBSERVE 2014)

Según (European Biogas Association EBA, 2016) hay 17.376 plantas de biogás con una capacidad eléctrica instalada de 60.6 TWh. La Figura. 1.7 muestra la distribución para algunos países.

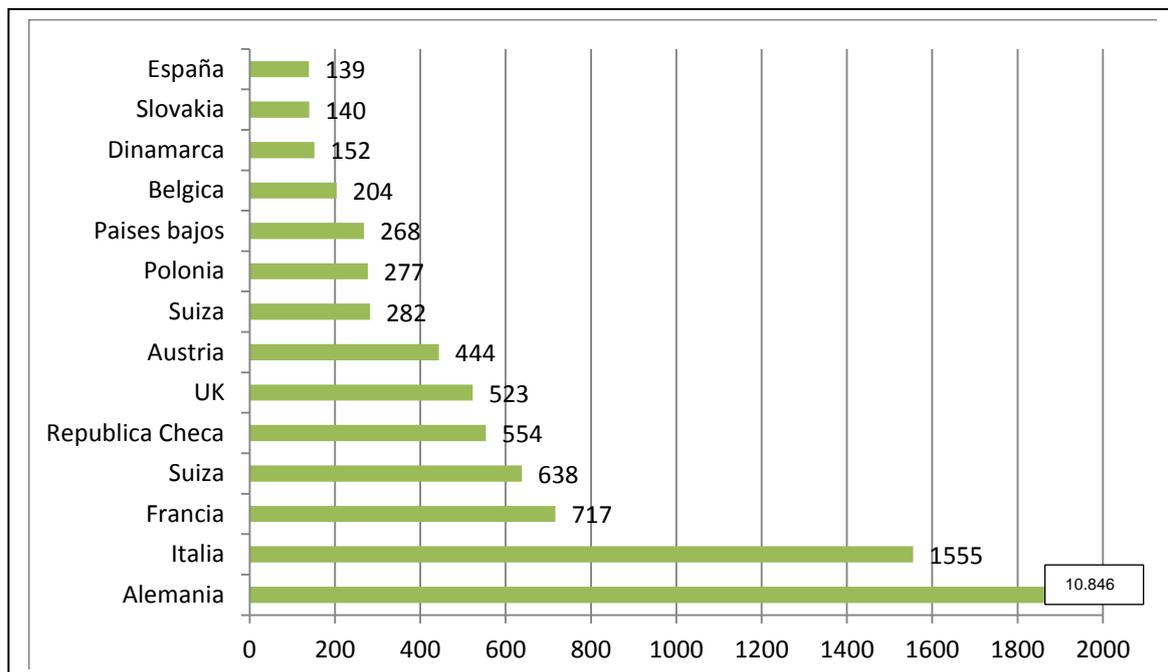


Fig. 1.7. Plantas de Biogás en Europa (2015)

Como se observa en la figura 1.7. Alemania es el líder con mucha ventaja sobre los demás países de Europa, con 10.846 plantas de biogás. España por el contrario cuenta con solo 139 plantas, bajo este panorama se espera que en un futuro se den las condiciones propicias para que España desarrolle el sector de biogás con las

1. Introducción

ventajas que ello conlleva: independencia energética, disponer de energía renovable, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, desarrollo rural, incremento en la generación de empleo, obtención de un excelente fertilizador, reducción de olores e insectos, a la vez que se gestiona en forma adecuada gran parte de los residuos de la agroindustria.

Existe una tendencia creciente en Europa en cuanto al número de plantas y producción, con respecto al 2014 se obtuvo un crecimiento del 3% (EBA, 2016).

La capacidad instalada hasta el 2014 se muestra en la Fig. 1.8 (EBA, 2015).

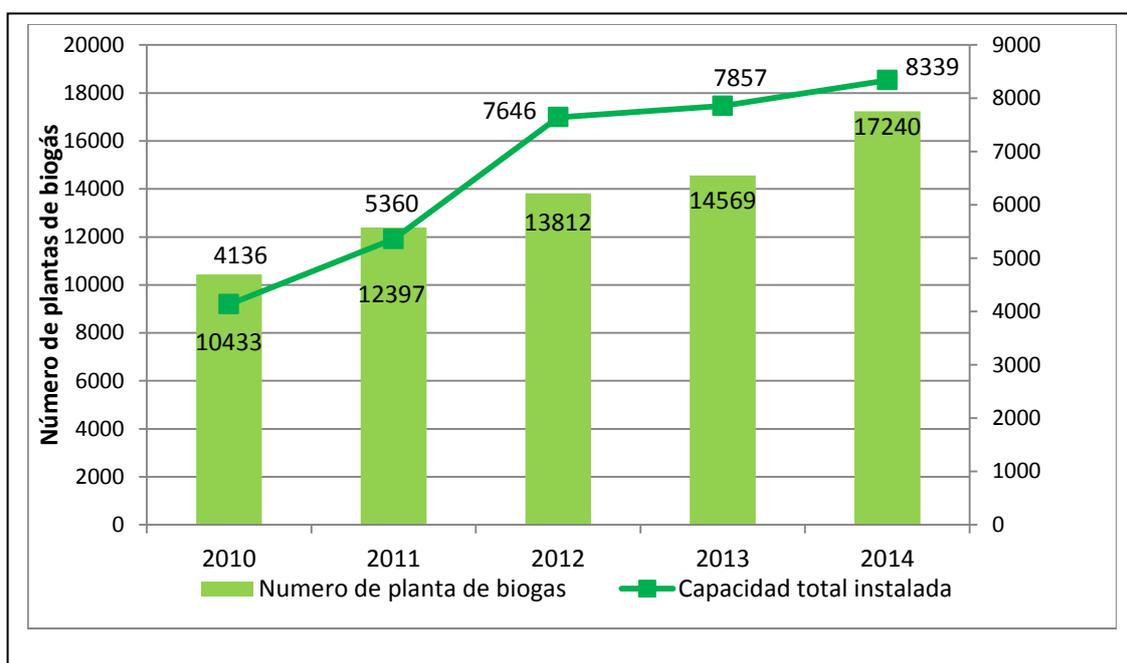


Fig. 1.8 Número de plantas de biogás y capacidad instalada total en Europa (2010- 2014).

1.2.2 Etapas de La Digestión Anaerobia.

La DA es un proceso microbiológico que comprende varias etapas, en la que intervienen una población heterogénea de microorganismos (Yadvika et al, 2004), los cuales van descomponiendo anaeróbicamente la materia orgánica en cuatro fases (Borja & Rincón 2011).

- Hidrólisis
- Etapa acidogénica
- Etapa acetogénica
- Etapa metanogénica

1.2.2.1 Etapa de hidrólisis.

Es el primer paso de la DA, algunos autores consideran que esta es la etapa limitante del proceso (Hendroko et al., 2014). En esta etapa la materia orgánica compleja (polímeros) es descompuesta en unidades más pequeñas, monómeros o fragmentos más sencillos. Durante la hidrólisis los carbohidratos, lípidos, ácidos nucleídos y proteínas son convertidos en glucosa y glicerina. Los polisacáridos son convertidos en monosacáridos (Vavilin et al., 2008). La tasa de hidrolisis aumenta con la temperatura, también le favorece un menor tamaño de partícula, por lo que los tratamientos físico-químicos tienden a acelerar esta etapa.

1.2.2.2 Etapa acidogénica.

Durante la acidogénesis los productos de la etapa anterior son convertidos por bacterias acidogénicas en ácidos grasos de cadena corta (ácidos grasos volátiles), hidrogeno y dióxido de carbono. Los ácidos grasos volátiles son principalmente ácido acético, butírico, propiónico y valérico.

1.2.2.3 Etapa acetogénica.

Mientras que algunos productos de la fermentación (hidrogeno y ácido acético) pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos, los productos intermedios (ácido propionico, butírico, etc) necesitan ser transformados en productos más sencillos, a través de las bacterias acetogénicas. Como principales productos se producen ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, que posteriormente, pueden ser aprovechados por las bacterias metanogénicas (ALTERCEXA, 2010).

1.2.2.4 Etapa metanogénica

Es la etapa final del proceso, las bacterias metanogénicas transforman el ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono en metano y dióxido de carbono. El 70% del metano que se forma es acetato y el 30% restante es la combinación de hidrogeno y dióxido de carbono de acuerdo con la siguiente reacción (Al Seadi *et al*, 2008):

Ácido acético \longrightarrow metano + dióxido de carbono

Hidrogeno + dióxido de carbono \longrightarrow metano + agua

Este es un proceso lento, donde la metanogénesis está influenciada por las condiciones de operación, los rendimientos van a depender del tiempo de retención, la temperatura, el pH, el tipo de digestor y los sustratos utilizados. La Figura 1.9. Muestra la secuencia en el proceso de DA (Appels et al, 2008).

1. Introducción

Es muy probable que cada etapa presente diferentes velocidades de reacción dependiendo del sustrato y de que el proceso global no acumule compuestos intermedios, inhibidores o acumulación de ácidos grasos volátiles. La velocidad del proceso está limitada por la velocidad de la etapa más lenta, la cual depende de la composición de cada residuo. Una forma de aumentar la velocidad es utilizando pretratamientos para disminuir el tamaño de partícula y ayudar a la solubilización, es decir crear mejores condiciones para el crecimiento bacteriano (IDAE, 2007).

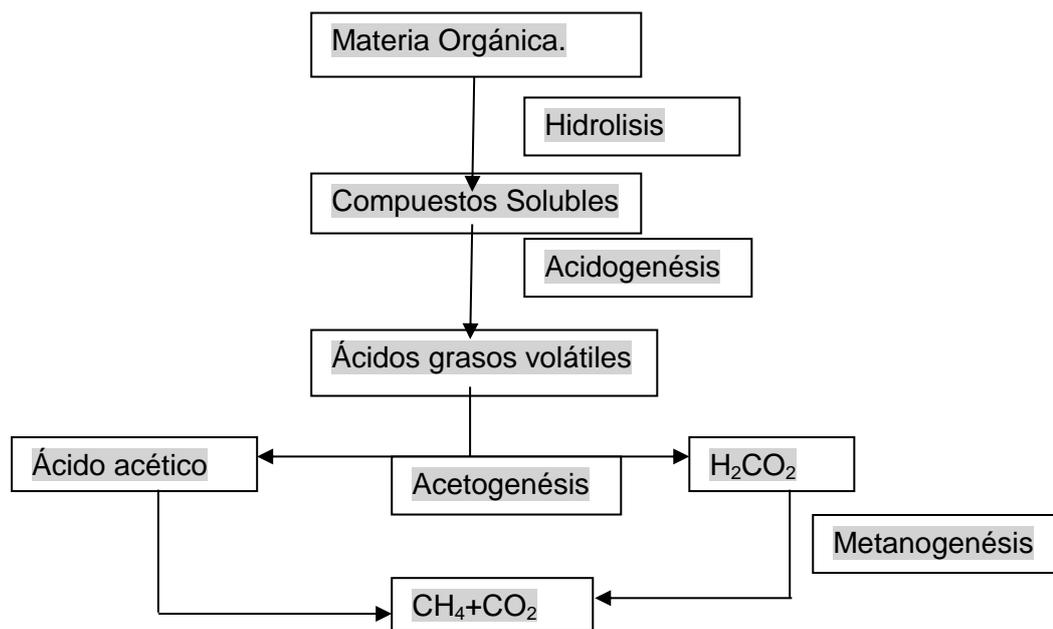


Fig. 1.9. Etapas del proceso de DA

1.2.3 Pretratamientos

Los pretratamientos rompen estructuras orgánicas complejas en moléculas simples que son más susceptibles de la degradación microbiana (Rodríguez *et al*, 2016), en general los pretratamientos mejoran las condiciones de los sustratos, facilitan la liberación del carbono de la materia orgánica, acelerando la solubilización o etapa de hidrólisis (Jeongsik *et al*, 2003), con lo cual facilita el proceso de desarrollo microbiano, (MARM, 2010).

Los tipos de pretratamientos son:

- Mecánicos
- Térmicos
- Biológicos
- Químicos

- Termoquímicos.
- Ultrasonidos.

1.2.3.1 Mecánicos

El principio básico es el de la trituración y homogenización de la mezcla, se logra una reducción del tamaño de partículas y un incremento de la superficie específica disponible para las bacterias (Hendriks & Zeeman, 2009). Las partículas de gran tamaño no favorecen la digestión, al triturarlas aumenta la actividad microbiana y por lo tanto la producción de biogás (Silva et al, 2012). Experimentos realizados con heno por el departamento de agricultura de la universidad de Estonia, muestran que existe una correlación negativa entre los tamaños grandes de partículas y el rendimiento del biogás (Mehind & Normak, 2009)

1.2.3.2 Térmicos

Este tipo de procesos están basados en la higienización de los materiales tratados, con temperaturas comprendidas entre 60°C y 70°C, favoreciendo la etapa de hidrólisis, alterando las estructuras de los compuestos de difícil solubilización facilitando la biodegradabilidad (Cesaro & Velgiorno, 2014). El ejemplo más claro de este tipo de pretratamiento es el de la pasteurización. Se suelen emplear en residuos de matadero y residuos de la industria alimentaria. Otros tipos de pretratamientos, son el tratamiento térmico a altas temperaturas, 133°C, altas presiones y la inyección rápida de vapor, usado fundamentalmente en lodos.

1.2.3.3 Biológicos

Algunos de los tratamientos biológicos más representativos son los tratamientos fúngicos, ensilado y tratamientos enzimáticos, los cuales mejoran la solubilización de la materia orgánica (Fdez-Guelfo et al, 2011).

1.2.3.4 Químicos

Se aplican sobre lodos de depuradoras, residuos de la industria alimentaria y generalmente se adicionan sustancias de origen ácido o bases, que facilitan la destrucción de los compuestos orgánicos (Mace et al, 2001; Ariunbaatar et al, 2014).

1.2.3.5 Termoquímicos

Aumentan considerablemente la biodegradabilidad (Carrère et al, 2010), con estos métodos se regula el pH y la temperatura deseados en la mezcla, y se realizan sobre residuos de paja, lodos de depuración y residuos sólidos urbanos entre otros.

1.2.3.6 Ultrasonidos:

Este pretratamiento no es muy usado, se aplica fundamentalmente sobre lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales industriales, incrementa la degradación de sólidos volátiles y la producción de biogás (Rasapoor et al, 2016).

1.2.4 Parámetros que regulan el proceso de D.A.

El proceso de DA, es un proceso microbiológico que se ve afectado por ciertos parámetros, que son necesarios controlar para mejorar las condiciones del medio y propiciar el crecimiento de los microorganismos, entre ellos se encuentran: los sustratos utilizados, relación carbono/nitrógeno de esos sustratos, porcentaje de sólidos totales y sólidos volátiles, tiempo de retención hidráulico (TRH) y velocidad de carga orgánica, rango de pH y alcalinidad, potencial Rédox, temperatura, agitación y promotores e inhibidores de la fermentación (Ward et al, 2008). A continuación se estudian estos parámetros.

1.2.4.1 Tipos de sustratos

Los sustratos que pueden usarse deben ser líquidos, fermentables y que tengan una composición y concentración estable, normalmente son residuos orgánicos de origen vegetal, animal, agroindustrial y doméstico. Las últimas tendencias es usar cultivos energéticos y algas como sustratos. La biodegradabilidad y la potencialidad del biogás depende del contenido de carbohidratos biodegradables (celulosa, hemicelulosa y lignina), proteínas y lípidos (Angelidaki & Sanders, 2004), No solamente se requieren fuentes de carbono y nitrógeno sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales: azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno y níquel. Por lo tanto es muy importante para mejorar la producción de biogás seleccionar el tipo de sustrato a usar (Ahring, 2003), y realizar combinaciones que optimicen la producción (Buendia et al, 2009).

1. Introducción

➤ Residuos de origen vegetal

Son residuos de la industria agroalimentaria, como excedentes agrícolas, restos de producción de la industria alimentaria, se caracterizan por tener un gran contenido de carbono orgánico, por lo que se obtienen altos rendimientos de biogás.

Entre sus desventajas se encuentra que algunos de estos residuos tienen alto contenido de lignocelulosa, por lo que requieren pretratamientos y altos tiempos de retención hidráulica. Algunas veces promueven la acidificación (Scano et al, 2014) porque tienen un pH ácido, muy por debajo del requerido para una adecuada fermentación anaerobia.

➤ Residuos de origen animal

Entre estos se encuentran los purines, estiércol de vaca, gallinaza, su principal ventaja es su adecuada capacidad tampón que ajusta el pH de la mezcla y su amplia variedad de nutrientes (Palatsi et al, 2009), pero como inconvenientes se tiene su bajo contenido de carbono orgánico, que lo hacen inviable si sólo se utiliza este sustrato en la DA y puede también contener elementos inhibidores como grandes cantidades de Cu, o Zn.

➤ Residuos de la industria alimentaria de origen animal

Son subproductos de origen animal no destinado al consumo humano (SANDACH), son ricos en carbono orgánico y tienen altas relación C/N, algunos requieren de tratamientos a altas temperaturas para cumplir con la legislación en materia de salubridad y los que tienen grandes contenido de grasa requieren largos tiempo de retención.

➤ Residuos de alimentos

Son aquellos provenientes de restaurantes, hoteles, comedores, hogares. Dependiendo de los hábitos alimenticios están compuestos por residuos de arroz, vegetales, huevos y otros componentes. Normalmente estos residuos son llevados a vertederos, se incineran, o se usan para compostaje.

Los sólidos totales (ST), y los sólidos volátiles (SV) de los residuos alimentarios están entre (18,1%–30,9%) y (17,1%–26,35%) respectivamente. La alta cantidad de agua

1. Introducción

(70% -80%) lo hacen un sustrato biodegradable idóneo para la digestión anaerobia (Zhang et al, 2014).

➤ Cultivos.

Cultivos como el maíz y sorgo forrajero, pataca, chumbera y remolacha entre otros son las nuevas tendencias de esta tecnología para usarlos como sustratos y mejorar la DA. En forma general se comportan como los residuos vegetales.

Alemania una vez más tiene el liderazgo en el uso de cultivos energéticos, principalmente el maíz, por sus grandes rendimientos en la producción de metano (Mast et al, 2014) se usa el maíz ensilado. Es normal encontrar grandes plantaciones de maíz en regiones donde hay un gran número de plantas de biogás en conjunción con ganaderías intensivas (Herrmann, 2013).

➤ Algas

Las algas también son usadas como sustrato para la producción de biogás porque tienen alto contenido de carbono que le confiere una alta productividad, al mismo tiempo pueden ser alimentadas por el propio biogás que mejora su calidad al perder parte de su contenido en CO₂. Tienen una ventaja con respecto a otros cultivos, su rápido crecimiento y la posibilidad de reproducirlas en tierras no cultivables y en lagos (Mussnug et al, 2010).

Uno de los principales problemas es su alto contenido en SO₄²⁻ que aumenta la concentración de H₂S en el biogás, favoreciendo la aparición de bacterias sulfato-reductoras que compiten con las metanogénicas y reduce la producción de metano (Cechi et al, 1996) otro problema es el contenido de cationes de Na⁺ y K⁺, conocidos como potentes inhibidores sulfídrico.

Cada vez más se investigan nuevos tipos de algas, algunas de ellas son la *Saccarina latissima*, *Palmaria Palmata*, esta última ha resultado ser un material idóneo para la digestión anaerobia debido a sus altos contenidos de sólidos volátiles y bajo contenido de cationes (Jard et al, 2012).

Valores bibliográficos para diferentes sustratos orgánicos se muestran en la Tabla 1.2 (Flotats, 2010).

1. Introducción

Tabla 1.2. Producción de biogás para diferentes sustratos orgánicos

Tipo	Sólidos Volátiles (%)	Producción de Biogás (m ³ /tonelada)
Intestino + contenidos	15-20	50-70
Residuos mataderos de aves	20-26	100-125
Lodos de flotación	13-18	90-130
Tierras filtrantes de aceites con bentonita	40-45	350-450
Aceites de pescados	80-85	350-600
Suero de leche	7-10	40-55
Suero concentrado	18-22	100-130
Hidrolizados de carne y huesos	10-15	70-100
Harinas de carne	70-75	300-350
Mermeladas	50	300
Aceite de soja/margarinas	90	800-1000
Residuos de bebidas alcohólicas	40	240
Lodos residuales	3-4	17-22
Lodos residuales concentrados	15-20	85-110
Purines de cerdo	2-5	8-18
Purines de Bovino	7-10	20-30
Residuos de cocinas, restaurantes	8-18	80-180
FORM separación mecánica	36-60	100-170
FORM separación en origen	25-50	190-325

1.2.4.2 Relación carbono/nitrógeno.

Las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas son el carbono y el nitrógeno, estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo tanto la relación óptima debe estar entre 30:1 hasta 20:1, algunos autores han encontrado en una relación C/N de 25 como la mejor (Deublein & Steinhauser, 2010).

Los residuos de los animales son ricos en nitrógeno, y los residuos agrícolas son ricos en carbono, uno de los objetivos de la codigestión es mezclar estos tipos de residuos de distintos orígenes que permitan obtener una relación óptima de C/N y mejorar los rendimientos de biogás (Wang *et al*, 2012).

1.2.4.3 Porcentajes de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV)

Los sólidos totales (ST) es la fracción sólida que está contenido en los sustratos. Los valores de referencia de los ST de los sustratos usados en la D.A. varían desde el 2% en adelante. Experimentos realizados con remolacha y estiércol de vaca para

1. Introducción

determinar la mejor concentración de ST, obtuvieron muy buenos rendimientos con 8% de ST (Aboudi et al, 2017).

Los sólidos volátiles es el porcentaje de sólidos totales que se volatilizan a 550°C mediante calcinación en una mufla (APHA, 1995). El método se basa en el hecho de que la mayoría de los materiales orgánicos se incendian y se queman a esta temperatura, mientras que la mayoría de los compuestos inorgánicos requieren temperaturas más altas. Los SV representan la medida de la materia orgánica que se transforma en biogás, por lo tanto una forma de representar la biodegradabilidad de un compuesto, es como porcentaje de los SV eliminados.

1.2.4.4 Tiempo de retención hidráulico (TRH)

En los sistemas tipo Batch es el tiempo que debe permanecer el sustrato en el digestor para alcanzar los niveles de energía o la reducción de carga contaminante que se hayan prefijado. En los digestores continuos y semicontinuos el tiempo de retención se define como el valor en días del cociente entre el volumen del digestor y el volumen de carga diaria. El TRH está íntimamente ligado con dos factores: el tipo de sustrato y la temperatura del mismo. Un bajo THR es deseable para reducir el volumen del digestor y costos de inversión (Schmidt et al, 2014).

1.2.4.5 Velocidad de carga orgánica (VCO)

Es la cantidad de sustrato introducida diariamente en el digestor por unidad de volumen, tiene una relación inversa con el tiempo de retención. Representa la cantidad de SV, alimentada en el digestor por día, en un sistema continuo o semi-continuo. Al incrementar la VCO, se incrementa la producción de biogás, pero no se puede adicionar en grandes cantidades en forma arbitraria porque puede producir cambios en el medio del digestor e inhibir la actividad bacteriana (Mao et al, 2015).

La velocidad de carga orgánica junto con el tiempo de retención determinada por el tipo de sustrato y la temperatura son claves para el diseño del digestor.

La relación costo-beneficio es el factor que finalmente determinará la optimización entre la temperatura y el THR.

En un sistema semi-continuo, el volumen de carga diaria viene dado por la siguiente expresión (Varnero, Manual de Biogas, 2011):

$$\frac{\text{Volumen del digestor}(m^3)}{\text{Tiempo de retención (días)}} = \text{Volumen de carga diaria } m^3/\text{día}$$

1. Introducción

Los rangos de temperatura también afectan a los tiempos de retención, a una mayor temperatura el tiempo de retención es menor, y los volúmenes del digestor también serán menores.

El tipo de sustrato también determina el tiempo de retención, los materiales con mayor proporción de carbono requieren mayor tiempo de retención para ser digeridos.

1.2.4.6 Temperatura

Es uno de los principales parámetros de diseño debido a la influencia en la velocidad de la DA (Arstupho et al, 2016). La selección de una mayor temperatura implicará una disminución en los tiempos de retención requeridos (Cipiti et al, 2016), por lo tanto serán menores los volúmenes de reactor necesario para digerir un determinado volumen de material.

Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos: psicrófilos (por debajo de 25°C), mesófilos (entre 25°C y 45°C) y termófilos (entre 45°C y 65°C) (Gou et al, 2014). Dentro de cada rango pueden establecerse valores o intervalos óptimos por debajo de los cuales la producción de biogás disminuye.

El rango psicrófilico se emplea sólo en el medio rural, no es empleado a escala industrial. Tiene la ventaja de que requiere menos aporte energético. El mesófilico es el más utilizado y el termófilico se usa para conseguir una mayor velocidad del proceso, y un aumento en la eliminación de patógenos, pero suele ser más inestable y presenta mayores problemas de inhibición.

1.2.4.7 Rango de pH y Alcalinidad

Para que las bacterias metanogénicas se desarrollen en condiciones óptimas debe mantenerse el pH cercano a la neutralidad, los mayores rendimientos se obtienen en un intervalo de variaciones entre 6,5 y 7,5 (Liu et al, 2008). Normalmente cuando se trabaja con residuos agropecuarios la dinámica del mismo proceso ajusta el pH.

Cuando el pH es inferior a 6 el gas generado tiene bajos porcentajes de metano, en estos proceso la caída del pH se da por la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV), lo cual se puede solucionar disminuyendo la carga orgánica volumétrica, para que los AGV se consuman más rápido de lo que se generan, también se pueden agregar químicos como bicarbonato de sodio y potasio.

1. Introducción

Para asegurar la capacidad tampón y evitar la acidificación, es recomendable una alcalinidad superior a 1,5 g/l CaCO₃.

Cuando el pH es mayor que 8 favorece la formación del amoníaco, que en elevadas concentraciones inhibe el crecimiento microbiano.

1.2.4.8 Potencial rédox

Uno de los principales factores que controlan la biodegradabilidad es la naturaleza y disponibilidad de electrones aceptores. Desde el punto de vista termodinámico el oxígeno es el receptor de electrones más favorable. En condiciones anóxicas la biodegradación dependerá de la disponibilidad de electrones aceptores como nitrato, sulfato, o dióxido de carbono.

El potencial rédox indica el carácter oxidante o reductor del sistema. Este parámetro debe ser suficientemente bajo para poder asegurar el desarrollo de las poblaciones metanogénicas. Se requiere un potencial rédox entre -220 mV y -350 mV.

La energía liberada en un proceso rédox, como resultado de la transferencia de electrones, se utiliza para el crecimiento de la población microbiana (Angelidaki & Sanders, 2004).

1.2.4.9 Agitación

Con la agitación, se evita formar espacios sin actividad biológica, evita la formación de costra dentro del digestor y se remueven los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas.

En la elección del sistema, frecuencia e intensidad de la agitación se deberá realizar teniendo en cuenta que el proceso fermentativo involucra un equilibrio simbiótico entre varios tipos de bacterias, por lo cual una agitación excesiva causaría una ruptura de ese equilibrio y una reducción en la producción de gas, se debe por lo tanto buscar un punto medio óptimo.

1.2.4.10 Promotores

Los promotores son materiales que promueven la degradación de la materia orgánica. Además de los macronutrientes como el carbono, nitrógeno, fósforo y sulfuro, también se requiere microelementos como el hierro, níquel, cobalto, selenio, molibdeno o tungsteno. Suelen también usarse inoculantes biológicos, provenientes de otro digestor rico en bacterias metanogénicas que se encuentran en plena actividad.

1. Introducción

Los inóculos contienen diferentes microorganismos que ayudan al desarrollo de la degradación, en algunos casos microorganismos adaptados a condiciones específicas, por ejemplo aquellos con bajas concentraciones de amonio pueden ser requeridos (Mahdy et al, 2017).

1.2.4.11 Inhibidores

Los inhibidores impiden la actividad vital de los microorganismos, y desestabilizan el proceso, son sustancias tóxicas que afectan al sistema. Entre ellos se encuentran:

- Altas concentraciones de ácidos grasos volátiles: Los AGV son compuestos intermedios, principalmente ácido acético, propiónico y butírico y en menores cantidades ácidos isobutírico, valérico, isovalérico y caproico. La estabilidad del proceso de digestión anaerobia se puede apreciar a través de la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV). Altas concentraciones de AGV hace que decaiga el pH, se produce inestabilidad al proceso, dando como resultado condiciones tóxicas en el reactor (Frankle-Whittle et al, 2014).
Según (Wanget et al, 2009) las concentraciones de ácido acético y butírico de 2.400 y 1.800 mg/L, respectivamente, no presentan inhibición significativa en las bacterias metanogénicas. Mientras que concentraciones de ácido propiónico de 900 mg/L inhibe el proceso metanogénico.
- La excesiva concentración de amonio: el amonio es esencial para el crecimiento de las bacterias pero en altas concentraciones inhibe el proceso de digestión anaerobia (Bangson & Angelidaki, 2008). El término amonio incluye un ion de amonio ionizado (NH_4^+) y un ion de amonio libre no-ionizado (FA, NH_3) muchas veces expresado como nitrógeno de amonio total (NAT), compuesto de nitrógeno libre de amonio y nitrógeno amoniacal (NH_4^+ -N). El amonio libre ha sido considerado como el principal factor de inhibición durante la digestión de sustratos ricos en nitrógeno (Chen et al, 2008).
- Todo tipo de productos químicos agrícolas: en especial los tóxicos fuertes aún en pequeñas proporciones podrían destruir la DA. En la Tabla 1.3. se muestran valores de concentraciones de algunos inhibidores comunes.

Tabla 1.3. Concentración inhibidora de sustancias en un proceso anaerobio

Inhibidores	Concentración Inhibidora
SO ₄	5000 ppm
NaCl	40000 ppm
NO ₃	0,05 mg/ml
Cu	100 mg/l
Cr	200 mg/l
Ni	200-500 mg/l
CN-	25 mg/l
Na	3500-5500 mg/l
K	2500-4500 mg/l
Ca	2500-4500 mg/l
Mg	1000-1500 mg/l

1.2.5 Tecnología de la digestión anaerobia.

El digestor es muy importante en las plantas de biogás, en él se desarrolla el proceso biodegradativo de la materia orgánica, debe tener un sistema de alimentación para suministrar los sustratos, y una salida para retirar el digestato o materias orgánicas estabilizadas. En la parte superior tiene una cúpula para almacenar el biogás que se genera. Los digestores son de diferentes tipos de materiales, los más comunes son: hormigón, acero o plásticos, y de acuerdo con su forma pueden ser: ovoide, cilíndrica, cúbica o rectangular. El tamaño y el diseño lo determina la cantidad y el tipo de sustrato que se vaya a gestionar, la tasa de carga orgánica y el tiempo de retención hidráulico. Según (United States Environmental Protection Agency [US EPA], 2002), existen dos tipos de digestores: Tipo Batch y continuo.

1.2.5.1 Digestores tipo Batch

También se denominan digestores de primera generación, la carga se efectúa una vez y cuando la digestión es completada, el digestato es removido y se vuelve a repetir el proceso (MARM, 2010).

Estos digestores se diseñan para tratar residuos orgánicos con alto contenido de sólidos, donde los TRH, son muy largos. Son usados en la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU).

Los digestores Batch tienen la ventaja de presentar altos niveles de rendimientos en la producción de biogás, tienen bajos costes de construcción y operación, son fáciles de operar, tienen gran flexibilidad de uso, bajos insumos de operación (Singh &

1. Introducción

Srivastava, 2011), sin embargo para grandes cantidades de volumen se pueden presentar acumulación de costra en la parte superior del digestor por lo que se requiere algún tipo de agitación para mejorar la transferencia de sustrato a los microorganismos y mejorar la degradación anaerobia (Mao et al, 2015).

1.2.5.2 Digestores tipo continuo

Se denominan también digestores de segunda generación, el sustrato puede ser suministrado en forma continua, la producción de biogás y la salida de sustrato es permanente, se cargan generalmente en forma diaria, el volumen que ingresa desplaza una cantidad equivalente de efluente que se evacúa por la salida, de esta forma el volumen de sustrato en la cámara de digestión se mantiene constante. Una variación de estos digestores son los semi-continuos que se cargan y descargan en unos tiempos determinados. Tratan residuos orgánicos semisólidos, especialmente purines y residuos industriales (Mao et al, 2015).

Los digestores continuo pueden ser verticales, horizontales o un sistema de tanques múltiples (Ward et al, 2008) todo dependerá de las necesidades requeridas y el tipo de sustrato a utilizar, pueden ser de mezcla completa (verticales) o de flujo de pistón (horizontales).

➤ **Digestores Verticales**

Este tipo de reactor es de fácil diseño y normalmente se construyen en el sitio donde se usan, se elaboran de hormigón reforzado o acero inoxidable, una de las ventajas es que a costos eficientes las balsas de purines pueden ser convertidas en digestores añadiendo un sistema de aislamiento, calefacción, y un techo de doble membrana para la recolección de biogás. En estos digestores se busca que el sustrato en la fermentación se mezcle en forma completa.

➤ **Digestores horizontales**

Tiene un eje horizontal y una forma cilíndrica, normalmente son manufacturados fuera y transportados a la planta de biogás, por lo tanto son limitados en tamaño y volumen.

El tipo estándar tiene un tanque entre (50 -150) m³, son usados para pequeñas plantas de biogás o para pre-digestión para plantas grandes.

La agitación cuando existe se produce mediante recirculación del biogás o mediante un dispositivo helicoidal.

1. Introducción

➤ Sistema de digestores de tanques múltiples

Son usados para plantas a gran escala y consiste, en múltiples tanques, en los cuales existe un digestor principal, y digestores posteriores a la digestión. Pueden combinar digestores horizontales y verticales. La Figura 1.10 muestra una representación esquemática de una planta de biogás

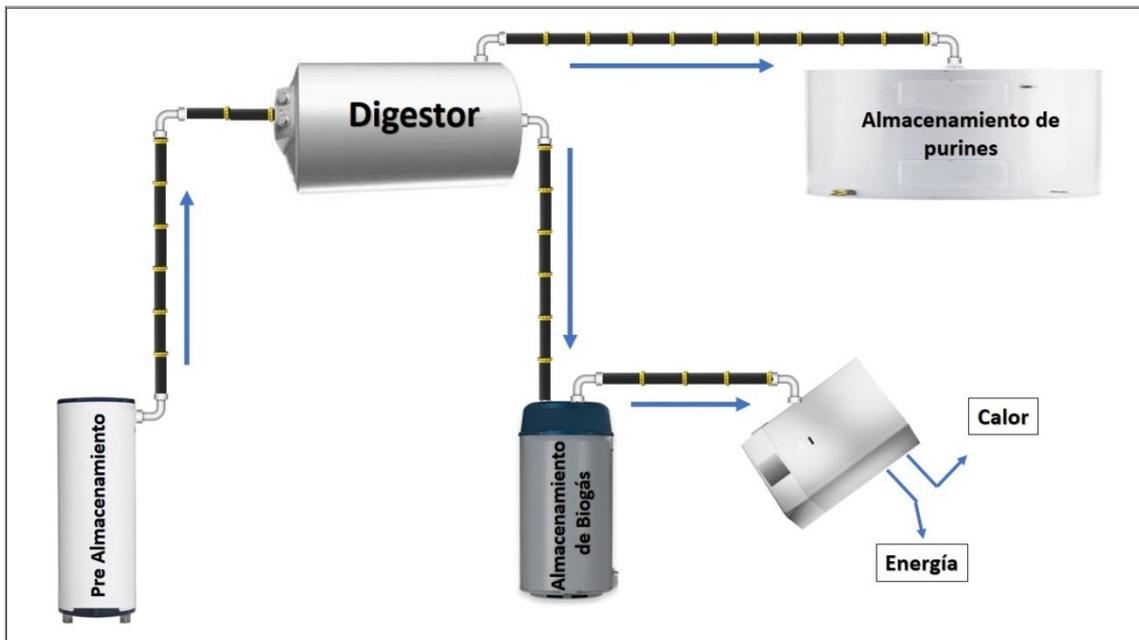


Fig. 1.10 Esquema de una planta de biogás

Además del digestor equipado con agitación, la planta puede incluir pre-almacenamiento para la biomasa fresca, almacenamiento para la digestión de la biomasa y para el biogás y una unidad de cogeneración.

También es usual combinar diferentes tipos de digestor, en lo que se denomina sistema de dos etapas, que consiste en un primer digestor con elevados tiempo de retención, en el cual se favorece la hidrólisis, seguido de un digestor de bajo tiempo de retención que digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la primera etapa (Appels et al, 2008).

1.2.6 Almacenamiento del biogás

Son muchas las formas de almacenamiento que existen, normalmente se almacena en la parte de arriba del digestor con una membrana ajustada (Olugasa et al, 2014), en un digestor aparte o en edificios de almacenamiento si son plantas de grandes superficies. El biogás puede ser operado en baja, media o alta presión. Una elección adecuada de almacenamiento mejora la eficiencia, rentabilidad y seguridad de la

1. Introducción

planta de biogás. Adicionalmente asegura un suministro constante y minimiza las pérdidas de combustible (Al Seadi et al, 2008).

1.2.7 Cinética del proceso

El crecimiento bacteriano sigue desde su arranque la curva típica que se muestra en la Figura 1.11 en la que se distinguen claramente tres etapas: la de arranque (I), estabilización (II) y declinación (III).

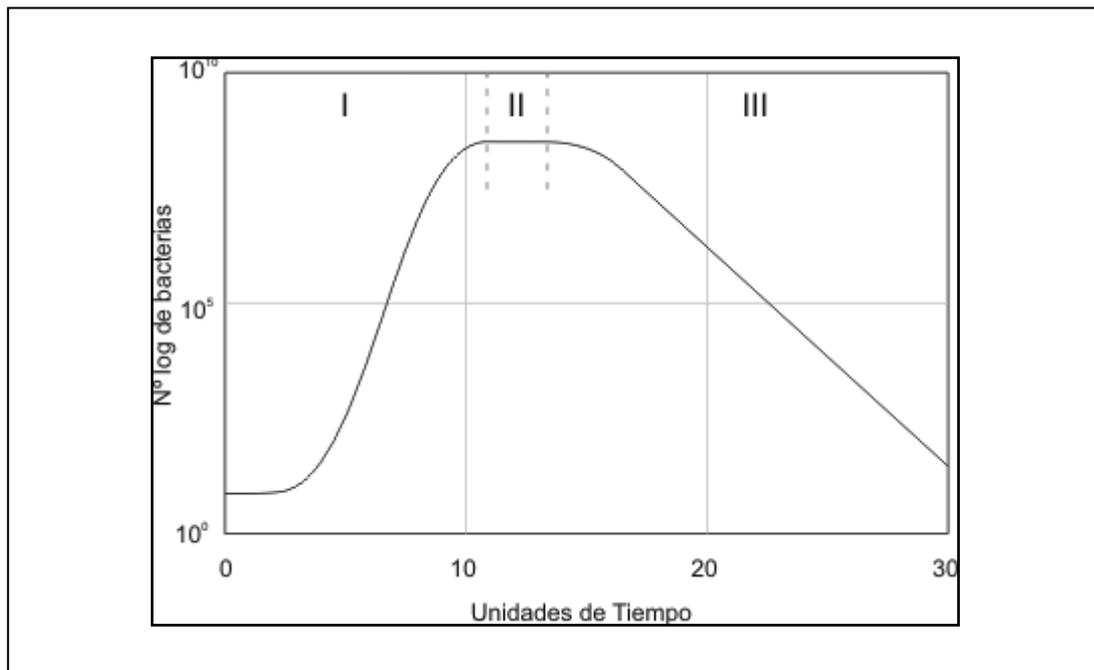


Fig. 1.11. Curva de crecimiento de un cultivo bacteriano

En los procesos de tipo discontinuos la reacción de crecimiento de las bacterias se lleva a cabo de forma similar como se produce una reacción química autocatalítica de primer orden, en la que la velocidad de crecimiento de las bacterias es directamente proporcional al número de bacterias presentes en ese momento mediante la constante de proporcionalidad μ , a la que se denomina “velocidad específica de crecimiento de microorganismos”. La expresión de la velocidad se representa de la siguiente manera:

$$\frac{dN}{dt} = \mu N \quad (1)$$

Siendo N , el número de células/mL, también se puede expresar como masa celular/mL (X) o como la cantidad de cualquier componente celular/mL (Z).

Si se integra la expresión (1) considerando que μ es constante se obtiene la siguiente relación lineal entre el logaritmo del número de células y el tiempo:

1. Introducción

$$\ln X - \ln X_o = \mu(t - t_o) \quad (2)$$

Sin embargo el crecimiento de las poblaciones bacterianas no se desarrolla exponencialmente, ya que pueden estar limitados por otros factores:

- Agotamiento del sustrato
- Agotamiento de nutrientes disponibles
- Acumulación de productos tóxicos.

Por lo tanto la velocidad específica de crecimiento μ puede disminuir y el crecimiento llegar a detenerse.

En la bibliografía se encuentran multitud de modelos cinéticos de primer orden aplicados a la digestión anaerobia. En esta investigación se estudiará la cinética mediante el siguiente modelo que ha sido empleado en estudios similares (Ramos, 2014):

$$G = G_m [1 - e^{-kt}]$$

Donde G es el volumen de metano acumulado (NmL) después de un tiempo t (días); G_m es el volumen máximo de metano (NmL) acumulado en un tiempo de digestión infinito y κ es la constante de velocidad específica de degradación observada para el conjunto de procesos (días⁻¹).

Este modelo define la cinética como de primer orden y describe la producción de metano en un ensayo discontinuo como una curva exponencial. El metano es el principal metabolito producido durante la digestión anaerobia, y por lo tanto puede ser empleado para estudiar la cinética del proceso (Ramos, 2014).

1.2.8 Usos del Biogás

El biogás puede ser utilizado de diversas formas: combustión directa, generación de calor o electricidad, en motores o turbina para generar electricidad, para calentar el digestor, pilas de combustibles, gas natural, combustible de automoción (Olsson & Falde, 2014).

1.2.8.1 Combustión directa.

Es la forma más simple de usar el biogás, en quemadores, para cocinar, es el uso principal de digestores pequeños, bien sea en el sitio donde se produce o transportarlos a otro usuarios a través de tuberías.

1.2.8.2 Producción de calor o vapor

Es otra forma simple de usar el biogás, proporcionar energía calorífica para calentar agua, también se pueden usar para iluminación.

1.2.8.3 Generación de electricidad o combinación de calor y electricidad

Los sistemas combinados de calor y electricidad utilizan la electricidad generada por el combustible y el calor residual que genera. Algunos sistemas combinados producen principalmente calor y la electricidad es secundaria, o viceversa. En ambos casos, se aumenta la eficiencia del proceso en contraste si se utilizara el biogás sólo para producir electricidad o calor.

1.2.8.4 Combustible para vehículo

Se usa para vehículo, pero debe tener, una calidad similar al gas natural. El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto a gasolina como diésel. El gas obtenido por fermentación tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110 lo cual lo hace muy adecuado para motores de alta relación volumétrica de compresión, aunque tiene la desventaja de su baja velocidad de encendido.

Su difusión está limitada por los siguientes inconvenientes:

- Para poder almacenar el gas en contenedores cilíndricos debe ser purificado y comprimido a presiones de 200-300 bar.
- La conversión de los motores es costosa y el peso de los cilindros disminuye la capacidad de carga de los vehículos.
- No hay una red adecuada de abastecimiento.

1.2.9 Purificación del Biogás

La composición del biogás no es pura, contiene partículas y trazas de otros gases, depende de los sustratos que se utilizan, del sistema de digestión, temperatura y tiempo de retención entre otros. La composición media del biogás se muestra en la Tabla 1.4 (Al Seadi et al, 2008).

Tabla 1.4. Composición de Biogás

<i>Compuesto</i>	<i>Contenido (Vol %)</i>
<i>Metano, CH₄</i>	50-75
<i>Dióxido de carbono, CO₂</i>	25-45
<i>Vapor de agua, H₂O</i>	2 (20°C)- 7 (40°C)
<i>Oxígeno, O₂</i>	<2
<i>Nitrógeno N₂</i>	<2
<i>Amoniaco, NH₃</i>	<1
<i>Hidrógeno, H₂</i>	<1
<i>Ácido sulfhídrico, H₂S</i>	<1

Dependiendo del uso final, se requiere una limpieza de las impurezas del biogás, principalmente por dos razones:

- Para aumentar el valor calorífico
- Para cumplir los requerimientos de algunas aplicaciones del gas.

La Figura.1.12 muestra un resumen de la purificación y acondicionamiento del biogás, el tratamiento completo implica que se elimine parte del CO₂, vapor de agua y otros gases traza del biogás, el reformado es la conversión de metano en hidrogeno (Varnero, Manual de Biogas, 2011).

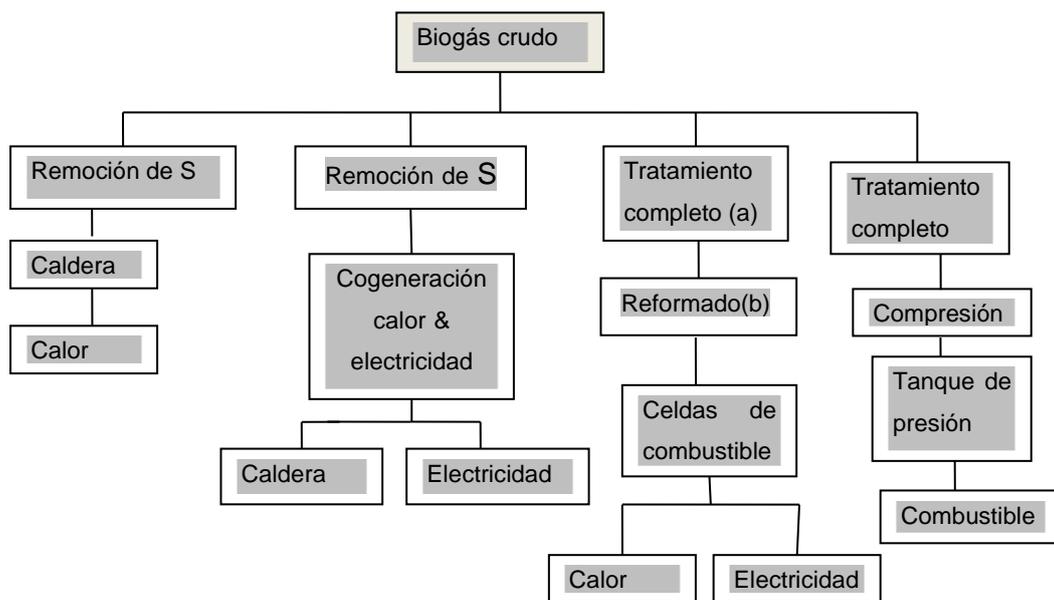
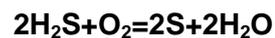


Fig. 1.12. Requerimientos de purificación

1.2.9.1 Método para eliminar el H₂S (desulfuración)

Los métodos para remover el H₂S son los siguientes:

- Microaerofílica: Consiste en la inyección de una pequeña cantidad de aire en proporciones del (2-6) % en el digestor donde se forman las bacterias oxidantes, como resultado se degrada el H₂S dando lugar al azufre elemental (Olugasa et al, 2014).



Este es un método simple, sin costo, no requiere equipos ni productos químicos especiales. Sin embargo hay que tener cuidado en no sobrepasar la cantidad de aire adicionado (6-12%) ya que puede ocasionar explosiones, dependiendo del porcentaje de metano (Wellinge & Linderberg, 1999). Es ideal utilizarlo cuando el contenido de azufre en el biogás es relativamente bajo.

- Adsorción usando óxido de hierro: El H₂S reacciona con óxido de hierro u óxidos para formar sulfuros de hierro. El biogás es pasado a través de virutas de hierro para remover el H₂S. Cuando las virutas son completamente cubiertas con sulfuro éstas son removidas desde el tubo para la regeneración del sulfuro. Este es un método sencillo pero durante la regeneración se libera

1. Introducción

una gran cantidad de calor y genera componentes tóxicos (Temilola et al, 2014).

- Proceso de oxidación en fase líquida: este proceso se usa para el tratamiento de gases que contienen relativamente bajas concentraciones de H_2S . Este puede ser un proceso de absorción físico o químico. En los procesos de absorción físico el H_2S puede ser absorbido por el solvente. Uno de los solventes es el agua, pero el consumo de agua es muy alto para la absorción de pequeñas cantidades de H_2S . Si algunos productos químicos como el NaOH son agregados al agua, el proceso de absorción es mejorado. Esto forma sulfuro de sodio o hidrosulfuro de sodio, que no se regenera y genera residuos líquidos (Temilola et al, 2014). En la absorción química del H_2S los productos químicos usados pueden ser sólidos o líquidos y pueden ser aplicados en torres de contacto batch o pueden inyectarse directamente a la cañería de gas. El subproducto de la reacción es generalmente separado y tratado como desecho. El producto químico es consumido y el absorbente puede ser regenerado.
- Desulfuración biológica externa: Se hace pasar el biogás a través de un biofiltro sobre el que se adhieren las bacterias desulfurizantes; también se elimina NH_3 . Tienen alta capacidad de desulfuración, son métodos económicos y no generan contaminación adicional (Kobayashi et al, 2012).
- Métodos físicos-químicos: Incluyen técnicas basadas en procesos de absorción y adsorción (reactivos y no reactivos), estos métodos son muy rápidos y efectivos, pero son costosos y generan residuos adicionales que dan lugar a otros problemas ambientales (Lin et al, 2013).

1.2.9.2 Métodos para eliminar el vapor de H_2O

Varios métodos son usados para eliminar el agua del biogás:

- Condensación: El gas se pasa a través de unos tubos refrigerantes que condensan el agua y se captura en una trampa (Krich et al, 2005).
- También se puede usar el filtrado de gas o el enfriamiento con agua a una temperatura de $4^{\circ}C$.

1.2.9.3 Métodos para eliminar el CO₂

- Absorción física o química (water scrubbing). Estos métodos se usan en la purificación del biogás ya que son efectivos incluso a bajos caudales. Son métodos sencillos, requieren poca infraestructura y costes bajos. Los más económicos usan agua presurizada como absorbente, el biogás crudo es introducido en el fondo de una columna de lecho empacada y el agua presurizada es rociada desde la cima de la columna. El proceso de absorción es un proceso en contracorriente, de esta forma se disuelve el CO₂ en el agua y salen por el fondo de la columna (Krich et al, 2005). El agua puede ser reciclada a una torre de purificación.

- Absorción química: este método sigue los principios de absorción, el CO₂ es un gas ácido, y forma H₂CO₃ en disolución con agua por lo tanto utilizando bases adecuadas da como resultado una reacción de neutralización ácido-base con ello se absorbe y reduce el contenido de CO₂ en el biogás (Bajracharya et al, 2009). También se suelen usar compuestos como las aminas que tienen una alta tasa de absorción y bajos costos (Goto et al, 2011).

- Adsorción en una superficie sólida: Los procesos de adsorción involucra la transferencia del soluto en la corriente de gas a una superficie de un material sólido, que se concentra como resultados de las fuerzas físicas de Van der Waals.

Los adsorbentes comerciales son generalmente sólidos granulados con una gran superficie por metro cuadrado. A alta temperatura y presión pueden ser usados como adsorbentes, el silicio, alúmina, carbón activado o silicatos, que son también conocidos como tamices moleculares. Este método tiene una alta capacidad para remover la humedad, un diseño simple y es fácil de operar, pero es un proceso costoso (Kapdi et al, 2005).

- Separación por membranas: Este método trabaja sobre el principio que algunos componentes del gas crudo pueden ser transportados a través de una membrana delgada (<1 mm) mientras que otros son retenidos. Este proceso requiere de presión y de una membrana selectiva que permite el paso preferencial de uno de los gases. El transporte de cada componente se debe a la diferencia de presión parcial sobre la membrana y depende ampliamente de

1. Introducción

la permeabilidad del componente en el material de la membrana (Kapdi et al, 2005).

- Separación criogénica: El método criogénico de separación implica la separación de las mezclas de gas por condensaciones fraccionadas y destilaciones a bajas temperaturas. En la separación criogénica, el biogás crudo es comprimido aproximadamente a 80 bar. La compresión se realiza en múltiples etapas. El gas comprimido se seca para evitar que se congele durante el proceso de enfriado. El biogás es enfriado en intercambiadores y el CO₂ condensado es removido en un separador (Kapdi et al, 2005).
- Método de conversión química: Se usa cuando se requiere una alta purificación, reduce la concentración de gas indeseable a niveles trazas. Normalmente este método se usa después de una purificación lograda con otros métodos. Un ejemplo de ello es la metanización que se hace del CO₂ y CH₂, que son catalizados y convertidos en metano y agua. Este proceso es extremadamente costoso y no se justifica en la mayoría de las aplicaciones. Se considera también inadecuado por la gran cantidad de hidrógeno puro que se requiere (Temilola et al, 2014).

1.2.10 Aprovechamiento energético del biogás.

El aprovechamiento del biogás se centra en la generación eléctrica, y para ello el sistema de aprovechamiento más habitual son los motores de cogeneración. Por cogeneración se entiende el sistema de producción conjunta de energía eléctrica y térmica, por lo que tienen una mayor eficiencia energética. La cogeneración se puede llevar a cabo con diferentes sistemas: motores alternativos de combustión interna (MACI), microturbinas, motores Stirling o ciclos Rankine (PROBIOGAS, 2010). Según el rango de potencia, son más adecuadas unas tecnologías u otras (Irruretagoiena & González, 2010).

Según el (IDAE, 2007) la alternativa más económica para el biogás agroindustrial es el motor de combustión interna alternativo (MACI), más competitivo en términos de eficiencia (Tabla 1.5).

Tabla 1.5. Tecnologías utilizadas para la valorización del biogás

<i>Tecnología</i>	<i>MACI</i>	<i>Microturbina</i>	<i>Turbina de gas</i>	<i>Stirling</i>	<i>Pilas de Combustible</i>
<i>Tamaño MW</i>	0.03-6	0.001- 0.4	0.5-30	0,025-0.055	0,1-3
<i>Inversión €/MW (1000)</i>	560- 965	950-1350	325-725	900-1.600	3.200- 4.000
<i>O&M €/MWh</i>	6.2-16	6.4-12	3,,2-8	4 – 6,4	1,5- 2,3
<i>Eficiencia sobre PCI %</i>	30-42	14-30	21-40	30	26 -50

1.2.10.1 Motores de combustión Interna (MACI)

El MACI, utiliza la energía química contenida en el biogás en energía térmica útil y energía mecánica. La energía mecánica, a su vez se utiliza en un rotor que la transforma en energía eléctrica. Los motores de cogeneración producen dos corrientes térmica: una a baja temperatura (80-90 °C) procedente de la refrigeración de la camisa del motor, y otra a alta temperatura (450-500 °C) procedente de los gases de escape del motor. (PROBIOGAS, 2010)

Normalmente el MACI se utiliza con combustibles como el gas natural. Para utilizar biogás es importante reducir la concentración de determinados componentes, principalmente la humedad y el sulfuro de hidrógeno (PROBIOGAS, 2010).

1.2.10.2 Microturbinas

Son una solución para plantas de generación de biogás por debajo de los 600 kWe y caudales de biogás por debajo de los 300 Nm³/h, y con biogás que tenga un contenido de metano de menos del 40% (PROBIOGAS, 2010).

Son equipos muy similares a las turbinas convencionales con potencias comprendidas entre los 30 y 200 kW, cuya modularidad permite la conexión en serie de tantos elementos como sean requeridos. Otra de las características que las hacen muy interesantes para su aplicación es que presentan una tolerancia muy elevada a la presencia de ácido sulfhídrico en el biogás, disminuyendo las necesidades de depuración (Jiménez & González, 2009) y permitiendo reducir costes en los sistemas.

Según (PROBIOGAS, 2010) la principal diferencia entre las microturbinas y las turbinas convencionales es un ciclo de recuperación de calor para mejorar el rendimiento. El resto de diferencia se encuentra en el sistema de transformación de

1. Introducción

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 realiza con electrónica de potencia.

En las aplicaciones de cogeneración, el calor residual de la microturbina se utiliza para producir agua caliente, calefacción, secado de líquidos o incluso puede ser utilizado en equipos de frío por absorción. El aprovechamiento de este calor residual permite mejorar la eficiencia total del sistema. La tabla 1.6. compara las características de los motores de cogeneración con las microturbinas.

Las microturbinas son una tecnología apropiada para la generación de energía eléctrica y térmica con biogás procedente de la digestión anaerobia.

Tabla 1.6. Comparación de las características de los motores de cogeneración con las microturbinas

	Motor Cogeneración	Microturbinas
Modularidad	>600 kW	30-200 kW
Concentración mín CH₄	40%	35%
Concentración máx H₂S	1.750 mg/Nm³	175.000 mg/Nm³
Eficiencia eléctrica	40%	16-33%
Eficiencia térmica	41%	60-50%
Rodamientos	Aceite	Aire no lubricantes
Emisiones	↑CO₂↑NO_x	↓CO₂↓NO_x

1.2.10.3 Turbinas de gas

Un rasgo significativo que las caracteriza es que se adaptan mucho mejor a las características del biogás, pudiendo trabajar con contenidos altos de H₂S y concentraciones bajas de CH₄. Tienen buena relación en potencia, peso y volumen y una buena flexibilidad en su operación.

Adicionalmente tienen una emisión baja de NO_x a la atmósfera y una rápida puesta en marcha, es decir alcanzan en poco tiempo su generación nominal o lo que se conoce como plena carga, lo que las hace muy útil para cubrir picos de consumo. Tienen un mantenimiento sencillo y una elevada fiabilidad.

Su desventaja es la alta velocidad de rotación y su bajo rendimiento (30-35%), por lo que no son una buena elección para las plantas de biogás.

1.2.11 Digestato

El digestato es uno de los productos que se obtiene de la D.A. y es utilizado principalmente como fertilizante. El digestato está compuesto por materia orgánica estabilizada rica en elementos minerales y libres de olores (Holm-Nielsen et al, 2009).

La incorporación del digestato al suelo permite mejorar la estructura de éste, reduciendo los problemas de compactación y susceptibilidad de erosión; además incrementan la capacidad de retención de agua, así como el intercambio gaseoso favoreciendo el desarrollo radical (Varnero, Manual de Biogas, 2011).

Dependiendo de los sustratos usados, el digestato puede presentarse en dos formas: líquida y sólida.

1.2.11.1 Digestato en forma líquida

Normalmente provienen de digestores en continuo, con una alta tasa de carga y un bajo contenido en sólidos totales (<12%). Debido a su estado líquido es difícil su comercialización.

1.2.11.2 Digestato en forma sólida

Proveniente de digestores batch o semicontinuo con un buen poder fertilizante, que luego de ser secado es más fácil su manipulación y logística.

1.3 Sustratos utilizados

A continuación se estudiarán los sustratos usados en la investigación: chumbera y purín.

1.3.1 Chumbera [*Opuntia ficus-indica*(L) Miller].

Comúnmente conocida como nopal, Fig.1.13. La planta toma diferentes nombres de acuerdo al país donde se encuentra, en España se conoce como chumbera, en Italia como “fico de india”, en Estados Unidos y Sudáfrica “prickly pear”, en Francia “figue de barbarie”, en Israel como “sabras”, en Eritrea y Etiopía como “beles”, en la India se le conoce según las lenguas locales como “nagphani”, “andatorra” o “chopathi bali”, en Brasil como “palma forrageira” ya que se cultiva principalmente para la producción de forraje (Stintzing & Carle, 2005).

1. Introducción



Fig. 1.13. Planta de chumbera.

Según (Cronquist, 1981) el esquema de clasificación de la chumbera sería el siguiente:

División: Magnoliophyta
Clase: Magnoliopsida (dicotilodónea)
Subclase: III Caryophyllades
Familia: Cactaceae
Subfamilia: *Opuntioideae*
Género: *Opuntia*
Especie: *O. ficus-indica* (L.) Miller

Es cultivo originario de América tropical y subtropical, se encuentra en las zonas áridas y semiáridas de México, Estados Unidos, Brasil, y en general de toda Sur América. Es una planta que desempeña un papel muy importante en la agricultura de subsistencia de estos países por su capacidad de proporcionar forraje, frutos, verduras y por su uso como planta medicinal. Además tiene la ventaja de proteger el suelo y a la biodiversidad animal en las zonas establecidas (Bouzoubaa et al, 2014).

La chumbera fue traída por los conquistadores españoles a Europa y de allí se ha introducido a distintas partes del mundo (Bouzoubaa et al, 2016). En España existen 346 hectáreas (ha) de chumbera (MARM, 2013). La figura 1.14 muestra cómo se encuentra distribuida geográficamente la chumbera en toda España. Su aprovechamiento es principalmente agrícola, para la alimentación humana y para el ganado. De las 346 ha, 64 son ha en regadío y 282 son ha en régimen de secano.

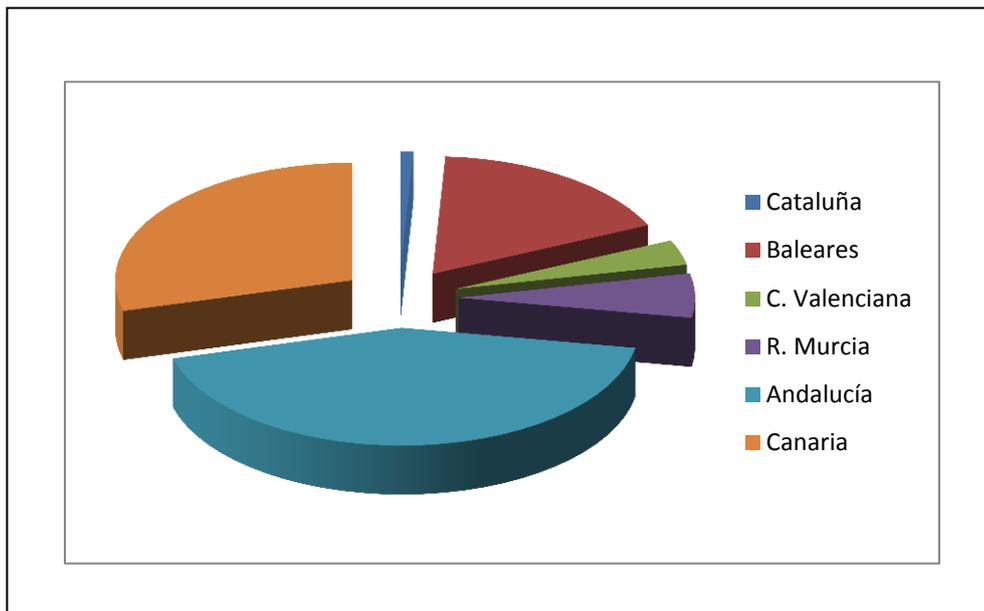


Fig. 1.14. Porcentaje de distribución de chumbera por comunidad autónoma.

1.3.1.1 Descripción Morfológica.

- **Raíces:** El sistema radical de la chumbera es muy extenso y superficial, alcanzando una profundidad cercana a los 80 cm, pero se extiende horizontalmente por varios metros. Es un sistema densamente ramificado, rico en raíces finas, absorbentes y superficiales, sus raíces pueden correr de 4 a 8 m por debajo de la planta madre (Sudzuki, 1999). Las lluvias aisladas favorecen la formación de raíces secundarias para aprovechar el agua disponible. Cuando se inicia la sequía, las raíces comienzan a contraerse de manera radial para disminuir las pérdidas de agua (Nobel, 1999).
- **Tallos:** La chumbera presenta numerosos tallos denominados cladodios, o pencas, tienen forma ovoide, elíptica. Alcanzan una longitud de 33-60 cm y 18-25 cm de ancho, son aplanados con un grosor de 1,8-2.3 cm (ver Figura 1.15). Son de color verde y pueden tener o no espinas dependiendo de la variedad, los cladodios están unidos unos a otros, formando numerosas ramificaciones que pueden llegar a alcanzar una altura de 3 a 5 m. En ellos se realiza la fotosíntesis.

1. Introducción



Fig. 1.15. Cladodios de chumbera.

Además la cutícula es de color blanquecino, lo que permite reflejar gran parte de la radiación, evitando el calentamiento excesivo. Presentan pocos estomas por unidad de superficie, con la particularidad de permanecer cerrados durante el día y abiertos durante la noche, esto evita la pérdida de agua por transpiración durante el día y permite durante las horas nocturnas la entrada de anhídrido carbónico (CO_2), indispensable para la fotosíntesis. Estos tallos presentan además, gran capacidad para almacenar agua, ya que poseen abundante parénquima, en este tejido se almacena agua, que le permite a la planta soportar largos periodos de sequía (Saenz et al, 2006).

- **Flores:** Son hermafroditas, solitarias y sésiles, presentan una longitud de 6 a 7 cm (ver Fig. 1.16.).



Fig. 1.16. Flor de la chumbera

Las flores se desarrollan en la superficie de los cladodios. Sus pétalos son de colores vivos: amarillo, anaranjado, rojo, rosa, blancas entre otros colores

1. Introducción

mientras que los sépalos son de color amarillo claro o rojizo blanco, puede haber hasta 25 flores por cladodios, y aparecen después de los seis meses.

- **Frutos:** la forma y el tamaño de los frutos son variables aunque en promedio presentan de 7-8 cm de largo, 5-6 cm de diámetro y de 8-14 g de peso, la piel de los frutos es similar a la de los cladodios, la cáscara varía en grosor, siendo la cantidad de pulpa variable según la especie y los colores también son diversos, rojos, anaranjados, púrpura, amarillos y verdes con pulpas en general de los mismos colores. Se pueden apreciar en la Fig. 1.17.



Fig. 1.17. Fruto de la chumbera

1.3.1.2 Composición físico-química.

Se estudiará la composición físico-química de los cladodios, que es la parte de la chumbera con que se realizó este proyecto.

La composición de los cladodios tiene interés desde el punto de vista industrial ya que cuando los brotes son tiernos (10-15 cm) se usan para la producción de nopalitas y cuando están totalmente lignificado (2 a 3 años), para la producción de harinas y otros productos. En la Tabla 1.7 se observa la variación de la composición química de los cladodios de distintas edades (Saenz et al, 2006).

Tabla 1.7. Composición química de los cladodios de distintas edades (% materia seca)

Edad	Descripción	Proteína	Grasa	Cenizas	Fibra cruda	Extracto no nitrogenado
0.5	Nopalitos	9,4	1,00	21,0	8,0	60,6
1	Pencas	5,4	1,29	18,2	12,0	63,1
2	Pencas	4,2	1,40	13,2	14,5	66,7
3	Pencas	3,7	1,33	14,2	17,0	63,7
4	Pencas	2,5	1,67	14,4	17,5	63,9

1.3.1.3 Requerimientos del cultivo.

➤ Clima:

La chumbera se desarrolla en distintos ambientes, desde zonas áridas al nivel del mar hasta territorio de gran altura como los Andes del Perú; desde regiones tropicales de México a áreas de Canadá que en el invierno llegan a -40°C , por lo que se considera una especie de interés para zonas ecológicas muy diversas (Nobel, 1999).

➤ Suelos

Se desarrolla en suelos pobres, aunque su máxima producción se obtiene en suelos arenosos-calcáreos, sueltos, fértiles, poco profundos, bien drenados, con pH neutro o de preferencia alcalino. No es conveniente su cultivo en suelos muy húmedos ni poco arcillosos (Sosa & Garcia, 1997).

➤ Agua

Especie muy resistente a veranos prolongados y a épocas de sequía extrema, las necesidades de riego se determinan sobre la base de los requerimientos hídricos de cultivo. La chumbera puede cumplir su ciclo anual con 150 mm anuales, siendo la condición óptima desde el punto de vista hídrico de 300 mm anuales. Si el cultivo es para forraje y fruto, la producción va a depender de la cantidad y calidad del riego, normalmente tienden a ubicarse en zonas con 600-800 mm (Saenz et al, 2006).

➤ Fertilizantes.

Debido a la respuesta positiva que se observa, se recomienda la aplicación de abonos orgánicos y fertilizantes químicos. En la producción de nopalito se utilizan grandes cantidades de abono orgánico. En las plantaciones tradicionales se usa abono bovino, cada dos o tres años, algunos productores usan abono químico, de una a tres veces

1. Introducción

por año, tienden a usar urea o sulfato de amonio. En el sistema intensivo, la aplicación de abono se lleva a cabo cada año. Los niveles de estiércol por hectárea varían de 100 a 200 toneladas, aplicándose de 100 a 200 kg de nitrógeno y de 80 a 100 kg de fósforo por hectárea (Rios Ramos & Quintana, 2004). Para usos frutales y tuneros, el fertilizante se aplica abriendo un surco de 5 cm de profundidad, alrededor de la planta. La mejor época para aplicar fertilizantes en cultivos de secano es antes del brotamiento y en cultivos bajo riego es mejor fraccionar las dosis en tres partes a ser aplicadas previo un riego cada tres meses.

➤ **Preparación del suelo**

La chumbera no es exigente en la preparación de suelos, en caso de cultivos tecnificados la preparación del suelo depende de su pendiente y el sistema de plantación a utilizar, que puede ser: curvas de nivel, terrazas, laderas con pendiente suave o terreno plano. Se debe limpiar el terreno de arbustos y hierbas y preparar el suelo con tractor y arado. Los pequeños productores preparan el terreno de forma manual con azadón.

Para el establecimiento de las plantaciones se debe remover la capa inferior del suelo de 25 a 30 cm de profundidad y eliminar plagas que atacan este cultivo (Amaya Robles, 2009).

➤ **Trazado**

Para plantaciones tradicionales o el trazado de camas en la plantación intensiva se realiza con cintas de medir, cordel y estaca. Las pencas deben establecerse con orientación norte-sur ya que se obtiene mayor desarrollo radicular y menor daño por quemaduras del sol (Rios Ramos & Quintana, 2004).

➤ **Densidad de siembra y biomasa**

Según un estudio realizado por Retamal et al. (1987), dependiendo si los suelos son áridos, semiáridos o con regadío, varían las cantidades de plantas a sembrar y la productividad de la biomasa, como se muestra en la Tabla 1.8.

1. Introducción

Tabla 1.8. Producción teórica de biomasa bajo diferentes condiciones de suelo según Retamal et al (1987)

Producción	Suelos Áridos	Suelos Semiáridos	Suelos con regadío
Tamaño (mxm)	4x4	2x2	2x1
Plantas/has	625	2500	5000
Cladodios	2.63	10.5	21
Frutas	0.79	3.15	6.3

➤ Propagación y plantación

Existen dos formas comunes de propagación: por semilla sexual y por estaca.

- **La semilla sexual:** se utiliza en programas de mejoramiento genético, con el objeto de obtener nuevas variedades, la desventaja es que el desarrollo de las plantas es lento en comparación con el de la estaca.
- **La propagación por estaca:** La unidad básica meristemática de la opuntia es la areola que se encuentra ubicada de manera helicoidal en el cladodio y puede originar ramas, flores y raíces. Los cladodios son desprendidos de la planta madre y la zona de corte se cicatriza y se suberiza, cada pieza puede actuar como un propágulo independiente. El cladodio puede sostener la pérdida de agua por un largo tiempo: hasta seis meses sin perder viabilidad, si se le almacena en un sitio sombreado y seco. Este método suele ser simple, se efectúa una vez que se haya seleccionado la variedad adecuada, se debe tener en cuenta que ésta tenga pureza varietal, adaptación a la zona, altos rendimientos, buena calidad, resistencia a enfermedades y factores adversos como heladas, vientos. Es mejor seleccionar las paletas de tamaño mediano a grande que produzcan brotes vigorosos y que competirán mejor con la maleza durante la etapa inicial del establecimiento.

El trabajo del material de propagación debe ser cuidadoso, cortado adecuadamente, las zonas de corte deben ser desinfectadas, las paletas deben ser colocadas en un lugar sombreado durante dos semanas para que cicatrice el corte, evitando así las pudriciones, debe evitarse la exposición directa al sol porque puede provocar quemaduras y deformación de las paletas, si el cladodio se dobla hay que voltearlo.

El uso de paletas individuales se usa cuando existe suficiente material.

1. Introducción

El uso de dos o más paletas para la plantación permite acelerar la formación de la estructura vegetativa de la planta y la producción de frutas, pero se requieren grandes cantidades de pencas, los costos en transporte y mano de obra aumentan y la manipulación del material se hace más complicada.

También se usan fracciones de paleta, que consisten en dividir las paletas en varias partes, dependiendo de su tamaño, las de mayor tamaño permitirán obtener un mayor número de trozos. Este método se usa cuando existe escasez de materia vegetativa o cuando hay grandes distancias entre el vivero y la plantación, con el objetivo de evitar grandes costos de transporte.

➤ Manejo de la plantación.

Se deben realizar podas para facilitar el manejo del cultivo. Se recomienda cuatro tipos de podas:

Podas de formación, se eliminan las pencas que se encuentran juntas, las mal orientadas, las que están hacia abajo.

Poda de sanidad, consiste en eliminar pencas en mal estado, es decir con malformaciones y aquellas dañadas por plagas y enfermedades.

Poda de rejuvenecimiento, llevada a cabo en plantaciones con edades de 10 a 15 años, cortando plantas viejas y dejando exclusivamente los 40 o 45 centímetros inferiores del tronco. Otra alternativa es sustituir la plantación vieja por material vegetativo nuevo.

Poda de estimulación de renuevos, realizada en plantaciones a cielo abierto, donde el productor deja que la planta se llene de renuevos y cuando se considera conveniente se empiezan a cortar todas las pencas quedando únicamente aquellas en las que se espera obtener brotes (Amaya Robles, 2009).

➤ Plagas y enfermedades

El cultivo de la chumbera no presenta plagas de mayor importancia, sin embargo las siguientes son algunas que suelen aparecer:

- **La cochinilla** (*Dactylopius coccus costa*), constituye una plaga benéfica o perjudicial, es un insecto que produce el ácido carmínico, colorante natural usado en la industria de los alimentos, farmacéutica y cosmética, pero si el objetivo es la producción de frutas la cochinilla incide negativamente. Por esta

1. Introducción

razón se recomienda tener plantaciones duales o mixtas, ya que el beneficio de la una, será en perjuicio de la otra (Rios Ramos & Quintana, 2004).

- **La mosca de la fruta** (*Ceratitis capitata*), su infestación causa los mismos efectos que en otros frutales.
- **El gusano de la tierra**, es una larva que se alimenta de las plantas de tunas tiernas y jóvenes causando deformaciones y perforaciones en las mismas, se controla previniendo su ataque mediante aplicaciones de aldrín al momento de su plantación.
- **Gusano cogollero**, es una larva de color verde claro que mide hasta 3 cm de longitud, tiene como hábito alimenticio las paletas tiernas y jóvenes provocando deformaciones de éstas.
- **El gusano minador** (*graciliriadeae*), es una larva pequeña, roja rosada, que vive debajo de la epidermis de las paletas terminales formando galerías.

Con respecto a las enfermedades, por lo general se debe al mal manejo en el corte y al traslado de la penca al plantarlas, al nulo mantenimiento de limpieza de malezas en las huertas, que ocasionan alta humedad en las pencas de las plantas; a encharcamientos de aguas de lluvias que destruyen las raíces de las plantas y a problema de virosis, porque no se tiene la precaución de seleccionar las plantas donadoras idóneas. Según un estudio de Amaya Robles (2009), las siguientes son las más importantes:

- **Roya**, enfermedad cuyo agente causal es el hongo *Acedium sp.* quien ataca a las paletas y los frutos, forma una pústula redonda de color amarillo-naranja que sobresale de la superficie de la paleta, que luego se seca dejando un gran hueco a un lado de la paleta o en ambas caras.
- **Pudrición de la raíz**, inciden en la planta que tiene más de cuatro años, el agente causal parece ser un complejo hongo o bacteria que destruyen la raíz por pudrición y que puede llegar hasta el tallo. El síntoma más evidente es la plasmosis o marchitez (arrugamiento) de las paletas. El control se realiza

1. Introducción

mediante la eliminación de las partes afectadas y luego se aplica ceniza y finalmente se cubre la planta con tierra buena.

- **Cercosporosis**, causada por un hongo del género *Cercospora*, que forma colonias redondeadas y convexas de color gris, de entre 0,5 a 2 cm de diámetro a manera de costras, sobre la epidermis de las paletas en plantaciones jóvenes y enfermas.
- **Lancha** (*Phytophthora cactarum*), este hongo produce la enfermedad conocida como la podredumbre húmeda, ataca la planta cuando tiene una herida o una semilla que no ha sido cicatrizada. No produce males mayores.
- **Podredumbre apical**, Es una enfermedad ocasionada por bacterias del género *Erwinia*, que produce la muerte total de las paletas, se inicia en el ápice y desciende progresivamente hasta su inserción con el tallo. Para prevenirla es necesario evaluar el terreno y descartar los salitrosos, así como también evaluar la calidad del agua evitando aquella con altos contenidos de sales o metales.

1.3.1.4 Usos de la chumbera

La chumbera tiene varios usos: desde el alimenticio hasta la manufactura de diversos productos en medicina, cosmética, y como cultivo agro-energético potencial para la producción de biocombustibles (Do Nascimento et al, 2016).

➤ Alimenticio

Uno de los usos más comunes de la chumbera es su uso como fruto y verdura. El consumo como verdura en México, está ligada a la alimentación tradicional, se preparan diversos platillos: ensaladas, tacos, sopas, guisados, etc., (Saenz et al, 2006).

➤ Forraje

El objetivo principal es servir de alimentación al ganado (Fernández & Saiz, 1990).

1. Introducción

➤ Industrialización.

En México se procesa el nopalito (chumbera joven) enlatado en salmuera y en escabeche.

La tuna (chumbera de más de dos años) se emplea como bebida alcohólica (Bustos, 1981). Una de las bebidas que se prepara es el “colonche” que es obtenido a través de la fermentación del jugo y la pulpa en barriles de madera.

Se usa también en la fabricación de yogurt.

En la utilización de jugos (Espinosa et al,1973), se requiere un control especial del pH y de los tiempos y temperaturas de los tratamientos térmicos, para asegurar la calidad y la conservación. También pueden usarse en concentrados (Saenz, 2000).

Se elaboran tintes, realmente se toma directamente del pequeño gusano que habita en la chumbera, que luego de machacarlo es utilizado como tinte.

En la elaboración de cosméticos: como cremas limpiadoras, cremas humectantes, champú, enjuagues, mascarillas, jabones, tintes para el cabello.

En materiales de construcción, debido a sus propiedades adhesivas de la chumbera se usa en aditivos y pinturas. El polvo que sale de esta planta aumenta la dureza de las estructuras del hormigón.

Uso medicinal, se ha comprobado que el consumo de chumbera controla los niveles de azúcar y colesterol en la sangre, se usa también como fibra para mejorar el proceso digestivo. Es usada en México con fines medicinales desde la época de los Aztecas.

Es usada con fines ecológicos para conservar el suelo, frenar la desertificación, también impide la erosión del suelo. Es un excelente medio para combatir la contaminación, consume grandes cantidades de CO₂ (Amaya Robles, 2009).

Es usada también como cerco, para limitar fincas.

En la producción de etanol se han realizado muchos estudios (Retamal et al, 1987), se usaron los cladodios como sustrato, donde la concentración más alta de etanol fue por fermentación directa 0,86% (v/v), siendo inviable económicamente porque la concentración de etanol final no llegó al 7±10% (v/v).

1. Introducción

Para la producción de biogás, los cladodios constituyen un gran potencial de desarrollo (Méndez-Gallegos et al, 2010), sin embargo por si solos no constituyen un buen sustrato por su bajo pH (Varnero et al, 1992), experimentos realizados en batch con un 75% de chumbera y 25% estiércol bovino, han dado resultados óptimos con porcentajes de metano que alcanzan el 70% (Uribe et al, 1992). En experimentos de procesos semicontinuo, Obach & Lemus (2006) concluyen que después de 83 días a temperatura entre 30-40 °C se obtuvieron tasas de generación de biogás de 0,861 m³/kgSV con un 58.2% de metano. Otros estudios posteriores realizados en Etiopía (Jigar et al, 2011) obtuvieron óptimas producciones de biogás, con porcentajes de metano entre 50-70%, con mezclas de 25% de cladodios de chumbera y un 75% de purines. Durante los años 2009-2011 PROBIOGAS, en España, desarrolló un proyecto de carácter científico-tecnológico en el que incluyó un modelo sostenible de producción de biogás a partir de cultivos energéticos autóctonos y no alimentarios, incluyendo la chumbera entre ellos. Se evaluó la viabilidad técnica con la codigestión de purines de cerdo y se determinó los parámetros de operación óptimos de la misma. Las conclusiones extraídas fueron las siguientes:

- El purín porcino y los cladodios de *Opuntias ficus indica* son complementarios para la digestión anaerobia, especialmente a lo que se refiere a la relación C/N.
- La codigestión anaerobia de una mezcla 1:1 de purín porcino y *Opuntias 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.
- La producción de biogás máxima se observa a unas velocidades de carga orgánica de:
 - VCO= 1,5 kg SV/m³d en términos de utilización de sustrato (mejor calidad de digestato). Producción de biogás de 406,5 NL/kg SV, con 56,0% de metano
 - VCO= 3,5 kg SV/m³d 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 56,3% de metano (PROBIOGAS, 2011).

A nivel industrial, en México, la cementera cruz azul construye la primera estación eléctrica del mundo que funciona a base del biogás de chumbera. La planta está diseñada para generar hasta un megavatio-hora de energía, lo que significa que podría

1. Introducción

abastecer a 12.000 casas. Con proyecciones de que cada megavatio hora sea 50% más baja que la tarifa establecida por la Comisión Federal de Electricidad.

Para su operación se han plantado 70 hectáreas (ha) donde se cosecha hasta 150 toneladas diarias de Nopal, que abastecerán los biodigestores (SAGARPA, 2015).

1.3.2 Purines

Los purines son una mezcla de deyecciones ganaderas sólidas y líquidas acompañadas de restos de alimentos, tiene distintos grados de dilución según el tratamiento que reciben en los pozos purineros para su aprovechamiento (Aguilera et al, 1995).

1.3.2.1 Características de los purines de cerdo.

Según la guía de los tratamientos de las deyecciones ganaderas (Flotats et al, 2004) las características de los purines y los estiércoles depende de diversos factores: la alimentación, el estado fisiológico de los animales, del tipo de abrevadero, de las prácticas de limpieza, etc. Incluso con una misma alimentación, según su edad, los animales la aprovecharán de una manera diferente y por lo tanto, también será diferente la composición de las deyecciones en cada época del año. Los valores en los que se encuentra su composición serán variables y se pueden mover en unos intervalos muy amplios (Tabla 1.9).

Tabla 1.9. Composición de materia fresca de purines de cerdo.

Parámetro	Unidades	Mínimo	Máximo	Media
Sólidos totales (ST)	g/kg	13.68	169	62.16
Sólidos Volátiles (SV)	g/kg	6.45	121.34	42.33
Porcentaje SV/ST	%	46	76	65
Demanda química de oxígeno (DQO)	g/kg	8.15	191.23	73.02
Nitrógeno total Kjeldhald (NTK)	g/kg	2.03	10.24	5.98
Nitrógeno amoniacal ($N-NH_4^+$)	g/kg	1.65	7.99	4.54
Nitrógeno orgánico (N_{org})	g/kg	0.40	3.67	1.54
Porcentaje $N-NH_4^+$ /NTK	%	57	93	75
Fósforo (P)	g/kg	0.09	6.57	1.38
Potasio (K)	g/kg	1.61	7.82	4.83
Cobre (Cu)	mg/kg	9	192	40
Zinc (Zn)	mg/kg	7	131	66

De los anteriores valores se concluye que:

1. Introducción

- Los purines tienen un elevado contenido en agua. Esta es la diferencia entre los sólidos totales y el total de la materia fresca. El resultado es $1000 - 62.16 = 937.84$ g/kg de media, o sea el 93.8% de agua. Esto implica en que cuando se transporta purines, mayoritariamente se está transportando agua.
- Poca cantidad de materia orgánica. Esta materia orgánica se mide por los sólidos volátiles (SV) o con la DQO, que corresponde a la cantidad de oxígeno necesario para oxidar esta materia orgánica. El valor medio del porcentaje SV/ST del 65% es bajo si lo comparamos por ejemplo con los estiércoles de ternero, los purines de bovino, o la gallinaza que se encuentran normalmente por encima del 80%.
- Tiene un contenido alto en nitrógeno amoniacal: el nitrógeno amoniacal puede presentar una media del 75% de todo el nitrógeno y puede hacer que, junto a la poca materia orgánica, sea necesario considerar los purines más cerca de un fertilizante mineral que de una enmienda orgánica.
- Contenido apreciable en metales: Cobre (Cu) y Zinc (Zn). Estos metales se van acumulando en el suelo y pueden llegar a crear problemas de fitotoxicidad en los cultivos. Si las concentraciones se encuentran en la parte alta del intervalo dado en la tabla, pueden afectar negativamente a los tratamientos que utilizan las bacterias, ya que les puede ser un tóxico para estos tratamientos. Reducir el contenido de estos metales en las dietas representa la obtención de purines de mayor calidad, que afectará muy positivamente cualquier acción que se lleve a cabo, tanto en la aplicación directa en el suelo como en la valorización económica del compost que puede obtenerse de la fracción sólida.
- Fosforo (P) y potasio (K). Son elementos necesarios para los cultivos. La concentración de P es especialmente elevada en purines de cerdo, en comparación con otras deyecciones y tiene una elevada capacidad de contaminación si llega a las aguas superficiales.

1.3.2.2 Usos del purín

Como se mencionó anteriormente el principal uso del purin es como abono, sin embargo hay que controlar sus características intrínsecas, la densidad, la

1. Introducción

alimentación, el clima, las condiciones de la hacienda entre otros porque si no, su aplicación puede tener efectos negativos (Morlachchini et al, 1992).

En términos generales una gestión inadecuada de los purines produce:

- Contaminación de agua por nitratos.
- Acidificación producida por amoníaco.
- Contribución al efecto invernadero producido por metano, óxido nitroso y dióxido de carbono.
- Dispersión de metales pesados.
- Emisiones de malos olores y compuestos orgánicos volátiles.

La (DA) es un proceso idóneo para llevar a cabo los tratamientos de los residuos ganaderos además de reducir el contenido de nitrógeno, reducir olores y generar energía calorífica y eléctrica (PROBIOGAS, 2009), argumentos suficientes para aumentar el desarrollo del sector agroindustrial. Sin embargo en España el sector del biogás se ha estancado, esto puede ser debido al real decreto 1/2012 por el que se procede a la suspensión de los procedimientos de preasignación de retribución en las nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica en régimen especial y la suspensión de ayudas y subvenciones que promovían la puesta en funcionamiento o el desarrollo de plantas de biogás.

A continuación se analizan algunos planes y normas legales que pueden ser importantes para el desarrollo del biogás en España.

1.4 Marco legal

1.4.1 Legislación medioambiental.

1.4.1.1 Directiva 2009/28/CE marco de residuos (EUR-LEX, 2009)

Esta directiva establece un marco jurídico para el tratamiento de los residuos de la UE. Su objetivo es proteger el medio ambiente y la salud humana enfatizando la importancia de utilizar unas técnicas adecuadas de gestión, recuperación y reciclado de residuos para reducir la presión sobre los recursos y mejorar su uso.

Se aplica desde el 12 de diciembre del 2008: los países de la UE debían incorporarla a su legislación nacional a más tardar el 12 de diciembre del 2010.

Dentro de sus puntos más importantes se encuentran:

1. Introducción

- La legislación establece una jerarquía de residuos: prevención, reutilización, recuperación, reciclado, recuperación con otros fines como la valoración energética y eliminación.
- Objetivo 20-20-20, en la cual para el año 2020:
 - las energías renovables deben suponer una cuota del 20% en 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%.
- Confirma el principio de quien contamina paga.
- Introduce el concepto de “responsabilidad ampliada del producto” con ella se impone la obligación a los fabricantes de aceptar y eliminar los productos devueltos tras haber sido utilizados.
- Distingue entre residuos y subproductos.
- La gestión de residuos debe realizarse sin crear riesgos para el agua, el aire, el suelo, las plantas o los animales, sin provocar incomodidades por el ruido, o los olores y sin atender contra los paisajes ni contra los lugares de especial interés.
- Los productores o poseedores de residuos deben tratarlos ellos mismos o hacer que sean tratados por un operador oficialmente reconocidos: Estos deben ser autorizados y son inspeccionados periódicamente.
- Se aplican condiciones especiales a los residuos peligrosos, los aceites usados y bioresiduos.

1.4.1.2 LEY 22/2011 del 28 de julio de residuos y suelos contaminados

Esta ley transpone la directiva 2009/28/CE, y obliga a la elaboración de planes de gestión al estado y a las comunidades autónomas (CCA) y permite a las entidades locales (EELL) que desarrollen programas de gestión de residuos en el ámbito de sus competencias.

En el artículo 14 establece que el Ministerio del Medio Ambiente previa consulta a sus CCA y EELL, a otros ministerios afectados, y cuando proceda en colaboración con otros estados miembros, elaborará de conformidad con la citada Ley, el plan de gestión marco de gestión de residuos. Dicho plan contendrá la estrategia general de la política de residuos, las orientaciones y la estructura a que deberán ajustarse los planes autonómicos, así como los objetivos mínimos a cumplir de prevención, preparación para la reutilización, reciclado, valorización y eliminación. La determinación de dichos objetivos será coherente con la estrategia de reducción de

1. Introducción

gases de efecto invernadero y los compromisos internacionales asumidos en materia de cambio climático (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2016).

1.4.1.3 Plan Estatal de marco de gestión de residuos PEMAR (2016-2022)

Este plan se realiza para cumplir con las obligaciones comunitarias en materia de planificación, incorporando los elementos esenciales de la directiva 2009/28/CE, y reemplazando al Plan Nacional Integrado de Residuos (2008-2015). Este nuevo plan pretende ser el instrumento para orientar la política de residuos en España, impulsando las medidas necesarias para mejorar las deficiencias detectadas y promoviendo las actuaciones que proporcionan un mejor resultado ambiental y que aseguren la consecución de los objetivos legales (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2016).

1.4.2 Cambios climáticos y reducción de gases efecto invernadero (GEI)

1.4.2.1 Protocolo de Kioto (Unión Europea)

EL 11 de diciembre de 1997 los países industrializados se comprometieron en la ciudad de Kioto, a ejecutar un conjunto de medidas para reducir los gases de efecto invernadero. En concreto del dióxido de carbono (CO₂), gas metano (CH₄) y óxido nitroso N₂O), además de tres gases industriales fluorados: hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarobonos (PFCI) y hexafluoruro de azufre (SF₆).

En el primer acuerdo, los gobiernos signatarios de dichos países pactaron reducir en al menos un 5% en promedio las emisiones contaminantes entre 2008-2012, tomando como referencia los niveles de 1990.

La UE, como agente especialmente activo en la concreción del protocolo, se comprometió a reducir sus emisiones totales medidas durante el periodo 2008-2012 en un 8% respecto de las de 1990.

El segundo periodo de compromiso del protocolo de Kioto comenzó el 1 de enero de 2013 y finalizará en 2020. Participan en él 38 países desarrollados, incluida la UE y sus 28 estados miembros. A este segundo periodo se aplica la enmienda de Doha, con arreglo a la cual los países se han comprometido a reducir las emisiones en un 18% como mínimo con respecto a los niveles de 1990. La UE se ha comprometido a reducir las emisiones en este periodo en un 20% por debajo de los niveles de 1990.

Los principales elementos del nuevo acuerdo en París son:

1. Introducción

- **Objetivos a largo plazo:** Los gobiernos acordaron mantener el incremento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2°C con respecto a los niveles preindustriales y redoblar los esfuerzos para limitarlo a 1.5°C.
- **Contribuciones:** Antes de la conferencia de París y durante la misma, los países presentaron planes generales nacionales de acción contra el cambio climático para reducir sus emisiones.
- **Ambición:** Los gobiernos acordaron comunicar cada cinco años sus contribuciones para fijar objetivos más ambiciosos.
- **Transparencia:** También aceptaron informarse unos a otros y a la sociedad sobre el grado de cumplimiento de sus objetivos para garantizar la transparencia y la supervisión.
- **Solidaridad:** La UE y otros países desarrollados seguirán financiando la lucha contra el cambio climático para ayudar a los países en vía de desarrollo tanto a reducir sus emisiones como a aumentar la resiliencia ante los efectos del cambio climático (CONFERENCIA DE LA ONU SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO, 2015) .

1.4.2.2 Plan de asignación de gases de efecto invernadero (PNA) 2013-2020 (España).

Mediante la resolución de 18 de noviembre de 2014 se aprueban los ajustes en las asignaciones de derechos de emisiones de gases efecto invernadero para el periodo 2014-2020.

1.4.2.3 Plan de biodigestión de purines (España).

El gobierno español aprobó un plan de medidas urgente para cumplir con el protocolo de Kyoto para la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y entre ellas se encontraba el plan de biodigestión de purines. El Real Decreto 949/2009, de 5 de junio, establece las bases reguladoras de las subvenciones estatales para fomentar la aplicación de los procesos técnicos del plan de biodigestión de purines. La Comunidad Autónoma de Extremadura viene desarrollando políticas para la concesión de subvenciones al ahorro energético y a las energías renovables.

1.4.3 Normativa para las instalaciones de autoconsumo

- Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del sector eléctrico
- Real decreto 1699/2011, de 18 de noviembre, por el que se regula la conexión a red de instalaciones de producción de energía eléctrica de pequeña potencia.

1. Introducción

- Real decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables, cogeneración y residuos.
- Real decreto 900/2015 de 9 de octubre, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo.

1.5 Rentabilidad

Valorar la rentabilidad de estas plantas es difícil debido a la gran variedad de factores que inciden en ello. Es fundamental para que funcione que el proceso de digestión esté perfectamente integrado en la planta. Se estudiarán unos criterios generales para analizar una planta tipo individual (Agencia Andaluza de la Energía, 2011):

- Costes de inversión.
- Costes de explotación.
- Valoración de beneficios.
- Indicadores de evaluación económica.

1.5.1 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 plantas de biogás depende de: tamaño de la instalación y caudal de tratamiento.

Existe una marcada economía de escala. En la Fig. 1.18 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 (Flotats & Sarquella, 2008).

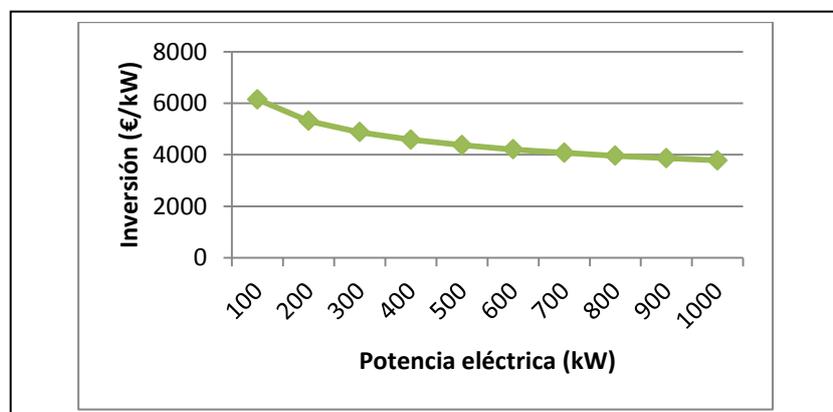


Fig. 1.18. Relación entre la inversión unitaria por unidad de potencia eléctrica

1. Introducción

Se observa que a partir de 300 kW se estabiliza entre 5000 y 4000 euros el kW generado.

Según (AINIA, 2011) se deben considerar los siguientes costes:

- Recepción y almacenamiento de materias primas.
- Pre-tratamientos.
- Sistemas de mezclas y/o dosificación de sustratos.
- Fermentadores y post-fermentadores.
- Línea de gas.
- Motor.
- Transformador y enganche a la red eléctrica.
- Sistema de impulsión (bombas, tuberías...).
- Instalaciones (agua, eléctrica, calefacción, etc.).
- Control y automatización de la planta.
- Vehículos de transporte de materias primas/digestatos según proyecto.
- Balsa de almacenamiento de digestatos.
- Pequeño laboratorio.

1.5.2 Costes de explotación

Como costes de explotación AINIA (2011) incluye los siguientes:

- Mantenimiento motor.
- Reparación, mantenimiento de equipos e instalaciones, seguros, administración. Se tiene como referencia 1.5 % sobre el valor de la inversión.
- Materias primas (incluye transporte, según el caso).
- Personal de planta.
- Limpieza del biogás.
- Preparación del compost.

1.5.3 Valoración de beneficios

1.5.3.1 Beneficios económicos

AINIA (2011) incluye los siguientes conceptos dentro de los ingresos:

- Energía eléctrica.
- Energía térmica.
- Gestión de residuos.

1. Introducción

- Venta de productos fertilizantes.
- Derechos de emisiones de GEI.

1.5.3.2 Beneficios sociales

Según Chandra Kandpal & Purohit (2007), además de los beneficios anteriores es importante incluir algunos beneficios sociales los cuales incluyen:

- Generación de empleo.
- Reducción de la incertidumbre en el suministro de energía.
- Reducción de gases de efecto invernadero.

1.5.4 Indicadores de evaluación económica.

Existen diversos criterios para medir la rentabilidad de una inversión, los más usados según León (2007) son los siguientes indicadores: periodo de recuperación (PR), valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR). A continuación se estudiarán cada uno de ellos.

1.5.4.1 Periodo de recuperación (PR)

Este indicador consiste en calcular el tiempo en que el proyecto tarda en recuperar la inversión. Se calcula bajo la siguiente ecuación:

$$0 = -I_0 + \sum_{i=0}^{n=Payback} F_i$$

Donde I_0 es la inversión inicial, F_i es el flujo de efectivo para el periodo i y n es el periodo de recuperación. Dado que este indicador no considera el valor del dinero en el tiempo (tasa de interés) se le puede agregar un factor δ equivalente a la tasa de interés.

1.5.4.2 Valor presente Neto (VPN)

El valor presente neto consiste en el valor equivalente en un tiempo cero (hoy) de los flujos de efectivo del proyecto. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$VPN: -I_0 + \sum_{i=0}^n \frac{F_i}{(1+\delta)^i}$$

Donde I_0 es la inversión inicial, F_i es el flujo de efectivo para el periodo i y δ es la tasa de interés fijada para el proyecto. La tasa de interés refleja el valor del dinero en el tiempo y se fija dependiendo del riesgo que tenga éste. Será mayor o menor dependiendo del riesgo. El valor presente neto, puede ser negativo, positivo o cero. Si

es positivo, significa que el proyecto es favorable, si es negativo que es desfavorable y si es cero, que es un proyecto que no genera valor.

1.5.4.3 Tasa Interna de Rentabilidad (TIR)

La tasa interna de Retorno es la tasa de interés que hace cumplir la condición de que el VPN del proyecto sea equivalente a cero. La TIR para un proyecto de N años, está definida por la ecuación:

$$0=VPN=-I_0 + \sum_{i=0}^n \frac{F_i}{(1+TIR)^i}$$

Donde I_0 es la inversión inicial, F_i es el flujo de efectivo para el periodo i , TIR es la tasa interna de retorno del proyecto.

Este método se emplea principalmente para conocer la rentabilidad de una inversión y comparar la tasa obtenida con la que rige en el mercado. Una inversión es conveniente cuando la tasa interna de retorno es superior a la tasa de interés con que se calculó el VPN.

1.5.5 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad consiste en calcular los nuevos flujos de caja y con esto los distintos indicadores de rentabilidad al cambiar el valor de alguna variable del proyecto como los costos, inversión, ingresos, etc. Generalmente se calcula el cambio porcentual del VAN con la siguiente ecuación:

$$VAN_{\%} = \frac{VAN_f - VAN_i}{VAN_i}$$

Donde $VAN_{\%}$ es el cambio porcentual en el VAN por el cambio en algún indicador del proyecto, VAN_f es el nuevo VAN luego de realizar el cambio del indicador y VAN_i es el valor de VAN antes de realizar algún cambio.

1.6 Impactos socio-ambientales del proyecto

El estudio de los impactos socio-ambientales puede determinarse con el método de la matriz de Leopold, que permite jerarquizar y evaluar los impactos ambientales en un proyecto (Leopold et al, 1971).

La matriz de Leopold fue el primer método que se estableció para las evaluaciones de impacto ambiental. Es un sistema de información y se preparó para el servicio

1. Introducción

geológico del Ministerio del Interior de los Estados Unidos, como elemento de guía de los informes y de las evaluaciones de impacto ambiental.

La base del sistema es una matriz, en la que las entradas según columnas son acciones del hombre que puede alterar el medio ambiente y las entradas según filas son características del medio (factores ambientales) que pueden ser alteradas. Con estas entradas en filas y columnas se pueden definir las interacciones existentes.

El primer paso consiste en la identificación de las interacciones existentes, para lo cual se considerará primero todas las acciones (columnas) que pueden tener lugar dentro del proyecto en cuestión. Posteriormente y para cada acción se considerarán todas las acciones ambientales (filas) que pueden quedar afectadas significativamente, trazando una diagonal en la cuadrícula correspondiente a la columna (acción) y fila (factor) considerados. Una vez diseñada la matriz de identificación de impactos ambientales se procederá al análisis de las interacciones entre acciones y factores, es decir, entre columnas y filas, con el fin de determinar qué acción producirá alteración sobre que factor, determinando así cuales son los impactos reales susceptibles.

Cada cuadrícula admite dos valores:

Magnitud: Según un número de 1-10, en el que 10 corresponde a la alteración máxima provocada en el factor ambiental considerado y 1 la mínima importancia. Los valores de magnitud van precedido con un signo + o con un signo -, según se trate de efectos positivos o negativos sobre el medio ambiente (Pinto Arroyo, 2007).

Importancia: que da peso relativo al factor ambiental considerado.

A continuación se presentan los estudios y alcance de la investigación.

1.7 Objetivos

- Medir la potencialidad del purín para la producción de biogás.
- Evaluar la chumbera como sustrato en la codigestión con el purín.
- Determinar la velocidad de carga orgánica de la chumbera que optimiza la producción de metano.
- Estudiar los cambios en los parámetros de control del proceso: pH, potencial Rédox, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y DQO.
- Determinar la calidad del digestato resultante.

1. Introducción

- Evaluar la factibilidad de proyectos de inversión para plantas de biogás agroindustrial a pequeña escala usando como sustratos purines y chumberas [*Opuntias ficus indica (L.) Miller*].
- Elaborar un flujo de caja del proyecto. Determinar costes e inversiones.
- Calcular los indicadores de rentabilidad del proyecto.
- Elaborar un análisis de sensibilidad con los parámetros más determinantes del proyecto.
- Estudiar el efecto social y ambiental de la instalación de plantas de biogás.

1.8 Alcance

La investigación estudia la factibilidad de proyectos inversión para plantas de biogás a pequeña escala, usando como sustratos purines y chumberas, con el fin de producir energía para autoconsumo, vender excedentes de energía eléctrica a la red, disponer de un digestato con buenas condiciones agronómicas y disminuir los GEI.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2. Materiales y métodos

2.1 Preparación y caracterización de los sustratos

Se realizó una caracterización inicial de los sustratos usados en los ensayos de biodegradabilidad, a continuación se presenta el tratamiento que se les aplicó.

- **Chumbera**

Las palas de chumbera usadas fueron recolectadas de plantas silvestres ubicadas en Guadajira–Badajoz, que crecían sin fertilizantes, ni riego, luego fueron cortadas y trituradas hasta producir una pasta líquida (ver Fig. 2.1.) que posteriormente fueron refrigeradas hasta su posterior utilización.



Fig. 2.1. Palas de chumberas trituradas.

2. Materiales y métodos

El análisis económico de la siembra de una ha de chumbera para ser usada como biomasa en la producción de biogás se muestra en el anexo 1.

➤ Purín

Se recolectaba de la balsa de purines de la finca Ibérico Montepistacho, ubicada en la carretera Ex 30 km 30-Badajoz, no se les sometió a ningún tratamiento, se les hizo la caracterización elemental, se almacenó en botellas y se congelaron para ser usados cuando se requerían en los ensayos de biodegradabilidad (ver Fig.2.2.).



Fig. 2.2 Recolección del purín

2.2 Ensayo tipo Batch

Se realizaron ensayos tipo batch de purines y codigestion con chumbera en distintas proporciones. Para cada ensayo se determinó la potencialidad del purín, y luego se comparaban con los rendimientos de la codigestión de las diferentes mezclas con chumberas. Se siguió la norma de la asociación de ingenieros alemanes para optimizar la producción de biogás (VDI 4630, 2006).

2.3 Ensayo en semicontinuo

Con el fin de optimizar el proceso con los dos sustratos empleados, se diseñó un experimento en semicontinuo, siguiendo también la norma VDI 4630, que establece un procedimiento básico:

- La velocidad de carga orgánica VCO se implementa de menor a mayor.

2. Materiales y métodos

- El proceso de degradación se estudia con diferentes VCO o con diferentes tiempos de retención hidráulicos (THR).
- Los digestores se inoculan con biomasa microbiana adaptada al sustrato a emplear. El incremento de la VCO se realizaba cuando se estabilizaba la producción de metano o disminuía la DQO_T . El experimento terminó cuando la producción de biogás dejó de ser lineal con relación a la carga orgánica suministrada.

2.4 Digestor utilizado.

El equipo utilizado durante los ensayos es un equipo de la marca **Lehmann Maschinenbau Gmb** de acero inoxidable (Fig. 2.3.). El sistema de calefacción de los digestores se realizaba a través de una camisa exterior por la cual circulaba agua caliente, además de un termóstato encargado de que la temperatura de los sustratos se mantuviera a 38 °C, que se controlaba electrónicamente.



Fig. 2.3. Digestor anaerobio Lehman Maschinenbau

Se tenía un conjunto de 4 digestores con capacidades de 4.2 L. Cada reactor tenía dos salidas posteriores una para la salida del biogás y otra para la entrada y salida del sustrato (Fig. 2.4).

2. Materiales y métodos



Fig. 2.4. Tapas de entrada y salida y recolección del biogás del digestor.

Además en el centro tiene un eje con una terminación en forma de hélice para la agitación mecánica, con control automático de velocidad (Fig. 2.5.).



Fig. 2.5. Hélices de agitación del digestor.

La constante agitación permite un óptimo contacto del sustrato del fondo con el situado en lo más alto del reactor.

2. Materiales y métodos

2.5 Medición del biogás

La recolección del biogás se efectuó por medio de una columna invertida en un recipiente con una solución salina pH \approx 2, donde el volumen de la solución desplazada, corresponde al volumen del biogás producido (Fig. 2.6.).



Fig. 2.6. Columnas invertidas para la medición del biogás

Para determinar su composición se usó un analizador de gases manual de la marca SERWEI SR-DO con el que se evaluaba el porcentaje de CH₄ y CO₂ (Fig. 2.7).



Fig. 2.7. Analizador de gases manual

2. Materiales y métodos

2.6 Parámetros de control

Son todos aquellos análisis químicos y físicos que se realizaron durante el proceso de biodegradación, que daban información de la cantidad de materia orgánica que se degradaba, o de la existencia de compuestos inhibidores.

Los siguientes parámetros de control son los que se analizaron, además se indica la periodicidad con la que se realizaba:

- pH, diario
- Potencial Rédox, diario
- Demanda química de oxígeno total y soluble, dos veces por semana
- Sólidos totales y volátiles, dos veces por semana
- Alcalinidad, inicial y final
- Relación C/N, inicial y final
- Determinación de metales pesados con ICP: Espectrómetro de inducción con plasma acoplado inductivamente, al final de cada proceso.

La Fig. 2.8. indica la forma de extracción usada para sacar las muestras, que serían posteriormente analizadas.



Fig. 2.8. Extracción de mezcla

2.6.1 pH

Se medían directamente sobre la muestra, con un electrodo a un medidor de pH (Fig.2.9). Previamente se realizaba la calibración con las disoluciones tampones estándar CRISON, de pH 7 y 4 a 25°C. La resolución de la lectura es de 0,01 unidades de pH y la precisión de $\pm 0,01$.

2. Materiales y métodos

2.6.2 Potencial rédox

Es un indicador de carácter oxidante o reductor del sistema. Al igual que el pH se midió directamente sobre la muestra con un electrodo selectivo. La calibración se realizó con una disolución patrón a 220 mV y 25 °C.

2.6.3 Demanda química de oxígeno total.

La demanda química se determinó usando viales mediante un fotómetro a partir del cual se obtuvo la DQO. La muestra debía estar diluida y se medía directamente.

2.6.4 Sólidos totales y volátiles

La determinación del contenido de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) se realizó de acuerdo con el método 2540 E (APHA, 1995). Se utilizó una estufa para los (ST) y una mufla para los (SV).

2.6.5 Alcalinidad

Se determinaba sobre la parte líquida de la muestra, realizando una valoración volumétrica con HCl según el método estándar 2320 (APHA, 1995).

2.6.6 Relación C/N

Las cantidades de C y N que contiene el sustrato se determinaron mediante un analizador elemental de la marca TrueSpec CHN LECO serie 4084.

2.6.7 Determinación de metales pesados

Los cationes y metales pesados que se analizaron fueron: Ca, Na, K, Mg, Cu, Zn, P, Ni, Cr, Cd, y Pb. El método de análisis se llevó a cabo por espectrometría de plasma acoplado mediante un ICP Varian 715-ES.

2.6.8 Ajuste cinético

De acuerdo con el modelo cinético seleccionado, adaptado al volumen de metano producido para un proceso discontinuo, se siguió el siguiente procedimiento:

- Se calculó el volumen máximo acumulado de metano.
- Este volumen máximo se utilizó para la representación del volumen de metano producido frente a la inversa del tiempo.
- Se procedió al ajuste de resultados, de acuerdo a la expresión (1) y (2) (Pagés et al, 2011; Borja et al, 1993):

$$G = G_m [1 - e^{-kt}] \quad (1)$$

2. Materiales y métodos

donde G es el volumen de metano (NmL) después de un tiempo t (d), G_m es el máximo volumen acumulado (NmL) en un tiempo de digestión infinito y k es la constante de velocidad específica observada del proceso general (día^{-1}).

$$\ln\left(1 - \frac{G}{G_m}\right) = -kt \quad (2)$$

2.6.9 Análisis estadístico

Los análisis estadísticos sobre los resultados de los ensayos batch y semicontinuo, se llevaron a cabo a través del análisis de varianza de un criterio (ANOVA), metodología que sirve para analizar la variación entre muestras y la variación al interior de las mismas mediante la determinación de varianzas.

El ANOVA de un criterio permite poner a prueba hipótesis tales como:

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \dots = \mu_k$$

H_1 = Al menos dos medias poblacionales son diferentes

Los supuestos en que se basa la prueba t para muestras independientes son:

1. Ambas poblaciones son normales
2. Las varianzas poblacionales son iguales, esto es $\sigma_1 = \sigma_2$

Como el ANOVA de un criterio es una generalización de la prueba t para dos muestras, los supuestos son los mismos.

Se requiere del cálculo de dos estimaciones independientes para σ^2 , la varianza poblacional común. Estas dos estimaciones se denotan por S_b^2 y S_w^2 , S_b^2 se denomina estimación de la varianza entre muestras y S_w^2 se denomina estimación de la varianza al interior de las muestras. El estadístico tiene una distribución muestral resultando:

$$F = \frac{S_b^2}{S_w^2}$$

El valor crítico para la prueba F es:

$$F_{\alpha}(k-1, k(n-1))$$

Donde el número de grados de libertad para el numerador es $k-1$ y para el denominador es $k(n-1)$, siendo α el nivel de significancia.

2. Materiales y métodos

k= número de muestras

El procedimiento que se sigue es el siguiente:

- Determinar si las muestras provienen de poblaciones normales. Se usó para ello el programa MINITAB
- Proponer la hipótesis
- Hallar el valor estadístico de la prueba F
- Calcular el valor crítico para F, se usó la hoja excel de Windows para su determinación.
- Decidir si se rechaza H_0 .

2.6.10 Rentabilidad de la inversión

El análisis económico se realizó sobre un caso real, en la granja de cerdos, IBÉRICO MONTEPISTACHO C.B.

Todos los cálculos financieros fueron elaborados en una planilla de Excel, de acuerdo con los siguientes parámetros:

- La rentabilidad del proyecto se evaluó usando 3 indicadores económicos: la tasa interna del retorno (TIR), el valor actual neto (VAN) y el tiempo de recuperación de la inversión (payback).
- Se tuvo en cuenta los requerimientos energéticos actuales de la granja y los precios que pagan por la energía consumida. La valoración se hizo para autoabastecimiento energético y térmico, con ventas de excedentes eléctricos a la red.
- La vida útil del proyecto sería de 15 años.
- La inflación anual se estableció en 2%.
- Se realizó un análisis de sensibilidad modificando los parámetros más importantes que influyen en la viabilidad del proyecto.

2.6.11 Impactos socio-ambientales del proyecto

Para la evaluación socio-ambiental se usó la matriz de Leopold, donde se identificaron aquellas acciones en el proyecto que podían producir impactos positivos o negativos en los siguientes medios:

- Medio atmosférico
- Medio edáfico

2. Materiales y métodos

- □ Flora y Vegetación
- □ Medio perceptual

La matriz permite dos valores por cada cuadrícula así:

- Magnitud: Se coloca en la mitad superior izquierda, indica la intensidad al impacto y se califica del 1 al 10, de menor a mayor, anteponiendo un signo (+) para los efectos positivos y (-) para los negativos.
- Importancia: Hace referencia a la relevancia del impacto sobre la calidad del medio, se califica también del 1 al 10 en orden creciente de importancia.

Se evaluaron y ponderaron los impactos que estas acciones generan sobre el medio ambiente, precediendo con un signo + o -, según se trate de efectos positivos o negativos.

Una vez llenas las cuadrículas, se interpretaron las valoraciones.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización de los sustratos utilizados

La tabla 3.1. muestra la caracterización de los valores de los sustratos utilizados durante el proyecto de investigación. Se dan los valores de los parámetros y su desviación.

Tabla 3.1. Caracterización de los sustratos utilizados

PARÁMETRO	PURÍN	CHUMBERA
Potencial rédox (mV)	(-300±14) – (-342±20)	(200±9,6) – (246±19,6)
DQO _T (mg/L O ₂)	64.000±3.520 -120.000±924	43.600±2.965 – 62.000±3.596
Sólidos totales (%)	2,1±0,18 - 8,0±0,37	5,40±0,20-8,20±0,42
Sólidos volátiles (%)	44±3,5 - 70±3,8	75±6,48 - 82±6,89
Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	10.000±400 - 42.013±1.200	9.000±620 -12.000±964
pH	7,22±0,26 – 8,23±0,91	4,30±0,40 - 5,5±0,21
Relación C/N	10±0,62 - 20±2,28	38±2,9 - 42±3,6
Densidad (g/mL)	1±0,04 - 1.05± 0.05	0,84±0,032 - 0,94±0,041

Existe una gran desviación en la caracterización de los sustratos, se debe principalmente a que han sido tomados en diferentes tiempos, en el caso del purín por ejemplo una muestra fue muy diluida y otra se recolectó con más sólidos. En la chumbera también se observó que durante los meses de verano las pencas o cladodios tenían más sólidos que en los meses de invierno.

Por otra parte, de los valores obtenidos, destacan los siguientes parámetros en la chumbera:

Potencial rédox, entre 200±9,6 y 246±19,6mV, y el pH entre 4,30±0,40 y 5,5±0,21 según Flotats. (2010), recomienda que el potencial rédox debe ser inferior a -350 mV y el pH debe mantenerse cercano a la neutralidad. Esto evidencia el tipo ácido de este sustrato y la dificultad del desarrollo de bacterias metanogénicas en modo monosustrato.

Los demás valores en chumbera y purín corresponden a resultados normales para este tipo de procesos.

3. Resultados y discusión

3.2 Ensayos tipo Batch

Se diseñaron con el objetivo de encontrar la mezcla de chumbera y purín que optimizara la producción de metano.

3.2.1 Batch 1: Codigestión de purín y chumbera en proporciones de 5%, 7.5%, y 10%

La tabla 3.2 muestra el comportamiento de la codigestión del purín y la chumbera en proporciones de 5% 7,5% y 10%, se estudian los rendimientos de biogás y metano, variación en los ST, SV y DQO_T. y la evolución del pH y potencial rédox y un estudio de la relación C/N y las constantes cinéticas del proceso.

Los mejores resultados de gas y metano se dan en la codigestión de purín y el 10% de chumbera, con rendimientos de biogás y metano de 219,89±8,72 L/kg SV y 135,31±4.21 L/kg SV respectivamente. El porcentaje de metano fue del 62%. Las reducciones de ST, SV, y DQO_T también son mayores en esta codigestion.

Tabla 3.2. Resultados de la codigestión batch 1

	Purín 100%	5% Chumbera y 95% purín	7,5% Chumbera y 92,5% purín	10% chumbera y 90% purín
<i>Biogás (mL)</i>	49.000±1200	58.000±1.900	62.050±4.200	65.000±3.516
<i>Metano (mL)</i>	28.850±690	36.000±2.200	38.200±2160	40.000±1.868
<i>Metano (%)</i>	59±1,4	62±1,6	62±1,7	62±1,42
<i>ST inicial (%)</i>	7±0,16	7,6±0,10	7,44±0,34	7,1±0,32
<i>S final (%)</i>	5,9±0.17	6,2±0,25	5,8±0,32	5,5±0,14
<i>Reducción en ST (%)</i>	15,71±0,37	18,42±0,52	22,04±0,46	22,54±0,38
<i>SV inicial (%)</i>	70±1,85	73±2,15	76,52±2,3	75,7±2,4
<i>SV final (%)</i>	56±1, 35	52,5±1,29	56,4±1,42	52,6±1,64
<i>Reducción en SV (%)</i>	20±0,42	28,08±1,12	26,29±1,05	30,52±0,87
<i>DQO inicial (mg O₂/L)</i>	12.0000±3.108	116.000±4.870	113800±3.300	108.000±3.780
<i>DQO final (mg O₂/L)</i>	9.0000±2.070	82.500±2.880	78.260±2.270	72.000±2.020
<i>Reducción en DQOT(%)</i>	25,00±0,6	28,88±0,98	31,23±1,2	33,33±1,26
<i>Rendimiento en metano (L/kgSV)</i>	107,05±3,4	117,98±3,5	122,00±5,12	135,31±4,21
<i>Rendimiento en biogás (L/kg SV)</i>	181,82±4,88	190,08±4,2	198,17±5,94	219,89±8,72

A continuación se analizan en forma detallada los valores obtenidos en los distintos parámetros.

3. Resultados y discusión

3.2.1.1 Rendimientos de biogás y metano

Para efecto de esta discusión se considerarán las siguientes equivalencias:

P, corresponde al purín. y CH corresponde a la chumbera.

5% CH, corresponde a 5% chumbera y 95% purín.

7.5% CH, corresponde a 7.5% chumbera y 92.5% purín.

10% CH, corresponde a 10% chumbera y 90% purín.

Inicialmente se muestra la evolución acumulada de metano durante el ensayo batch 1 (Fig. 3.1.).

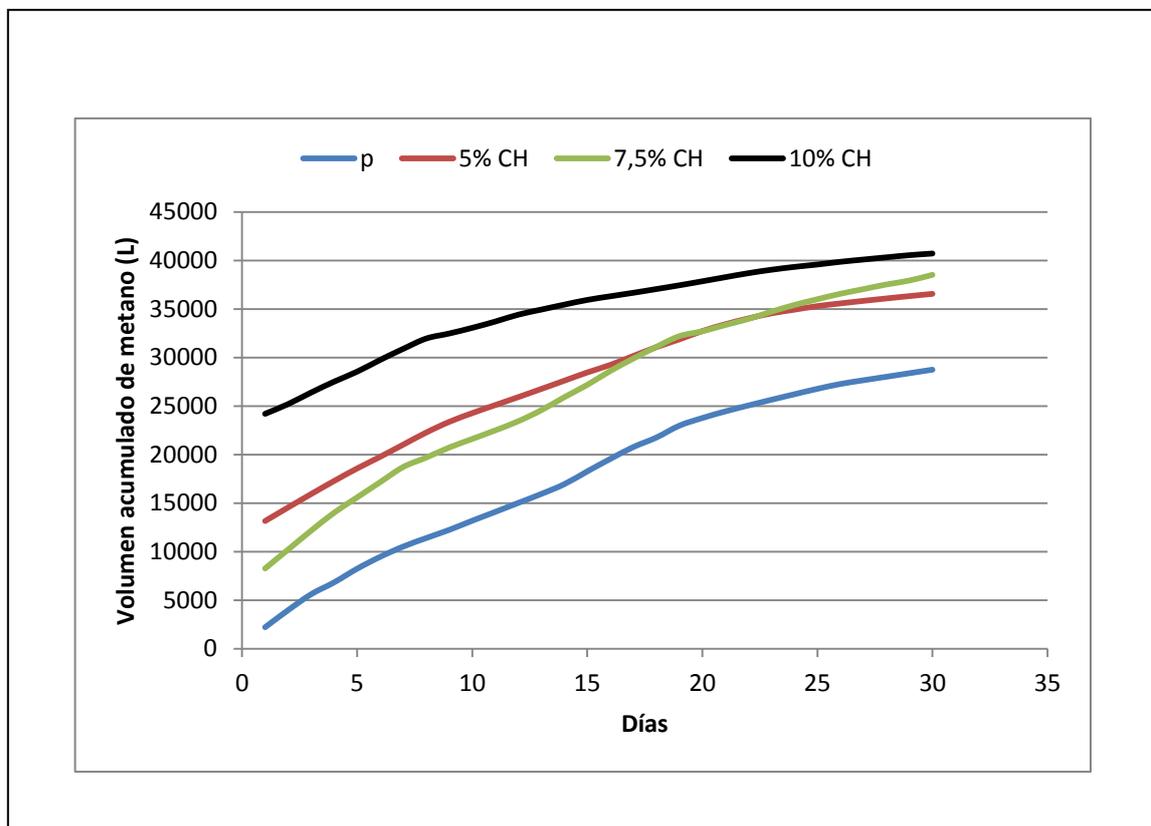


Fig. 3.1. Producción acumulada de metano en el ensayo batch 1

- La producción acumulada de P, tiene la producción más baja.
- Al aumentar los porcentajes de CH en la mezcla se incrementa la producción de metano.
- La producción acumulada de metano del 10% CH fue la mejor.

3. Resultados y discusión

Los porcentajes de metano se mantuvieron por encima del 60%, fue disminuyendo al ir terminando el proceso de biodegradabilidad. La Fig. 3.2 muestra la evolución del porcentaje de metano durante el experimento batch 1.

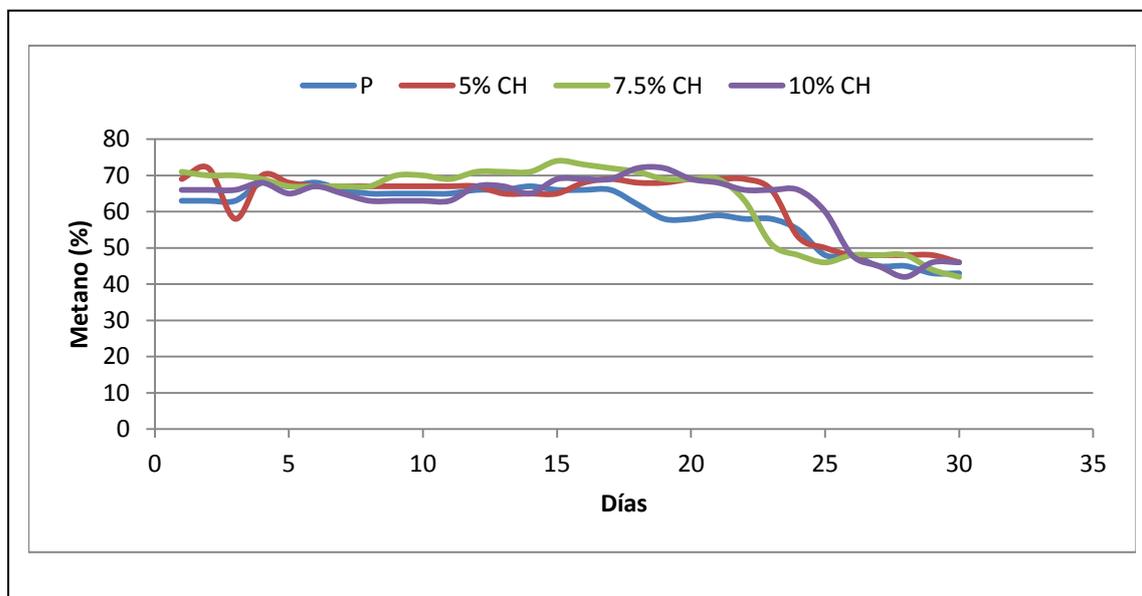


Fig. 3.2. % de metano durante el ensayo batch 1

Un resumen de los rendimientos de biogás y metano se muestran en la Fig.3.3.

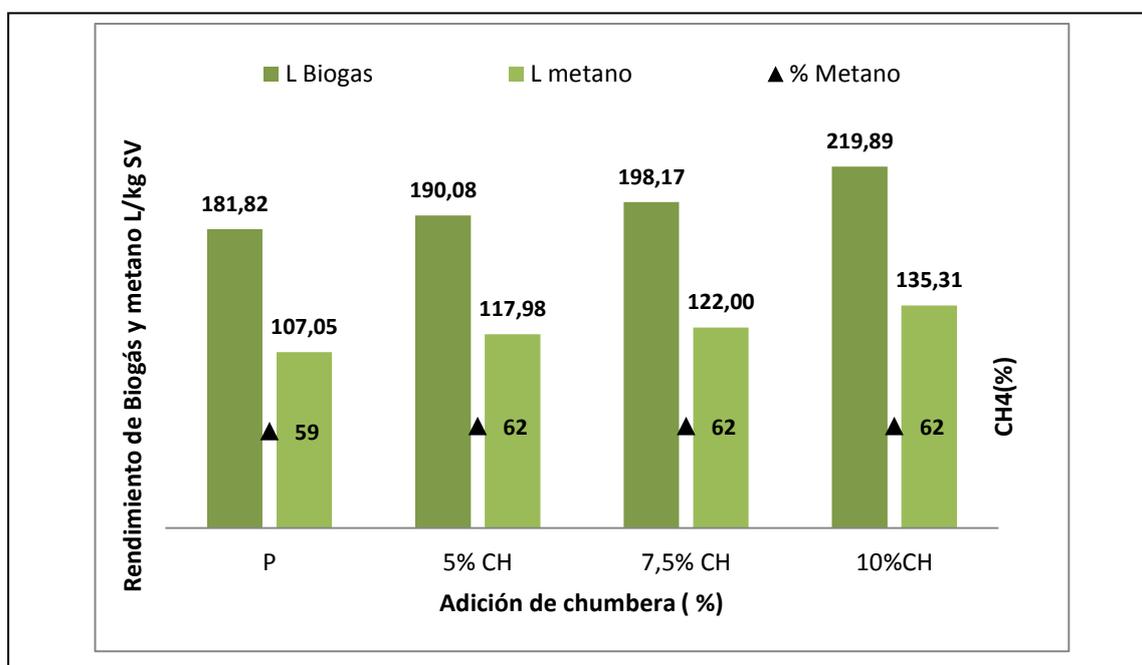


Fig. 3.3 Rendimientos de Biogás y metano en el ensayo batch 1

3. Resultados y discusión

Al analizar los valores en la figura se observa que:

- el purín (P) tiene un rendimiento del biogás y metano de 181,82 y 107,05 respectivamente con un contenido porcentual de metano del 59%. Los rendimientos en metano son valores muy bajos si se compara con resultados bibliográficos, los cuales oscilan entre (207-347) L/kg SV (Kaparaju et al, 2009; Flotats, 2010; Amon et al, 2006). Esto puede deberse a que los purines estaban refrigerados antes de utilizarlos. Algunos estudios concluyen que después de muchos días de estar en almacenamiento, los purines tienen muy baja productividad para la producción de biogás (Bonmatí et al, 2001).
- En la mezcla 5% CH los rendimientos del biogás y metano se incrementaron en 4,54% y 10,21%, respectivamente con respecto a (P).
- En la codigestión del 7.5% CH, los rendimientos del biogás y metano se incrementaron en 8,99% y 13,97%, respectivamente con respecto a (P).
- La codigestión del 10% CH fue la mejor. Los rendimientos del biogás y metano se incrementaron en 20,94% y 26,40% respectivamente con respecto a (P).
- Los porcentajes de metano aumentaron en un 3% con respecto a P, manteniéndose alrededor del 62%.

Se evidencia un aumento en los rendimientos cuando se adiciona la chumbera, aumentando el carbono en la mezcla. A continuación se estudia el efecto del incremento de la relación C/N en la productividad de los procesos estudiados.

3.2.1.2 Efecto de la relación C/N en la productividad del proceso

Para ello se usaran los siguientes valores promedios:

- C/N purín: 15
- C/N chumbera: 40

La Fig. 3.4. muestra el efecto del incremento de la relación C/N en cada uno de los experimentos, teniendo en cuenta las mezclas de CH y P utilizadas.

3. Resultados y discusión

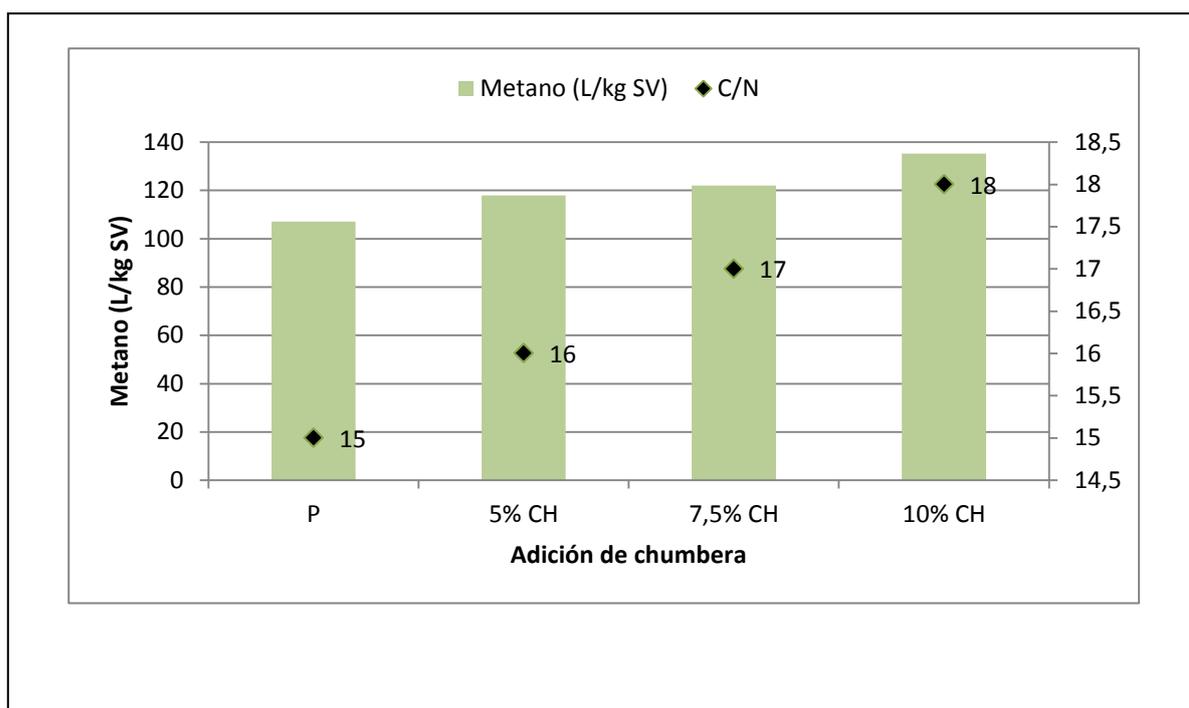


Fig. 3.4. Efecto del incremento de la relación C/N en los rendimientos de metano en el ensayo batch 1

En la medida que aumenta la relación C/N, mejora los rendimientos de los procesos.

3.2.1.3 Evolución del pH y potencial rédox

El comportamiento del pH se muestra en la Fig. 3.5. Las muestras eran tomadas semanalmente.

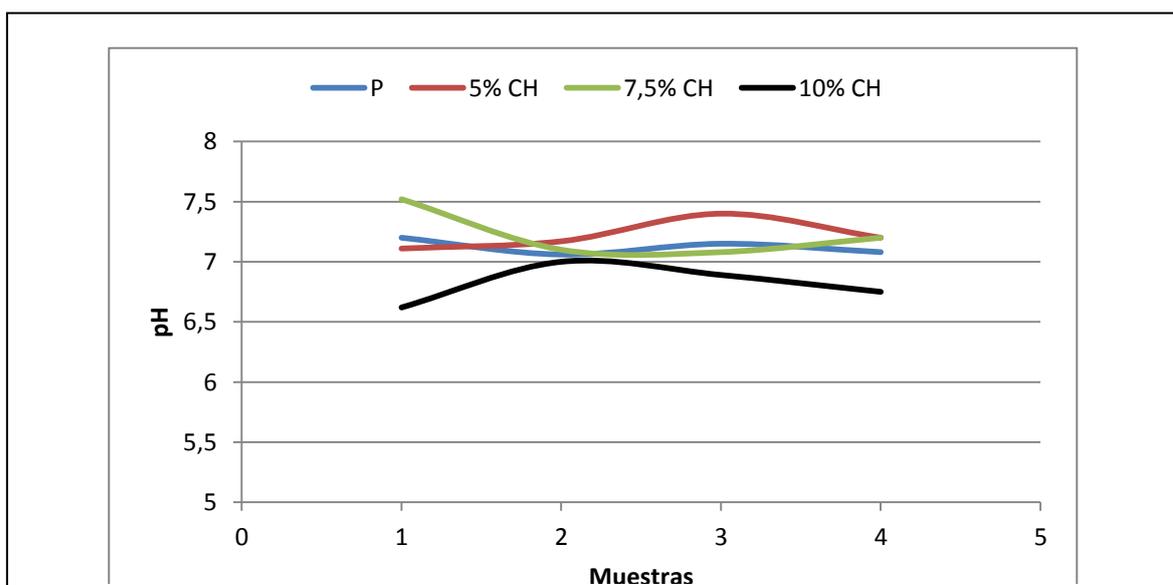


Fig. 3.5. Evolución del pH en el ensayo batch 1

3. Resultados y discusión

Los valores del pH se mantienen entre 6.5 y 7.5.

Los valores del potencial rédox se mantuvieron entre -300mV y -400mV como se muestra en la Fig. 3.6.

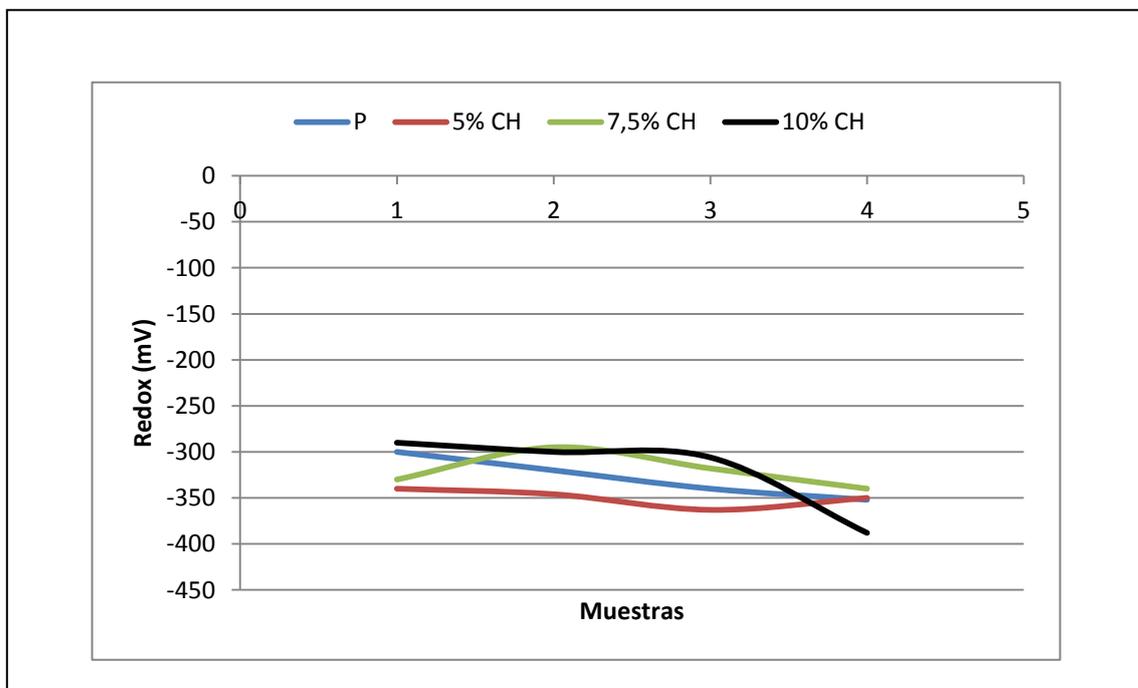


Fig. 3.6. Potencial rédox en el experimento batch 1

3.2.1.4 Sólidos totales y volátiles

Las Tablas 3.2 y 3.3 muestran la variación de los ST y SV a lo largo de la experimentación.

Tabla 3.3. Evolución de los ST en el ensayo batch 1

<i>Muestras No</i>	<i>P</i>	<i>5% CH</i>	<i>7,5% CH</i>	<i>10% CH</i>
1	7±0,16	7,6±0,10	7,44±0,34	7,1±0,32
2	6,7±0,32	7,21±0,41	7,07±0,42	7,01±0,29
3	6,5±0,28	6,58±0,29	6,74±0,38	6,3±0,30
4	5,9±0,17	6,2±0,25	5,8±0,32	5,5±0,14

3. Resultados y discusión

Tabla 3.4. Evolución de los SV en el ensayo batch 1

Muestras No	P	5% CH	7,5% CH	10% CH
1	70±1,85	73±2,15	76,52±2,3	75,7±2,4
2	64±3,5	69,5±3,2	71,95±3,8	72,66±3,6
3	60±2,8	62,3±2,4	67,71±2,6	69,58±2,9
4	56±1,35	52,5±1,29	56,4±1,42	52,6±1,64

La Fig. 3.8. muestra un resumen con los porcentajes de reducción de los ST en el ensayo batch 1

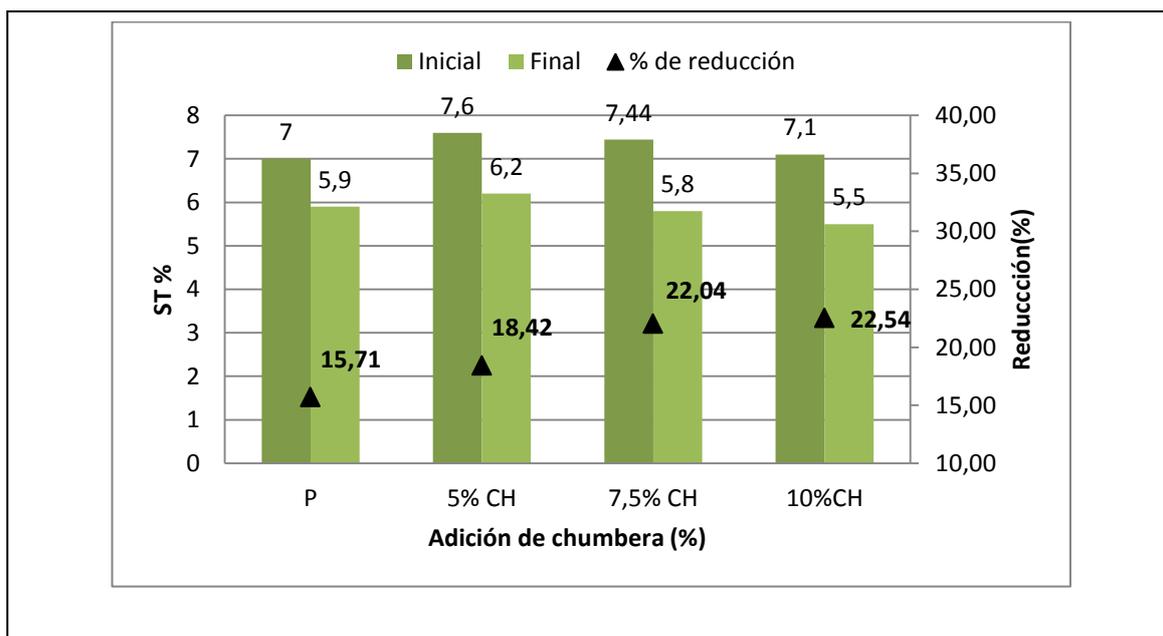


Fig. 3.8. Valores iniciales y finales de los ST en el ensayo batch 1

En todos los experimentos se observa una reducción en el % de los ST, siendo mayor el de la codigestión del 10% CH.

La Fig.3.9. presenta un resumen con la reducción de los SV en el ensayo batch 1.

3. Resultados y discusión

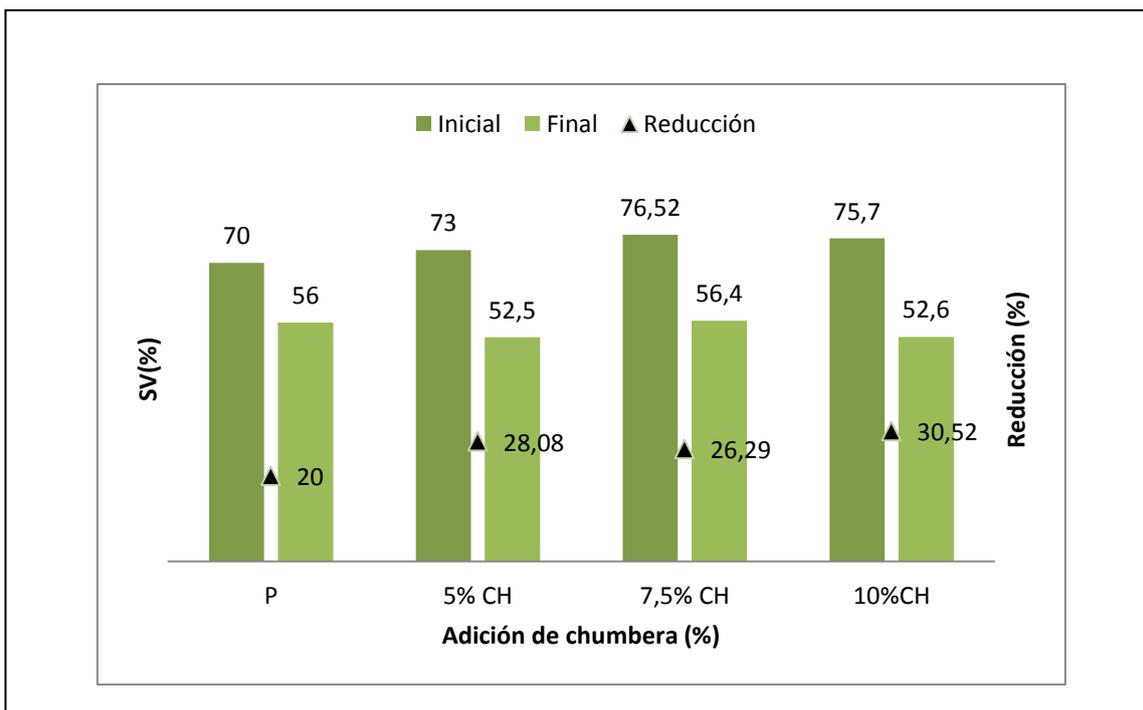


Fig. 3.9. Valores iniciales y finales de los SV en el ensayo batch 1

Al analizar estos valores también se observa que la reducción más alta de SV se presenta en la mezcla del 10% CH.

3.2.1.5 Variación de la DQO_T

La evolución de la DQO_T en el ensayo batch 1 se muestra en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Evolución de la DQO_T en el ensayo batch 1

Muestras No	P	5% CH	7,5% CH	10% CH
1	120.000±3.108	116.000±4.870	113.800±3.300	108.000±3.780
2	113.600±4.08	108.200±3.589	97.900±2.328	100.500±3.999
3	107.500±3.440	94.000±3.290	83.700±2.400	93.600±5.022
4	90.000±2.070	82.500±2.880	78.260±2.270	72.000±2.020

En cada experimento se observa reducciones escalonadas de la DQO_T. La Fig. 3.10 muestra un resumen con los porcentajes de eliminación de la DQO_T para cada experimento.

3. Resultados y discusión

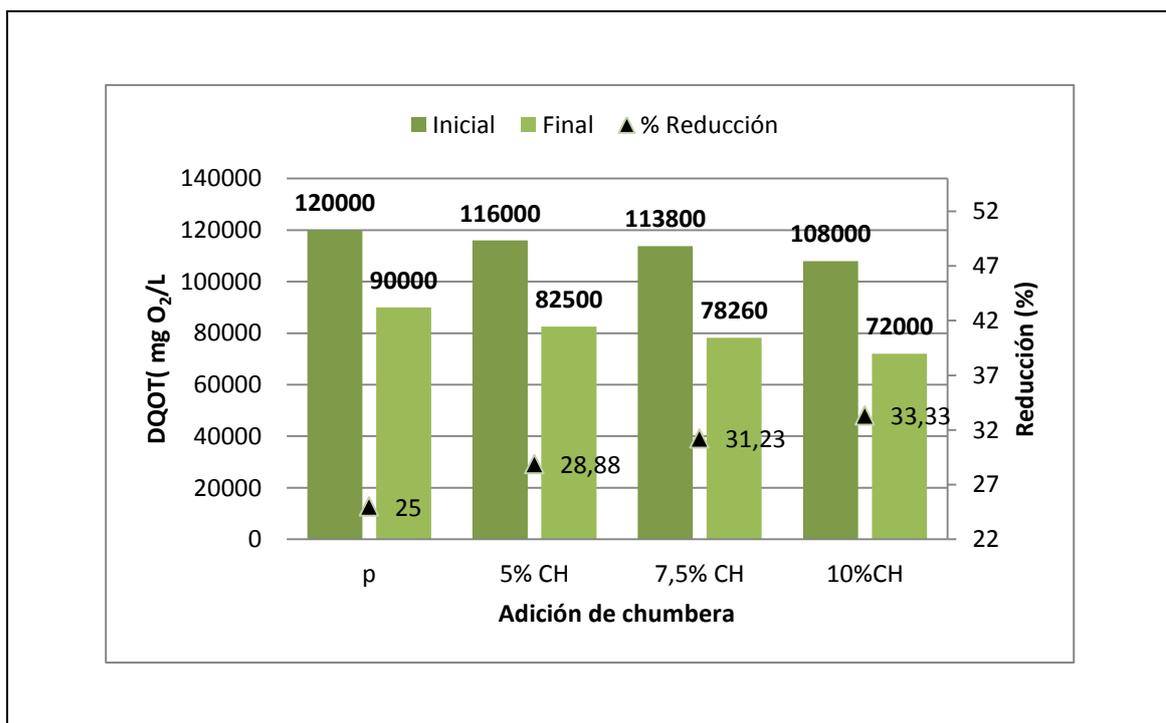


Fig. 3.10. Valores iniciales y finales de la DQO₇ en el ensayo batch 1

La codigestión del 10% CH, presenta los mejores resultados de eliminación de la DQO₇.

A continuación se presenta un estudio de ajuste cinético para evaluar la velocidad de producción de biogás para cada experimento.

3.2.1.6 Resultados de la aplicación del modelo cinético al ensayo batch 1

La Fig. 3.11 presenta la evolución del volumen de metano acumulado producido a lo largo del tiempo frente a la inversa del tiempo, para el purín y las distintas mezclas del ensayo batch 1.

3. Resultados y discusión

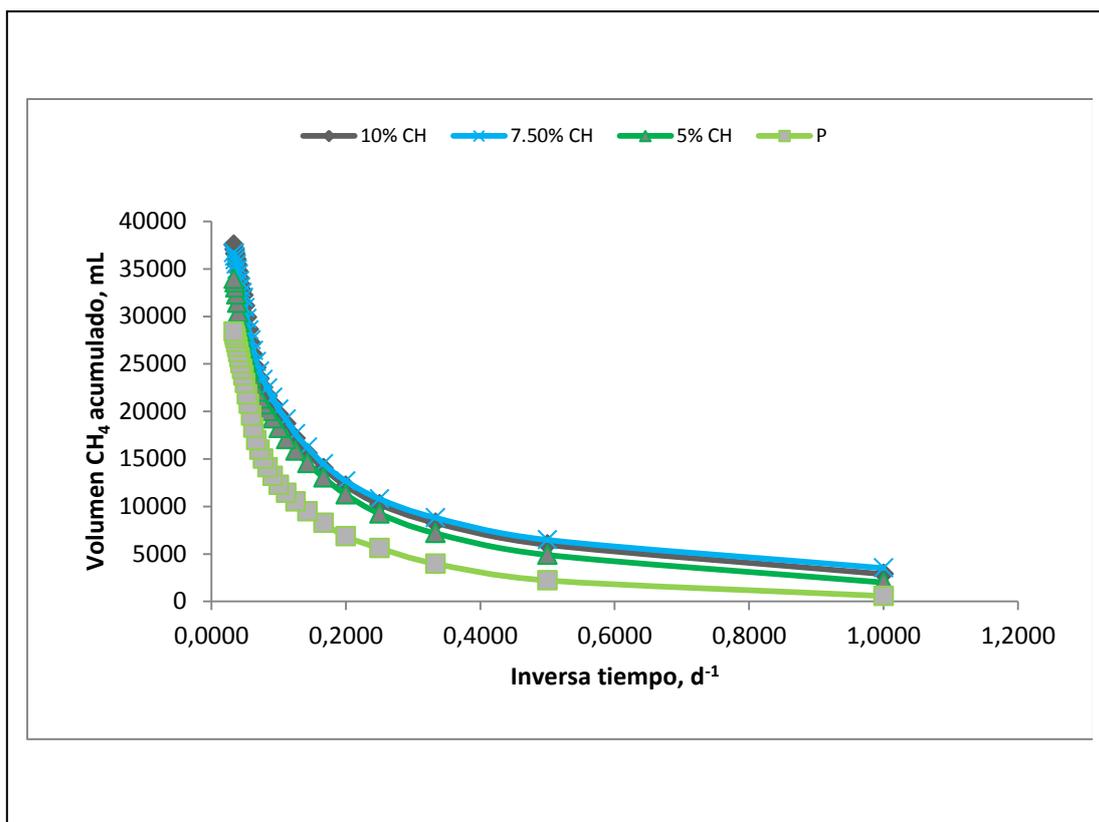


Fig. 3.11. Comparativa de los volúmenes de metano acumulado máximos en cada uno de los experimentos realizados en batch 1 y control.

Como se puede extraer de la Fig. 3.11 los volúmenes acumulados de metano más altos pertenecen a los experimentos realizados con un 7.5% CH y 10% CH en codigestión con los respectivos porcentajes de P a continuación se evaluarán las constantes cinéticas para cada experimento.

Las Figuras 3.12, 3.13 y 3.14 muestran los ajustes cinéticos de los resultados obtenidos en cuanto al volumen de metano producido, mediante una ecuación de primer orden.

3. Resultados y discusión

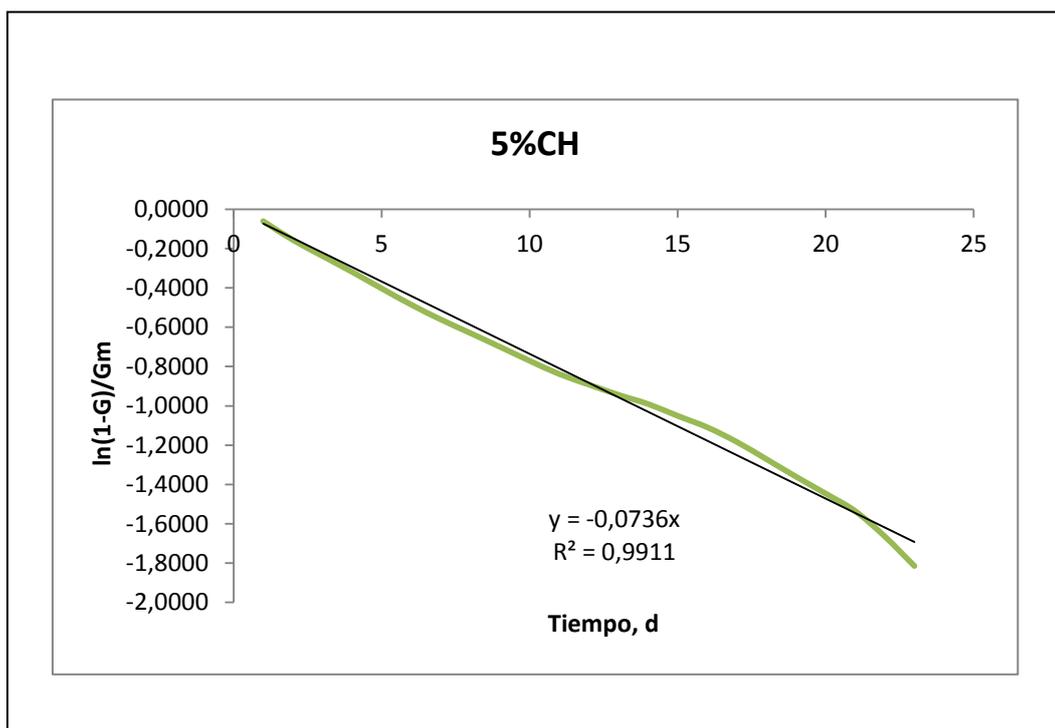


Fig. 3.12. Ajuste cinético de primer orden aplicado al volumen de metano producido en un experimento con una proporción de un 5% de chumbera.

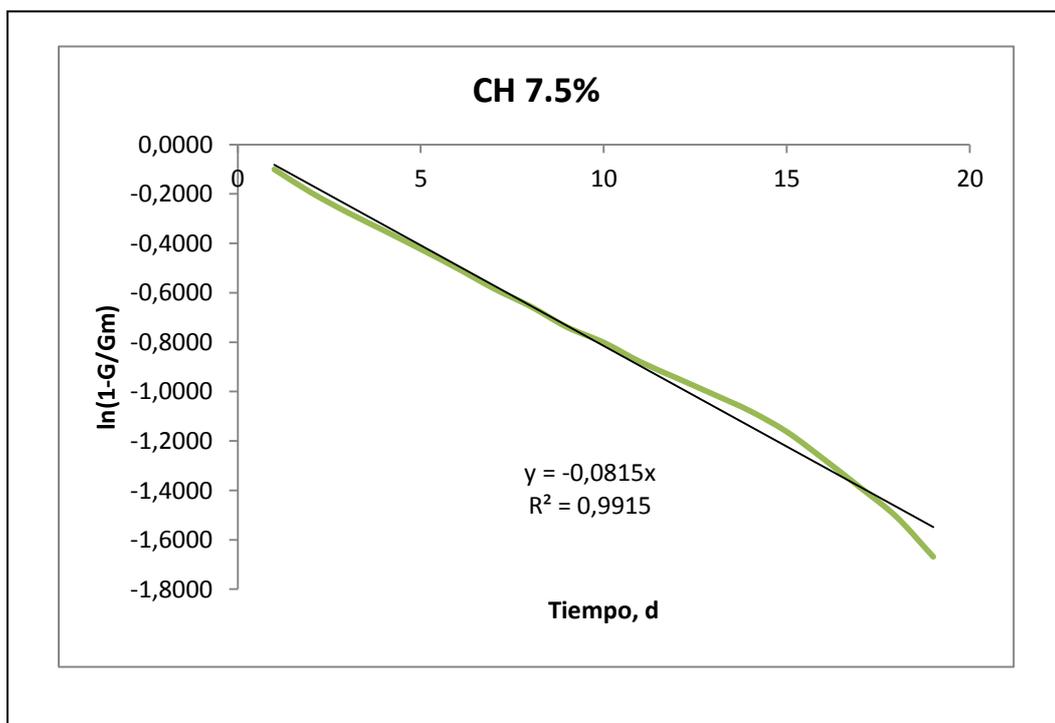


Fig. 3.13. Ajuste cinético de primer orden aplicado al volumen de metano producido en un experimento con una proporción de un 7.5% de chumbera.

3. Resultados y discusión

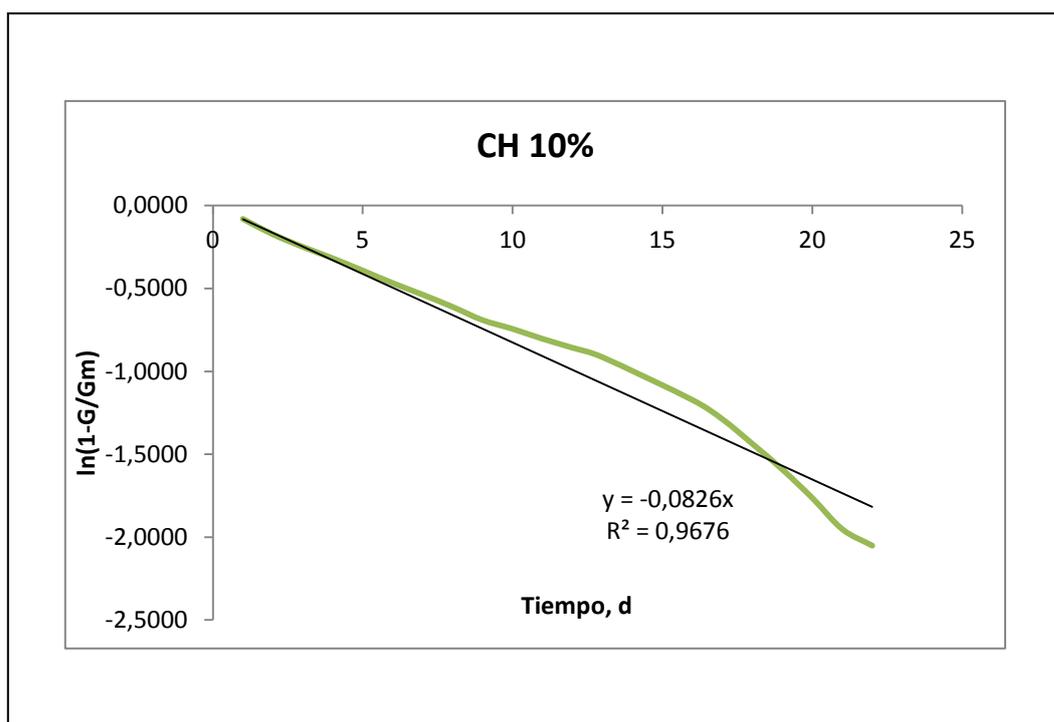


Fig. 3.14. Ajuste cinético de primer orden aplicado al volumen de metano producido en un experimento con una proporción de un 10% de chumbera.

Como se puede observar en los ajustes realizados, el valor de la constante cinética más elevado (valor de la pendiente de la recta que se presenta en cada experimento) se corresponde con el experimento batch del 10% CH y 90% P.

A continuación se presenta los resultados de la codigestión de purín con otras proporciones de chumbera.

3.2.2 Batch 2: Codigestión de purín y chumbera en proporciones de 15%, 30%, y 50%

La tabla 3.6. muestra el comportamiento de la codigestión de purín y la chumbera en proporciones de 15% 30%, 50%, se estudian los rendimientos de biogás y metano, variaciones en los ST, SV y DQO_T y la evolución del pH y potencial rédox. Se usó un THR de 20 días.

3. Resultados y discusión

Tabla 3.6. Resultados de la codigestión en el ensayo batch 2

	Purín 100%	15% chumbera	30% chumbera	50% chumbera
Biogás (mL)	32.375,69 ±1.302	50.817,19±1.900	69.047,62±5.500	47.359,38±1.780
Metano (mL)	18.777,90 ±544	32.523±1.340	43.500,±2.250	30.310±1.820
Metano (%)	58,00±2,9	64,00±2,7	63,00±3,2	64±2,8
ST inicial (%)	5,14±0,16	7,2±0,57	7,8±0,20	8±0,40
ST final (%)	4,07±0,28	4,86±0,25	4,35±0,21	6,19±0,36
Reducción en ST (%)	20,82±1,9	32,50±1,95	44,23±2,34	22,63±1,2
SV inicial (%)	65±2,83	62±3,2	63,6±3,1	65±2,92
SV final (%)	48,71±1,42	43,6±2,52	36,8±2,7	47,5±3,8
Reducción en SV	25,06±1,23	29,68±2,2	42,14±1,9	26,92±1,2
DQO inicial (mg O ₂ /L)	64.000 ±2,800	72.000±3.050	94.000±4.800	108.000±4.900
DQO final (mg O ₂ /L)	47.000±1.690	46.000 ±1.470	43.500±2.690	81.000±2.780
Reducciones en DQO _T (%)	26,56±1,02	36,11±2,1	53,72±2,7	25,12±1,34
Rendimiento en metano (L/kg SV)	102,19±5,27	132,47±8,4	159,43±6,5	105,98±7,8
Rendimiento en biogás (L/kg SV)	176,19±7,13	206,98±10,2	253,07±12,6	216,28±10,6

Al analizar la codigestion, con el 30% de chumbera, da lugar a los mejores valores de biogás y metano de (253,07±12,6 L/kg SV y 159,43±6,5 L/kg SV), respectivamente y con un porcentaje de metano del 63%.

Las reducciones de SV, DQO_T, ST, también son mayores en esta codigestión.

Al igual que en el ensayo anterior se realizará un estudio para determinar la constante cinética de cada proceso.

A continuación se analizará cada uno de los parámetros estudiados.

3. Resultados y discusión

3.2.2.1 Rendimiento de biogás y metano

Al igual que en el procedimiento anterior, para efecto de la discusión se considerarán las siguientes equivalencias:

P, corresponde al purín y CH corresponde a la chumbera.

15% CH, corresponde a 15% chumbera y 85% purín.

30% CH, corresponde a 30% chumbera y 70% purín.

50% CH, corresponde a 50% CH y % 50% purín.

La Fig. 3.15. muestra la evolución acumulada de metano durante el ensayo batch 2.

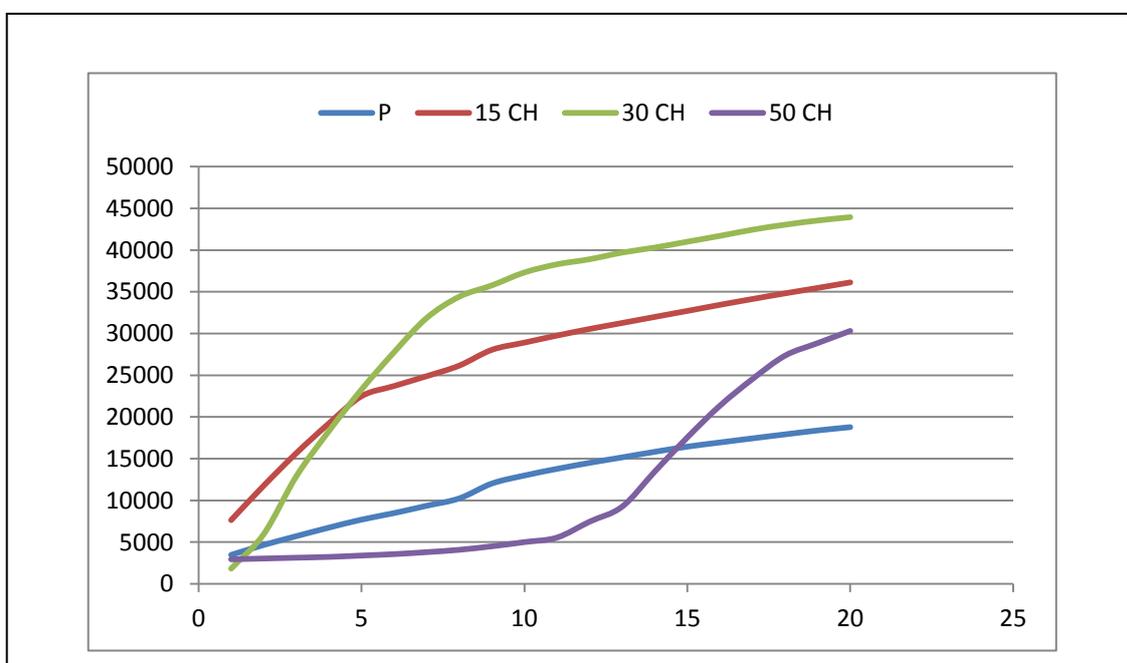


Fig. 3.15. Producción acumulada de metano en el ensayo batch 2

La producción acumulada de metano con 30% CH fue la mejor, se observa como al aumentar la cantidad de chumbera en la mezcla de 50% CH, bajan las producciones de biogás y el contenido porcentual de metano, como se muestra en la Fig. 3.16.

3. Resultados y discusión

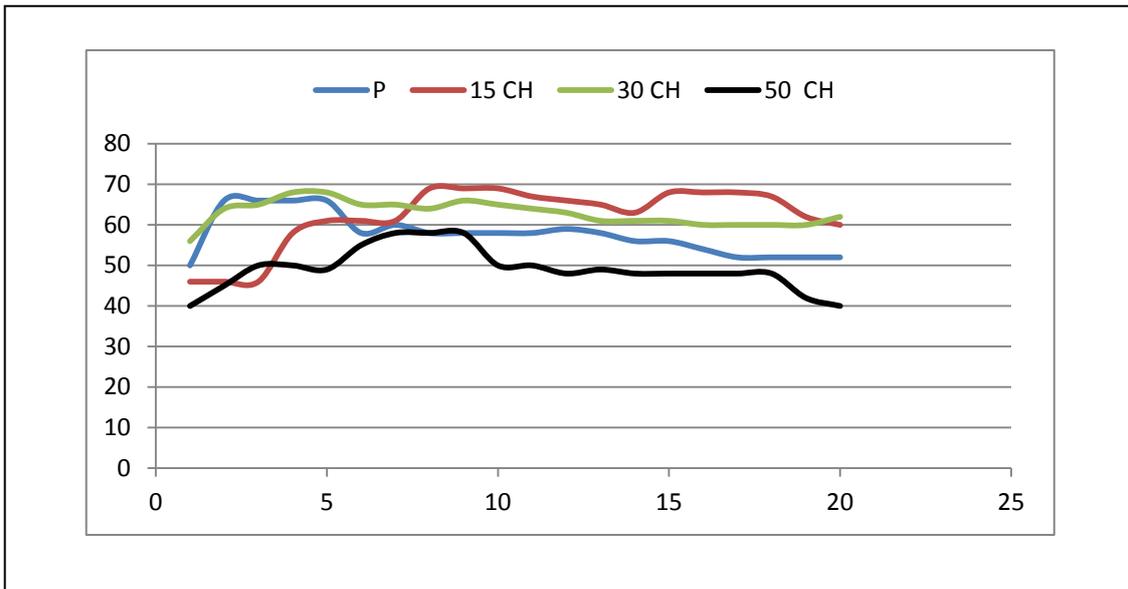


Fig. 3.16. % de metano durante el ensayo batch 2

Un resumen de los rendimientos de biogás y metano se muestran en la Fig. 3.17.

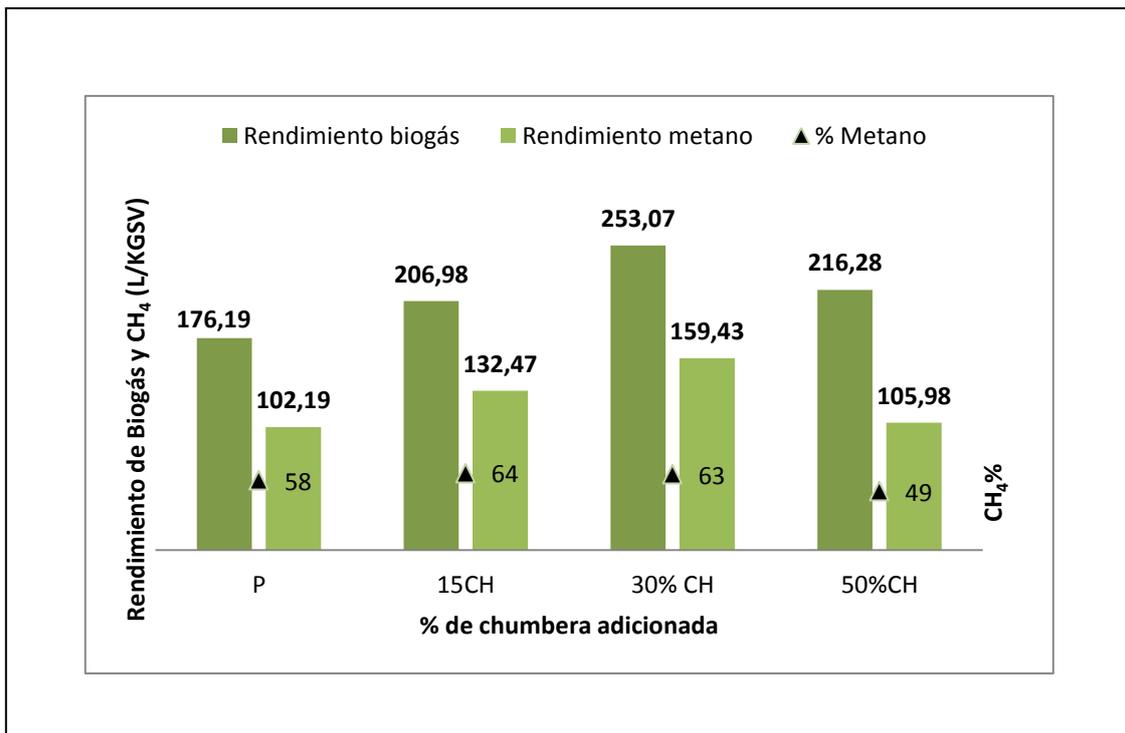


Fig. 3.17. Rendimientos de biogás y metano en el ensayo batch 2

Los mejores resultados se observa en la codigestión de 30% CH, el rendimiento adicional de metano con respecto a P es del 56%. Es un alto rendimiento, si se compara con experimentos realizados en codigestión de purines de vaca y sorgo, en

3. Resultados y discusión

los cuales los rendimientos con respecto al blanco alcanzaron hasta un 46% (Zhang et al, 2016).

Como anteriormente se había mencionado la mezcla de 50% CH y 50% P, baja los rendimientos y los porcentajes de metano (Fig 3.16), se puede estar presentando una saturación de carbono en la mezcla, dificultando el desarrollo de las bacterias metanogénicas. A continuación se estudiará la relación C/N de cada proceso y su efecto en el rendimiento final.

3.2.2.2 Efecto de la relación C/N en la productividad del proceso

La Fig. 3.18 muestra el efecto de la relación C/N en los rendimientos del ensayo batch 2.

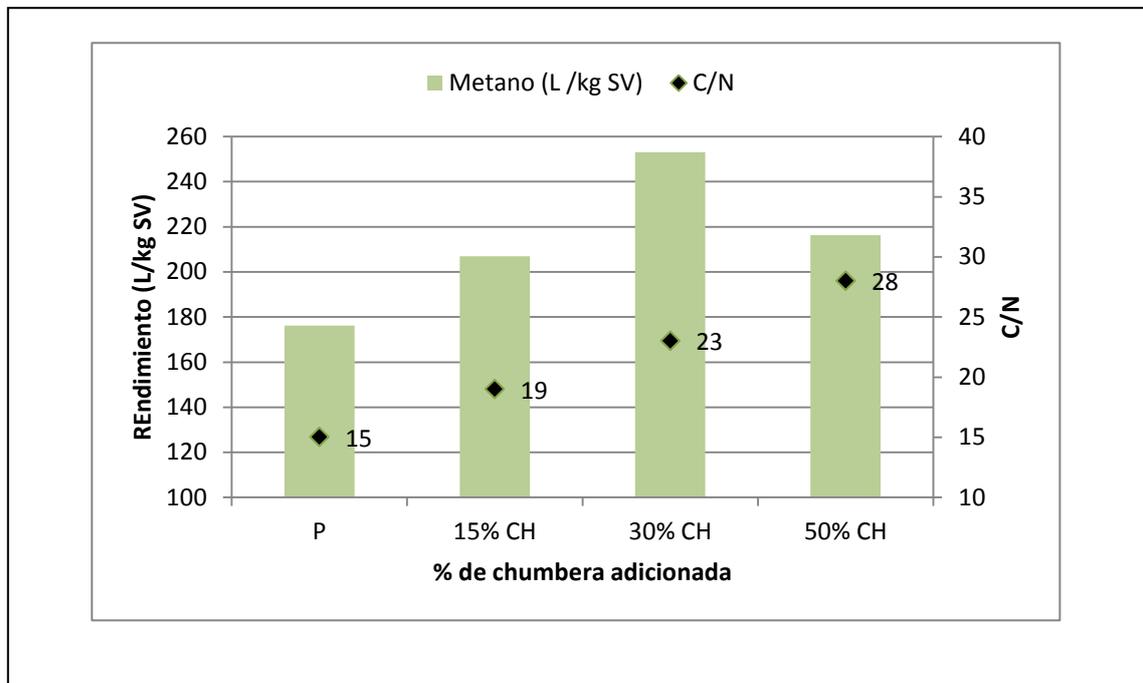


Fig. 3.18. Efecto del incremento de la relación C/N en los rendimientos de metano en el ensayo batch 2

Se aprecia que los incrementos en la relación C/N en 19% y 23% correspondiente a los ensayos 15% CH y 30% CH estimulan la actividad bacteriana, produciendo un aumento en el rendimiento de CH₄. Algunos autores indican que la relación C/N óptima es de 16:1 a 25:1 (Croce, 2016), Se observa que un aumento de la relación C/N, al 28% (50% CH), afectó negativamente el rendimiento de CH₄, corroborando la dificultad en el desarrollo de las bacterias metanogénicas, ya comentado.

3. Resultados y discusión

3.2.2.3 Evolución del pH y potencial rédox

El comportamiento del pH y el potencial rédox de los ensayos batch 2 se muestran en la Fig. 3.19 y 3.20 respectivamente.

El pH baja por debajo de 7 en el experimento CH 50%, en los demás se mantiene entre 7 y 8, lo cual evidencia que el incremento de la chumbera en porcentajes mayores del 30% acidifica el medio. Las muestras se toman cada 4 días.

Igual comportamiento tiene el potencial rédox, que se mantiene entre -300 y -400 mV, con excepción del experimento CH 50% que oscila entre -150 mV y -200mV, dificultando con ellos el desarrollo de las bacterias metanogénicas.

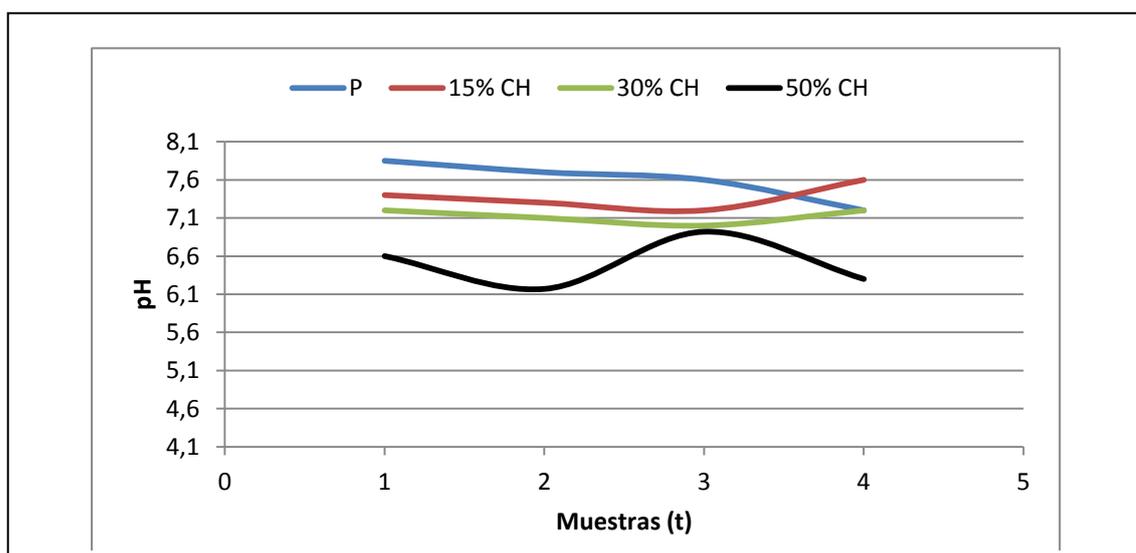


Fig. 3.19. Evolución del pH en el ensayo batch 2

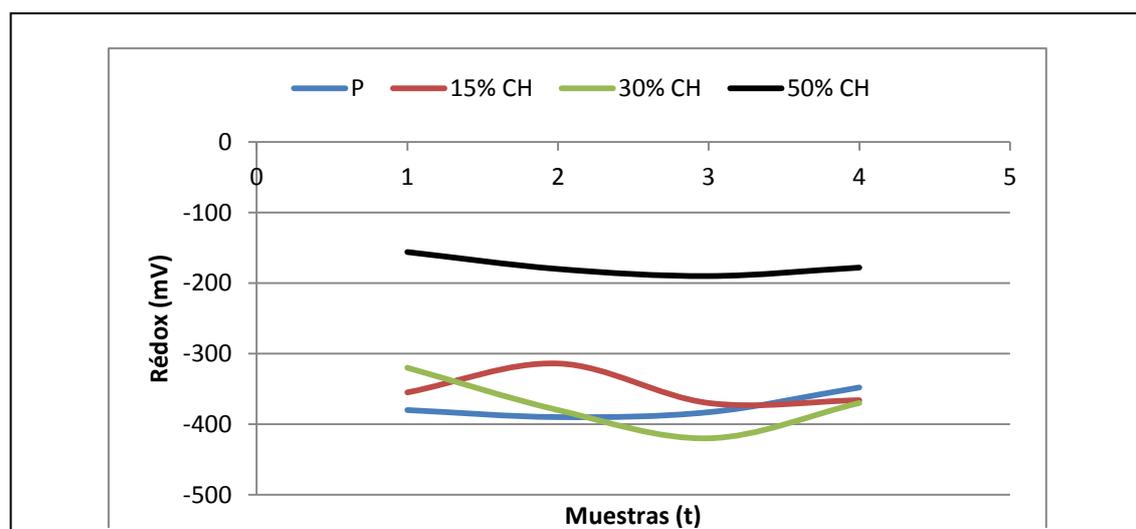


Fig. 3.20. Evolución del potencial rédox en el experimento batch 2

3. Resultados y discusión

3.2.2.4 Sólidos totales y sólidos volátiles

Las tablas 3.7 y 3.8 muestran la variaciones experimentadas de los ST y SV durante el ensayo batch 2.

Tabla 3.7. Evolución de los ST en el ensayo batch 2

Muestras No	P	15% CH	30% CH	50% CH
1	5,14±0,16	7,2±0,57	7,8±0,20	8±0,40
2	4,7±0,20	6,6±0,25	6±0,31	7,8±0,25
3	4,1±0,16	5,4±0,18	5,3±0,34	7,3±0,28
4	4,07±0,28	4,86±0,25	4,35±0,21	6,19±0,36

Tabla 3.8. Evolución de los SV en el ensayo batch 2

Muestras No	P	15% CH	30% CH	50% CH
1	65±2,83	62±3,2	63,6±3,1	65±2,92
2	60±3,10	56±3,0	52,3±1,8	60±2,9
3	52±2,95	50,4±2,6	40,3±4,5	49±2,10
4	48,71±1,42	43,6±2,52	36,8±2,7	47,5±3,8

La Fig. 3.21. y 3.22. muestran un resumen de las reducciones de los ST y SV, respectivamente.

3. Resultados y discusión

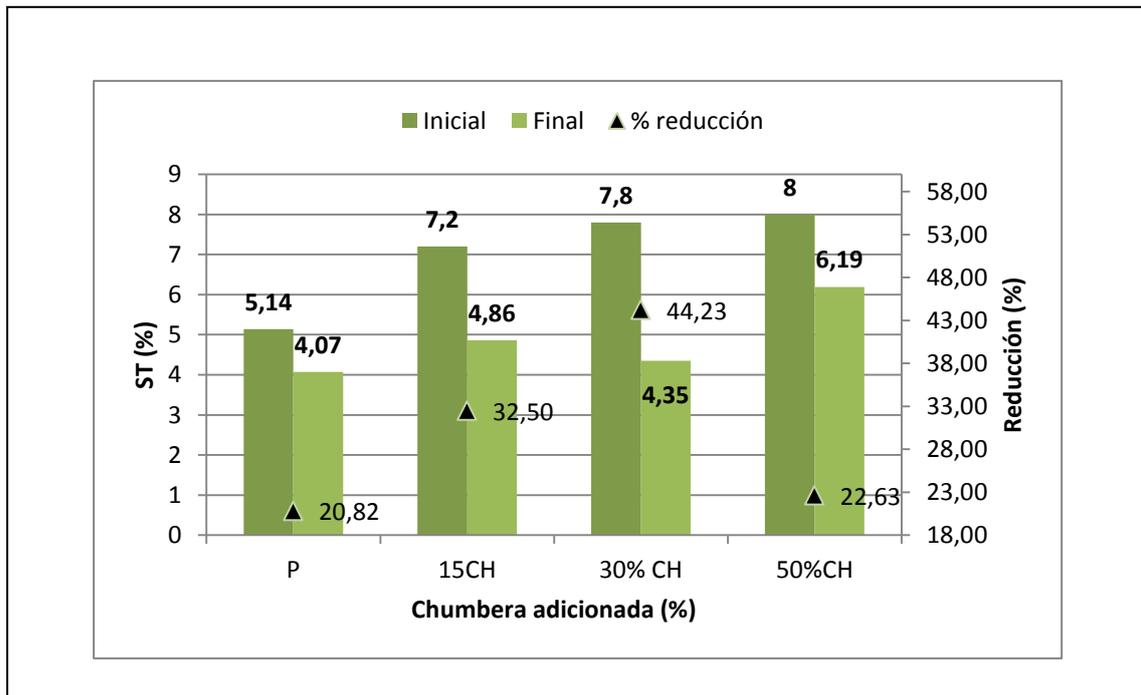


Fig. 3.21. Valores iniciales y finales de los ST en el ensayo batch 2

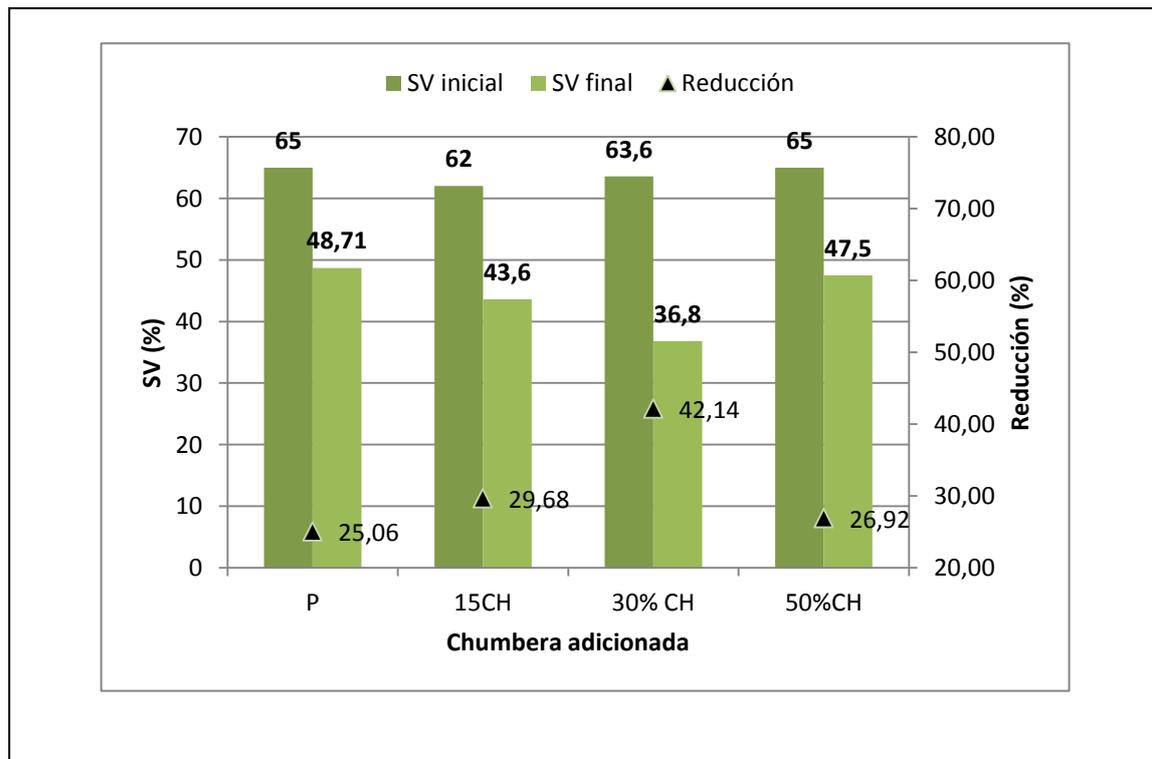


Fig. 3.22. Valores iniciales y finales de los SV en el ensayo batch 2

3. Resultados y discusión

En ambos parámetros, tanto en los ST y SV se observan disminuciones a lo largo del tiempo, la mayor reducción, con valores de 44.23% en ST y 42,14% en SV se dan en la codigestión de 30% CH.

3.2.2.5 Variación de la DQO_T

La evolución de la DQO_T en el ensayo batch 2 se muestra en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Evolución de la DQO_T en el ensayo batch 2

Muestras No	P	15% CH	30% CH	50% CH
1	64.000±2.800	72.000±3.050	94.000±4.800	10.8000±4.900
2	59.000±3.100	64.000±3.200	72300±1.800	94.000±2.400
3	52.000±3.005	50.800±2.600	54.000±1.900	80.000±3.9000
4	47.000±1.690	46.000±1.470	43.500±2.690	81.000±2.780

La mezcla 30% CH, mejora los rendimientos de biodegradabilidad con reducciones en la DQO_T del 53,72% con respecto a P. La Fig.3.23 muestra un resumen de los porcentajes de eliminación de la DQO_T para cada experimento.

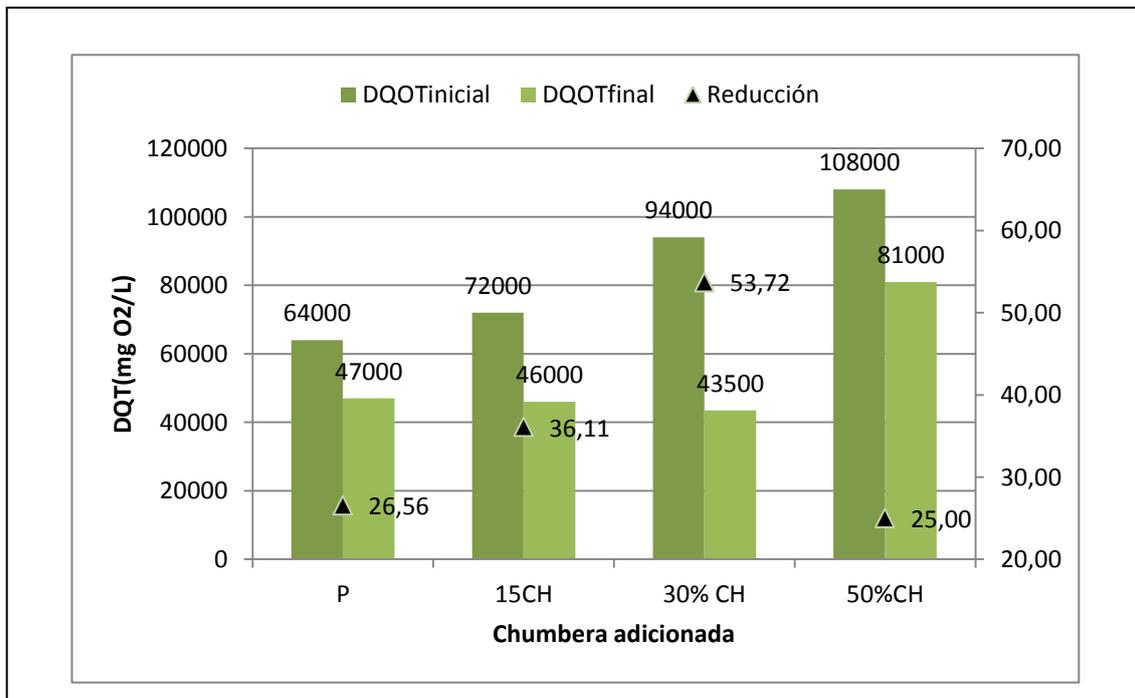


Fig. 3.23. Valores iniciales y finales de la DQO_T

3. Resultados y discusión

3.2.2.6 Resultados de la aplicación del modelo cinético al ensayo batch 2

La Fig. 3.24 representa la evolución con respecto a la inversa del tiempo, del volumen de metano acumulado. Se llevó a cabo en las proporciones de 15 %CH, 30% CH y 50% CH con respecto a P (control). Los valores de la mezcla 50% CH, proporciona producciones más bajas que las propias de un purín sin ser sometido a co-digestión. Por el contrario la mezcla del 30% CH da lugar a volúmenes muy elevados, considerándose como la proporción óptima de los experimentos realizados en el ensayo batch 2.

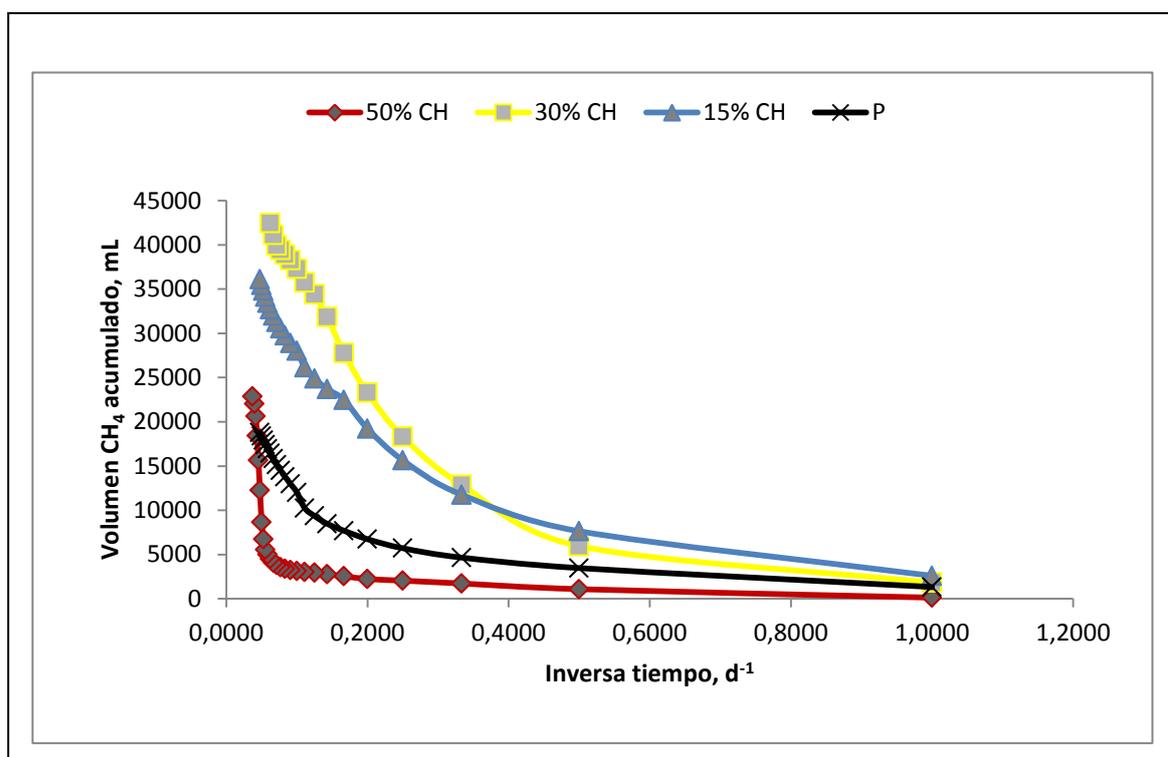


Fig. 3.24. Comparativa de los volúmenes de metano acumulado máximos en cada uno de los experimentos realizados en batch 2

Tal y como se puede deducir de la Figura 3.24, la constante cinética extraída de los ajustes realizados en los volúmenes de metano resulta más elevada en la mezcla con el 30% CH. Los ajustes cinéticos a la ecuación de primer orden para cada uno de los experimentos del ensayo batch 2 se pueden observar en las Figuras 3.25, 3.26 y 3.27.

3. Resultados y discusión

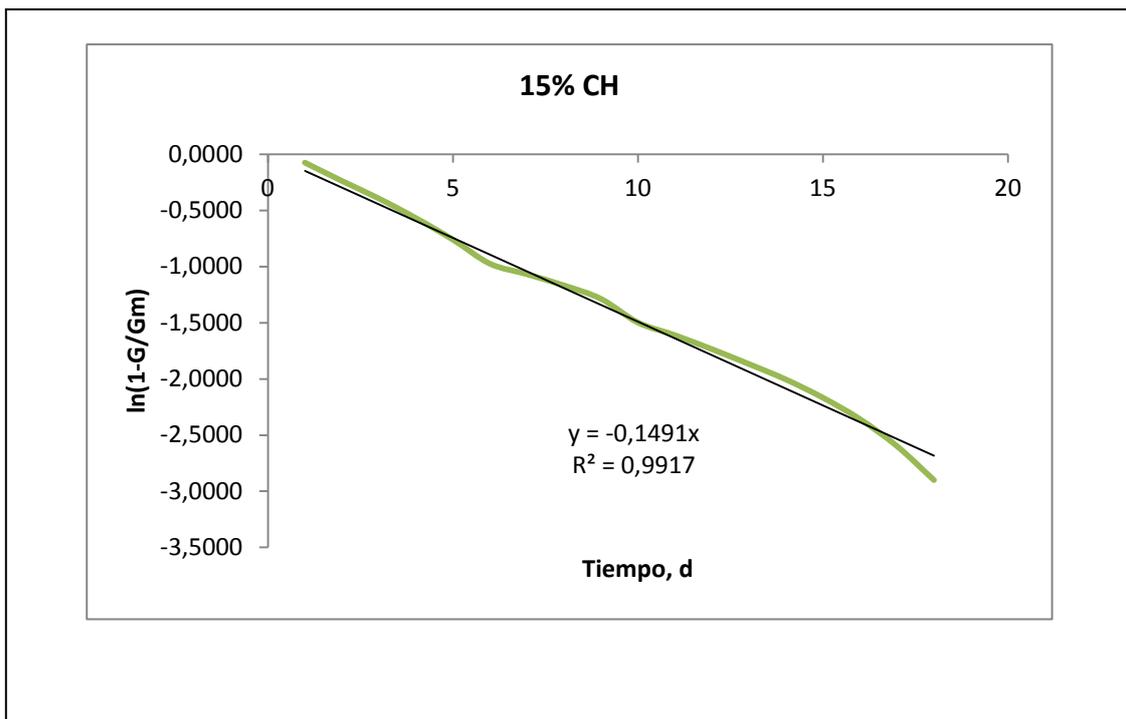


Fig. 3.25. Ajuste cinético de primer orden aplicado al volumen de metano producido en un experimento con una proporción de un 15% CH

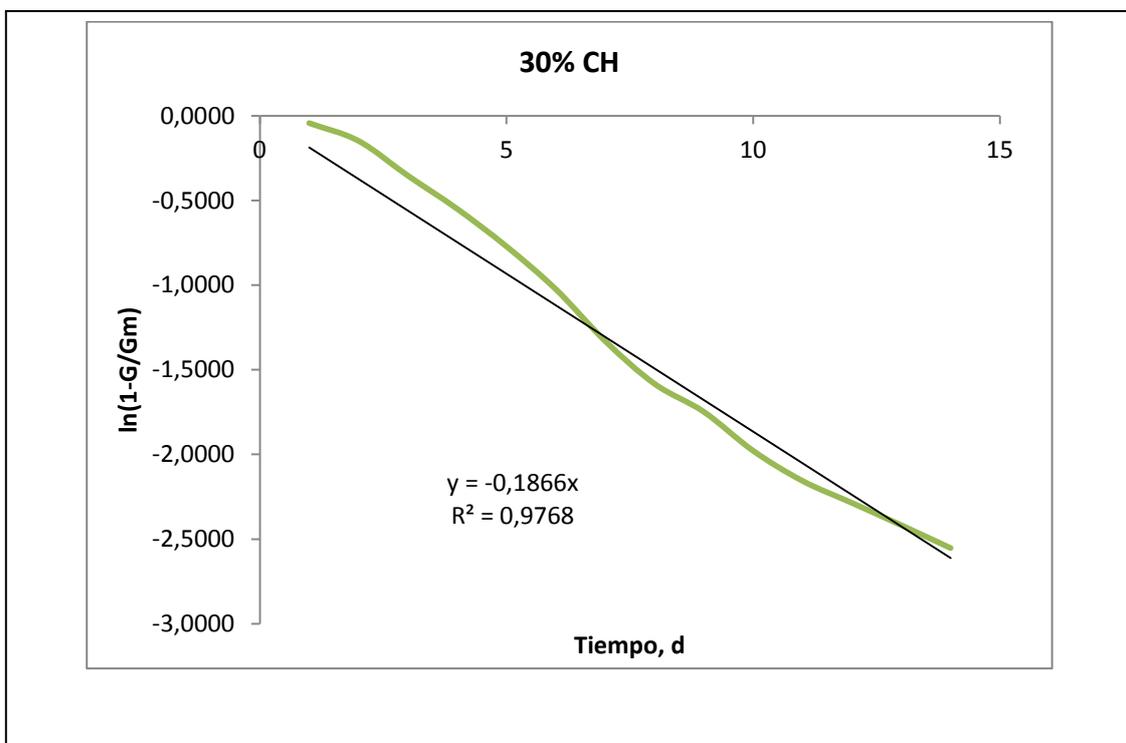


Fig. 3.26. Ajuste cinético de primer orden aplicado al volumen de metano producido en un experimento con una proporción de un 30% CH

3. Resultados y discusión

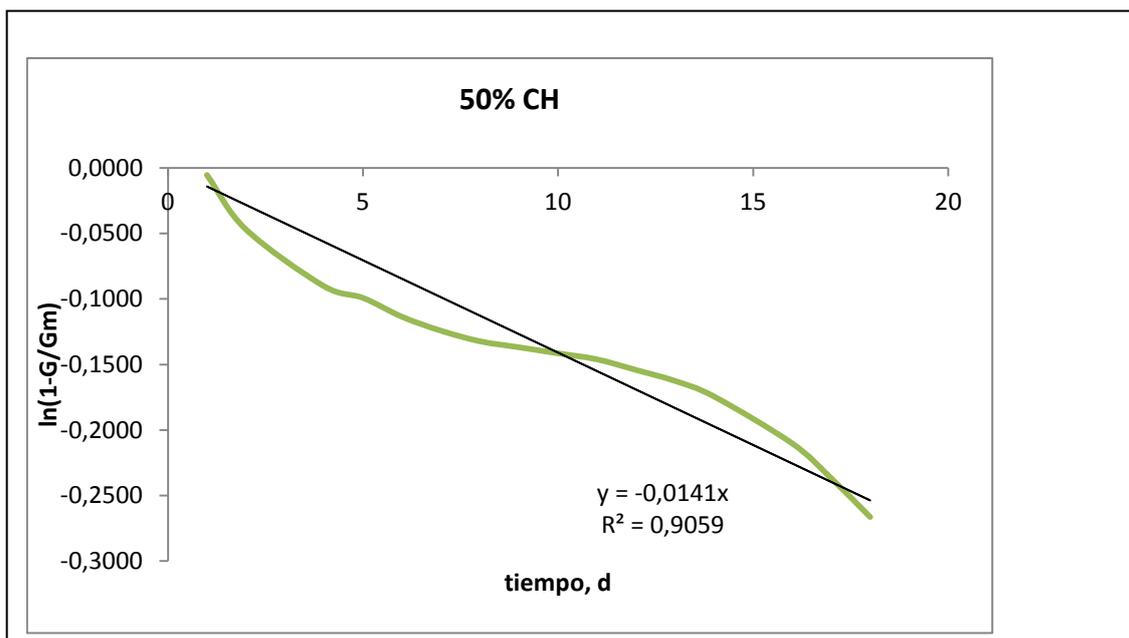


Fig. 3.27. Ajuste cinético de primer orden aplicado al volumen de metano producido en un experimento con una proporción de un 50% CH.

La tabla 3.10. presenta las constantes cinéticas obtenidas a partir de un ajuste cinético de primer orden adaptado al volumen de metano producido para cada uno de los experimentos realizados en los ensayos de batch 1 y 2.

Tabla 3.10. Constantes cinéticas obtenidas en todos los experimentos batch.

Experimento	Constante cinética (k), d ⁻¹	R ²
Purín (batch 1)	0.0591	0.9891
5% chumbera	0.0736	0.9911
7.5% chumbera	0.0815	0.9915
10% chumbera	0.0826	0.9676
Purín (batch 2)	0.0877	0.9954
15% chumbera	0.1491	0.9917
30% chumbera	0.1866	0.9768
50% chumbera	0.0141	0.9059

3. Resultados y discusión

La constante cinética más favorable para la generación de metano corresponde al experimento batch con 30% CH. Este valor se encuentra entre valores altos comparados con los obtenidos por algunos autores, como es el caso de estudios realizados para mezclas de microalgas y residuos de comida que se sitúan en un intervalo de 0.187-0.089 d⁻¹ (Zhen et al, 2016). Por otro lado, constantes cinéticas de 0.05-0.08 d⁻¹ son las establecidas para purines de cerdo (Rodríguez & Lomas, 1999), tal y como se muestra en la tabla para los experimentos de digestión anaerobia de purín de cerdo en batch 1 y batch 2. Los purines de cerdo usados en este trabajo han dado lugar a constantes cinéticas de generación de metano que se encuentran en el extremo alto (batch 2) y en el extremo bajo (batch 1). En cuanto a constante cinética, se puede observar como en ambos casos una pequeña cantidad de chumbera acelera el proceso de digestión anaerobia.

A continuación se van a mostrar los resultados obtenidos en el proceso de codigestión en semicontinuo, partiendo de 100% purín y agregando chumbera en distintas proporciones.

3.3 Experimento en semicontinuo: Purín+chumbera

En esta sección se estudiará el comportamiento de la chumbera en semicontinuo. Para ello se partió de un nuevo purín o control. La Tabla 3.11 muestra el resumen de este experimento.

Tabla 3.11. Resultados del batch 3

	Purín 100%
Biogás (ml)	3.248,00±242
Metano (ml)	869,00±62
Metano (%)	26,75±0,3
ST inicial (%)	2,2±0,15
ST final (%)	1,46±0,1
Reducción en ST	33,64±2,95
SV inicial (%)	44,44±3,5
SV final (%)	34,19±2,9
Reducción en SV	23,06±1,8
DQO inicial (mg O ₂ /L)	9.860,00±852
DQO final (mg O ₂ /L)	6.250,00±682
Reducciones en DQO _T	36,61±3,4
Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	11.800±814,2
Rendimiento en metano	21,16±1,5

3. Resultados y discusión

La producción de biogás y metano se muestra en la Figura 3.28.

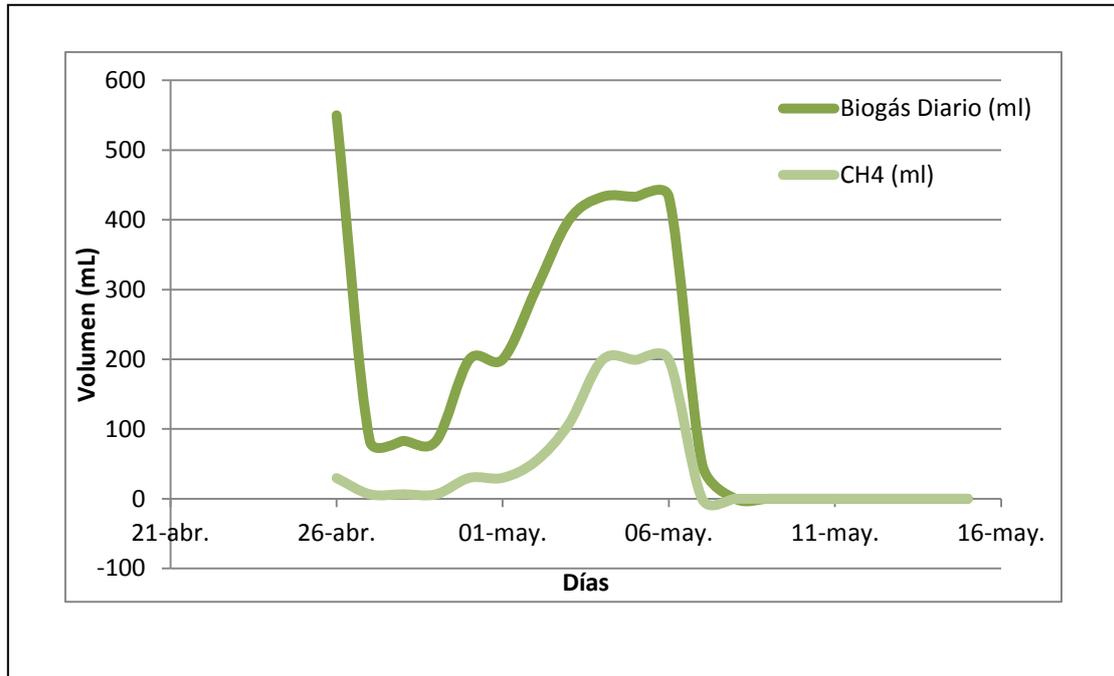


Fig. 3.28. Producción de biogás y metano en el ensayo batch 3

Como se observa es un ensayo con bajas producciones de biogás y metano. El THR fue de 11 días. La producción acumulada de metano se muestra en al Figura 3.29.

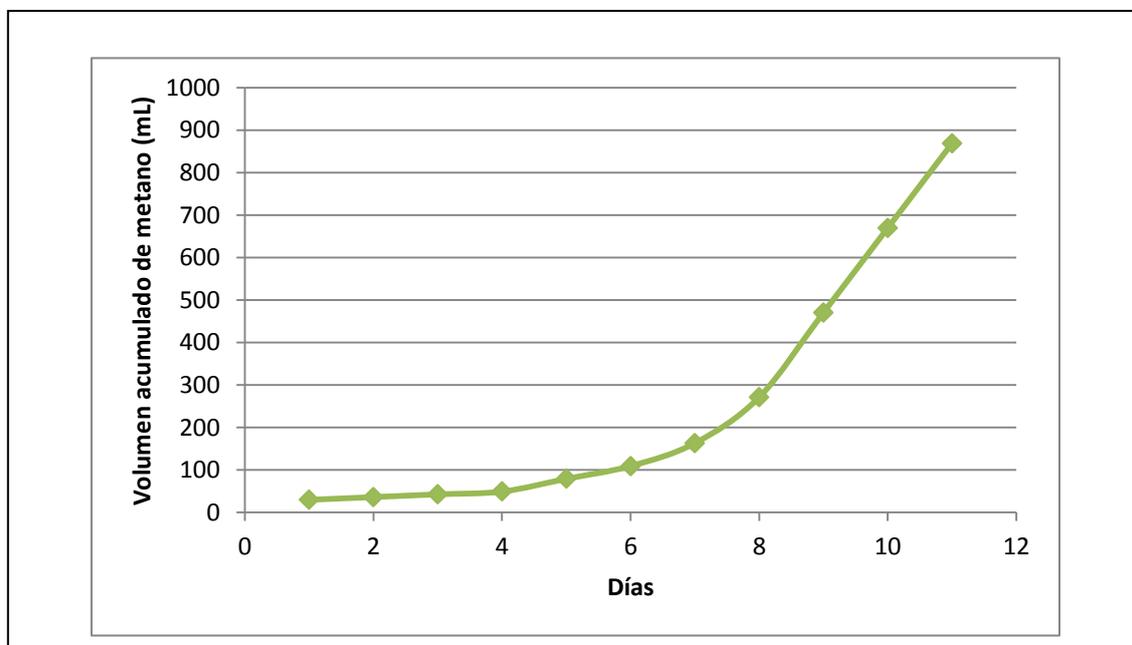


Fig. 3.29. Producción acumulada de metano en el ensayo batch 3

3. Resultados y discusión

El porcentaje de metano contenido en el biogás se muestra en la Figura 3.30.

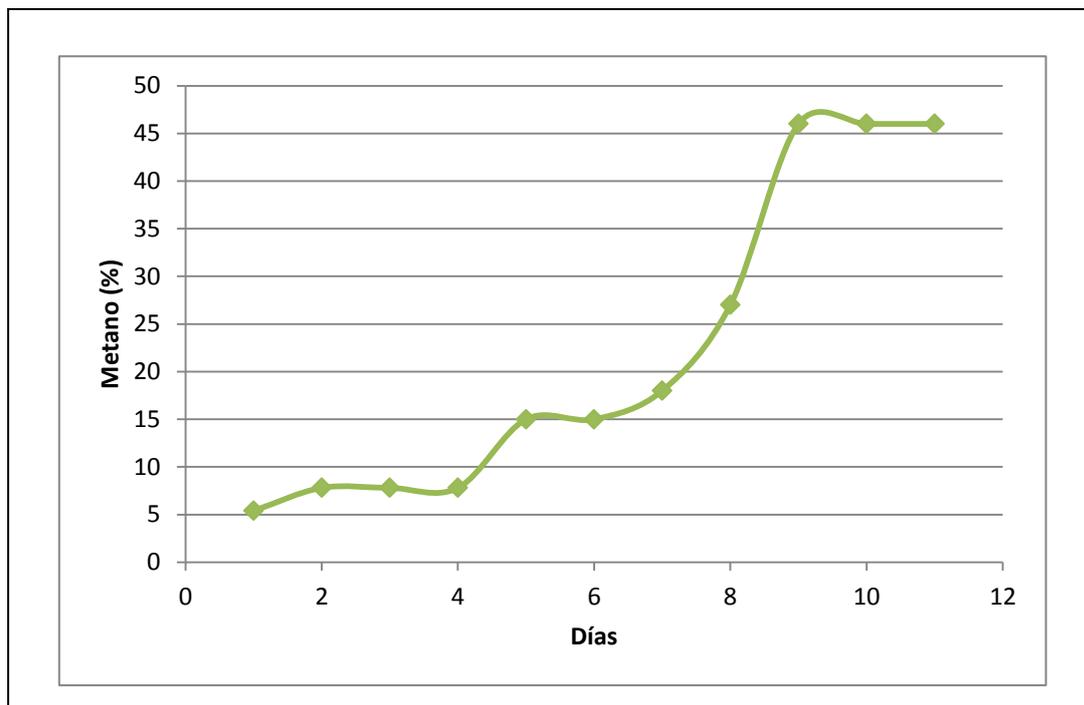


Fig. 3.30. % de metano durante el ensayo batch 3

Los porcentajes bajos de metano menores del 50%, no lo hacen aprovechable energéticamente.

3.3.1 Control de parámetros del batch 3

El comportamiento del pH y el potencial rédox se muestra en la Figura 3.31.

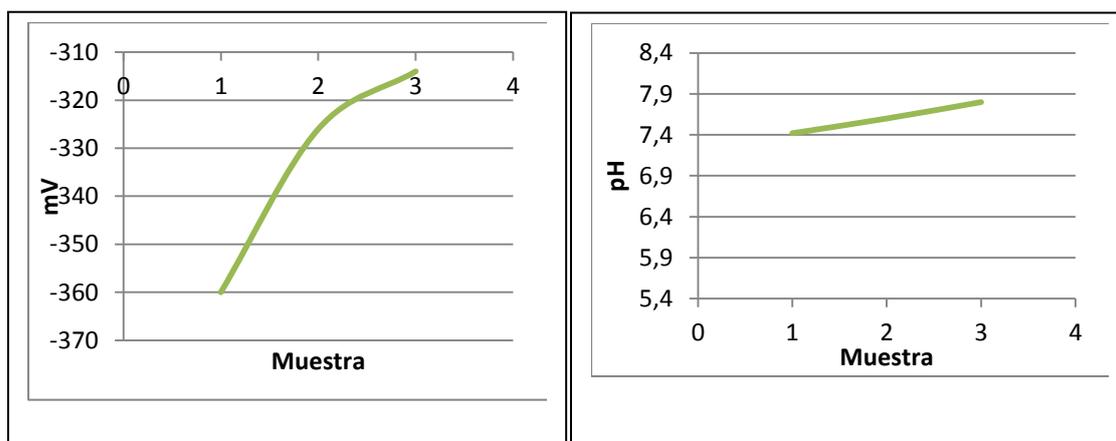


Fig. 3.31. Evolución del pH y el potencial rédox

La evolución de los ST y SV se muestran en la Figura 3.32.

3. Resultados y discusión

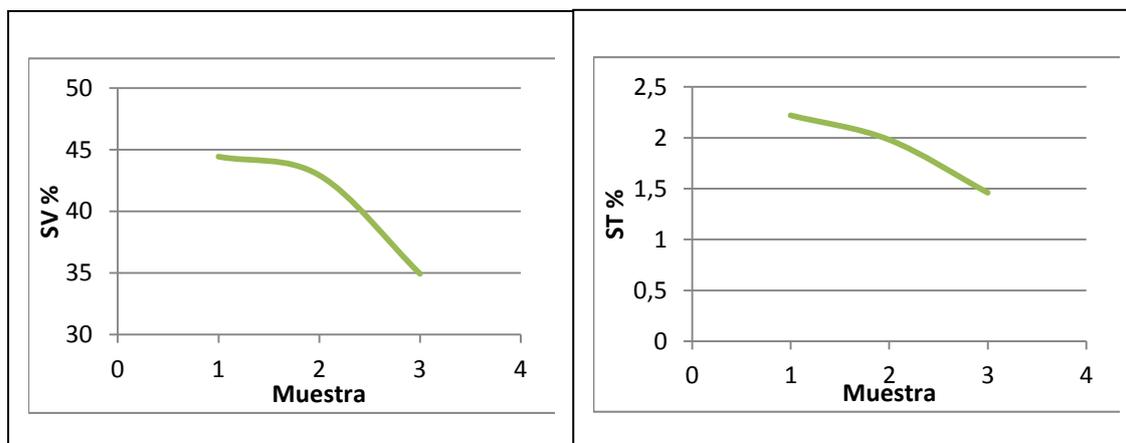


Fig. 3.32. Evolución de los SV y ST del ensayo batch 3

Los SV y ST presentaron un descenso de 23% y 35%, respectivamente.

Por último en la Figura 3.33 se presenta la reducción de la DQO_T .

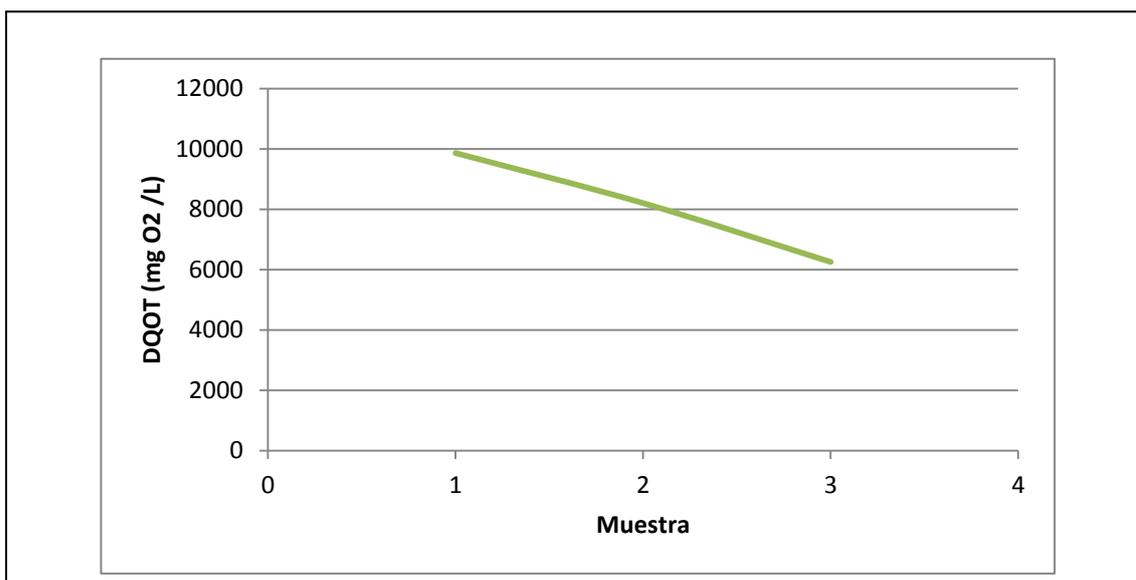


Fig. 3.33. Evolución de la DQO_T del ensayo batch 3

En términos generales se puede decir que es un purín con muy malas características, con rendimientos muy por debajo de los estándares que se utilizan para estos fines. A continuación se estudiará el efecto que produce la chumbera, en un proceso en semicontinuo.

3. Resultados y discusión

Teniendo en cuenta que el THR del purín fue de 11 días, los procesos en semicontinuo se diseñaron de forma que a partir del día 12 se comenzó a introducir la chumbera. El procedimiento que se siguió fue el siguiente:

- Se inició con una velocidad de carga orgánica (VCO) de 0.23 g SV/Ld, y se fue ascendiendo con 0,48 g SV/Ld, 0,71 g SV/Ld, 0,95 g SV/Ld y 1,19 g SV/Ld.
- Con cada VCO se estudiaba la variación en la producción de biogás, metano, rendimientos, SV, ST, DQO_t, pH y potencial rédox.
- Los cambios en la VCO se realizaban cuando no se producían variaciones en la producción.
- Se realizó un estudio preliminar cuyo objetivo era determinar la VCO que sobresaturara el proceso y las que produjeran los mejores rendimientos.
- Con los resultados anteriores se diseñó un estudio en semicontinuo con un THR de 20 días, y las VCO que den mayores rendimientos, con el fin de extrapolar los resultados a la planta de purines.

3.3.2 Producción de metano en el ensayo semicontinuo (1)

Corresponde al ensayo preliminar, por lo tanto se siguió la secuencia de un proceso semicontinuo durante 145 días, con diferentes VCO (Figura 3.34).

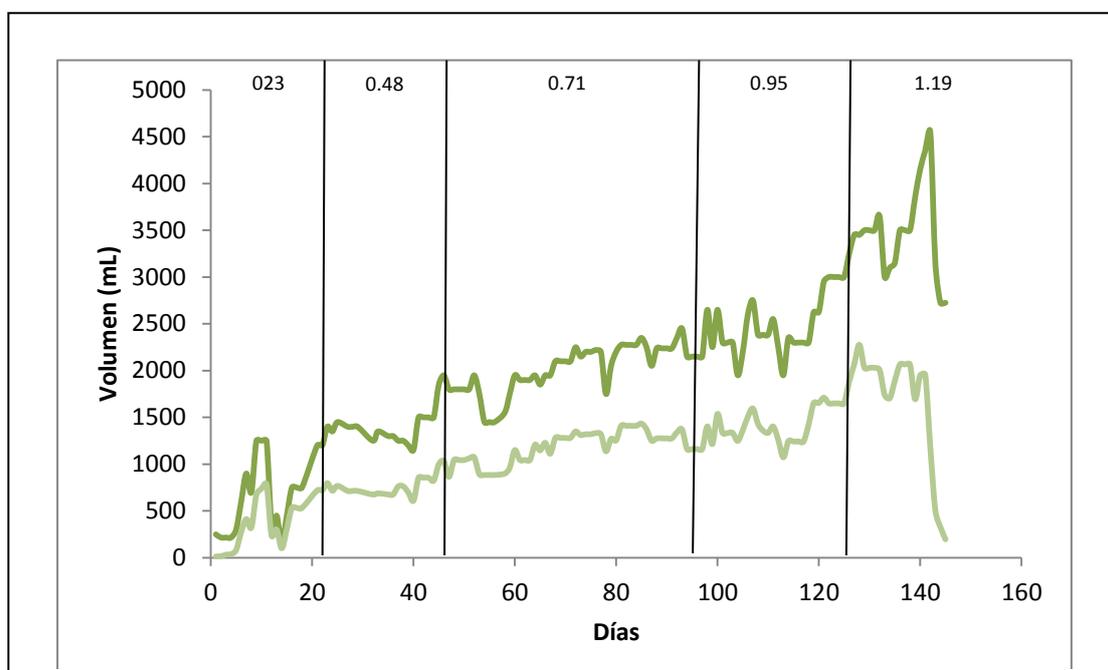


Fig. 3.34. Producción de biogás y metano en el ensayo semicontinuo (1)

3. Resultados y discusión

Se observa que en la medida que se va aumentando la VCO se incrementa la producción de biogás y metano hasta que llega a 1.19 g SV/Ld, donde se inicia un descenso de la producción, llegando a detenerse el proceso. La Figura 3.35 muestra los porcentajes de metano.

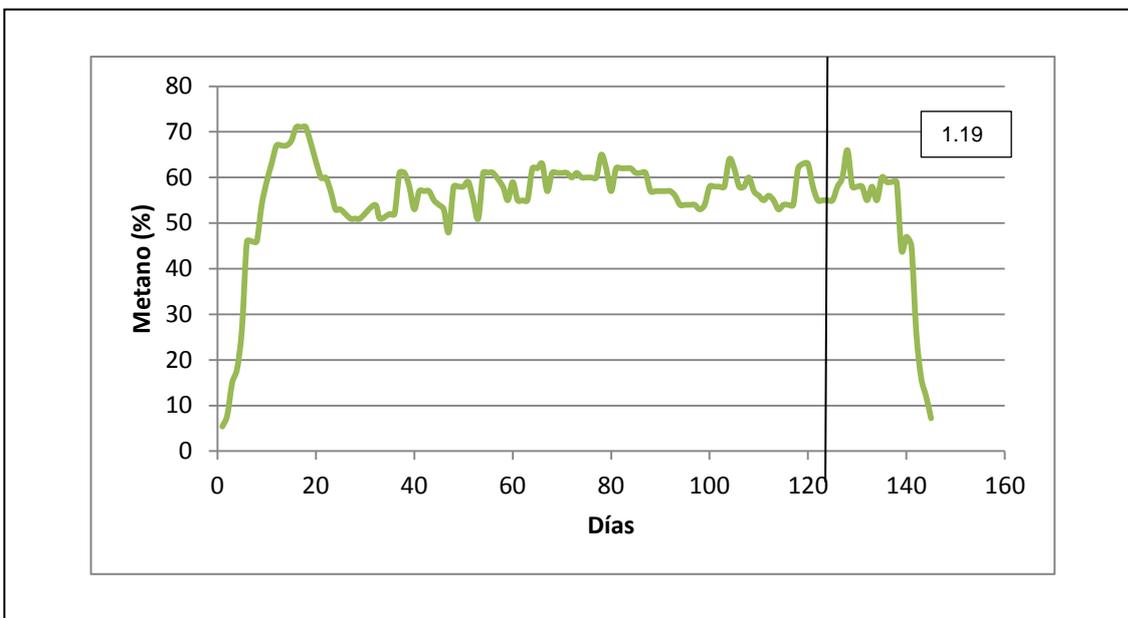


Fig. 3.35. % de metano en el ensayo en semicontinuo (1)

Como se observa, el porcentaje de metano oscila entre el 50% y el 60% a lo largo de todo el proceso y desciende en el periodo que se le adiciona 1.19 g.SV/Ld.

La Tabla 3.12 muestra un resumen con las producciones de biogás y metano, el % de metano, THR para cada VCO.

Tabla 3.12. Resumen de las producciones de biogás y metano

VCO (g SV/Ld)	Biogas (L)	CH ₄ (L)	CH ₄ (%)	TR (días)	Biogás/día (L)	CH ₄ /día (L)
0,23	3,65	2,54	69,59	7	0,521	0,363
0,48	34,35	18,525	53,93	26	1,321	0,713
0,71	62,57	36,471	58,29	33	1,896	1,105
0,95	113,701	65,599	57,69	48	2,369	1,367
1,19	69,55	33,671	48,41	20	3,478	1,684
total	283,821	156,773	55,24	134		

Los resultados obtenidos evidencian que la VCO de 0.95 g SV/Ld tiene las mejores producciones de biogás y metano, la VCO de 1.19 g SV/Ld aunque produce gran

3. Resultados y discusión

cantidad de biogás y metano de forma inicial después se van disminuyendo las producciones hasta que se detiene el proceso, indicando que las cantidades añadidas superan su capacidad de degradación.

A continuación se estudiarán los parámetros de control.

3.3.3 Parámetros de control en el ensayo en semicontinuo (1)

La Figura 3.36. muestra la variación de la DQO_T a lo largo del experimento.

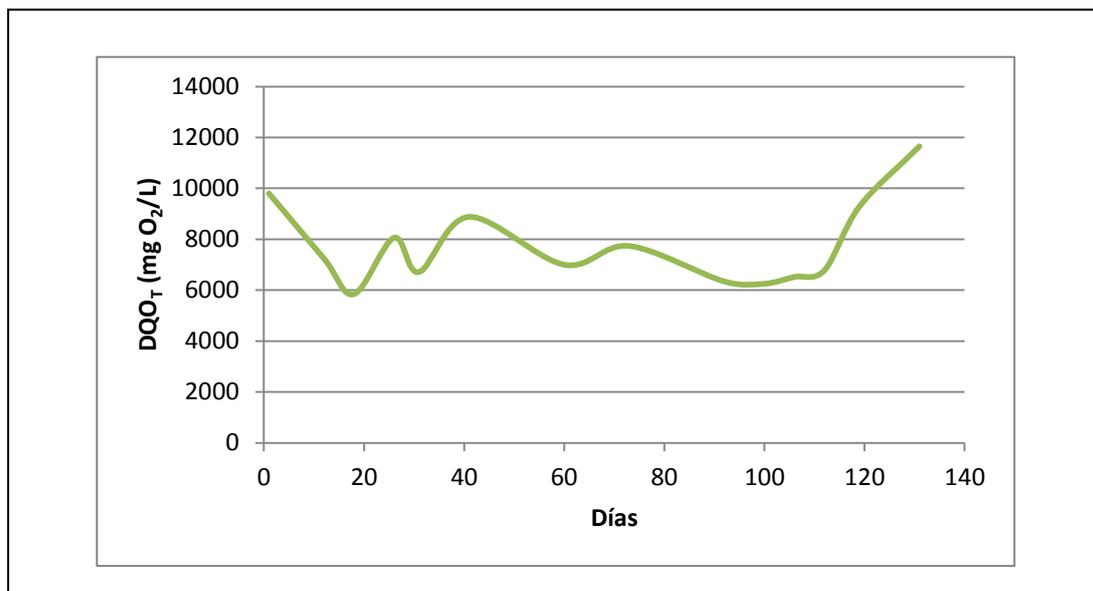


Fig. 3.36. Evolución de la DQO_T en el ensayo semicontinuo (1)

Se observa que los valores de la DQO_T oscilan entre 6.000 y 10.000 mg O_2 /L, las subidas corresponden a las entradas de sustrato y las bajadas se relacionan con la degradación de la mezcla en el digestor y la producción de biogás. Se nota que al final del proceso con la carga de 1.19 g SV/Ld se va acumulando el sustrato y produce una subida lineal de la DQO_T .

Las Figuras 3.37 y 3.38 muestran las variaciones de los ST y SV a lo largo del tiempo, respectivamente.

3. Resultados y discusión

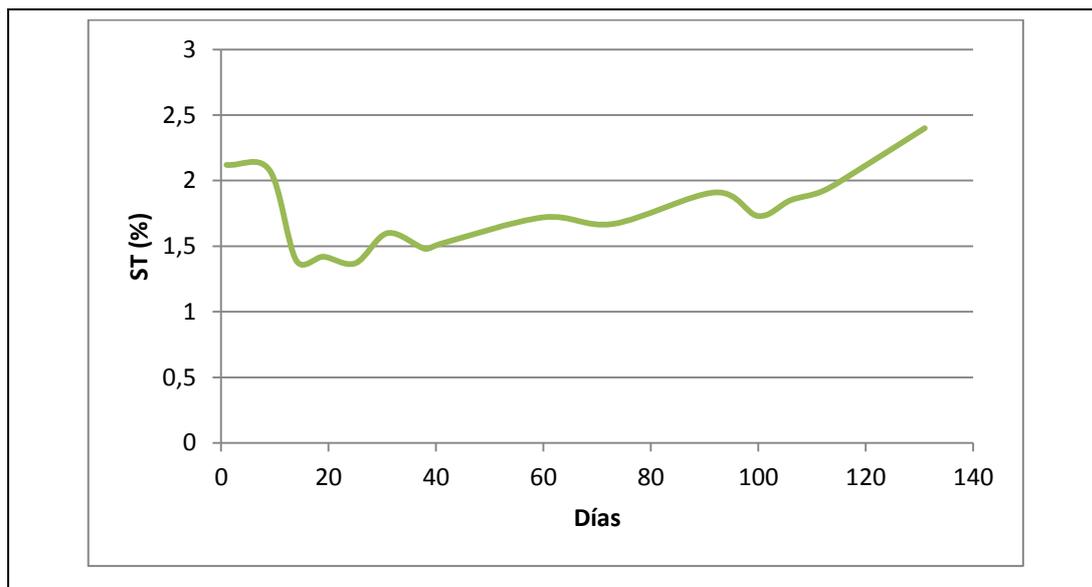


Fig. 3.37. Evolución de los ST en el ensayo semicontinuo (1)

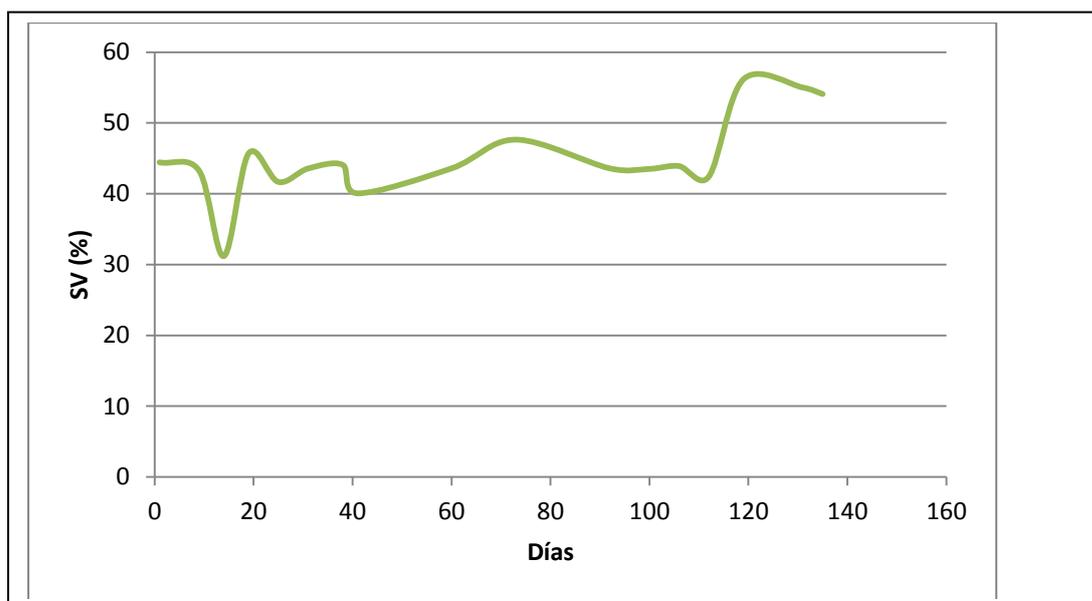


Fig. 3.38. Evolución de los SV en el ensayo semicontinuo (1)

Estos dos parámetros tienen el mismo comportamiento de la DQO_T , con subidas que se relacionan con la materia orgánica que entra y bajadas con la materia orgánica que se degrada cuando se produce el biogás.

Las Figura 3.39 y 3.40 muestran las evoluciones del pH y el potencial redox a lo largo del tiempo que duró el experimento, respectivamente.

3. Resultados y discusión

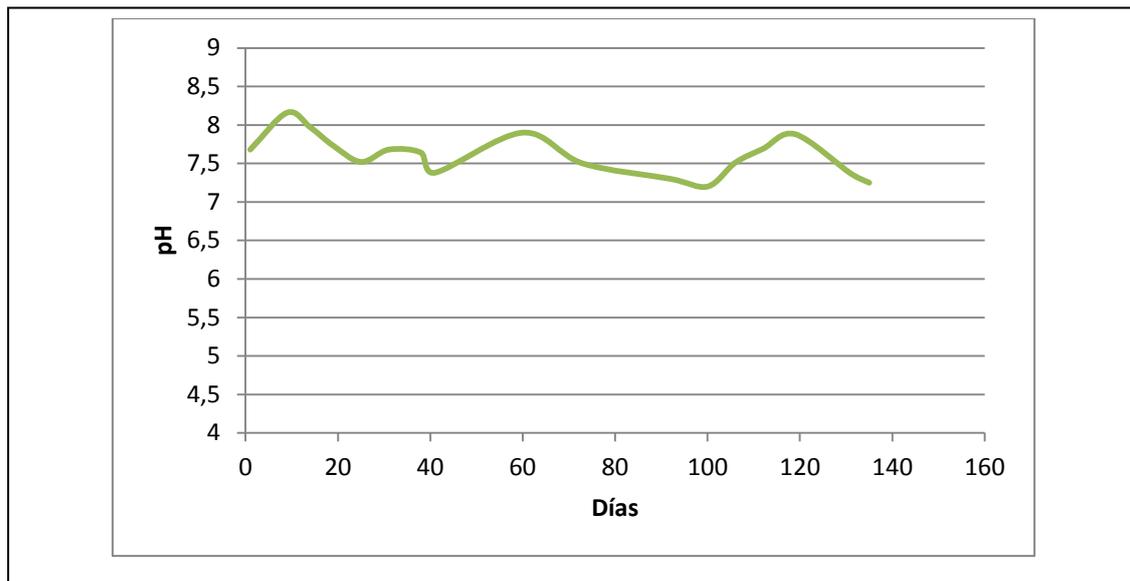


Fig. 3.39. Evolución del pH en el ensayo semicontinuo (1)

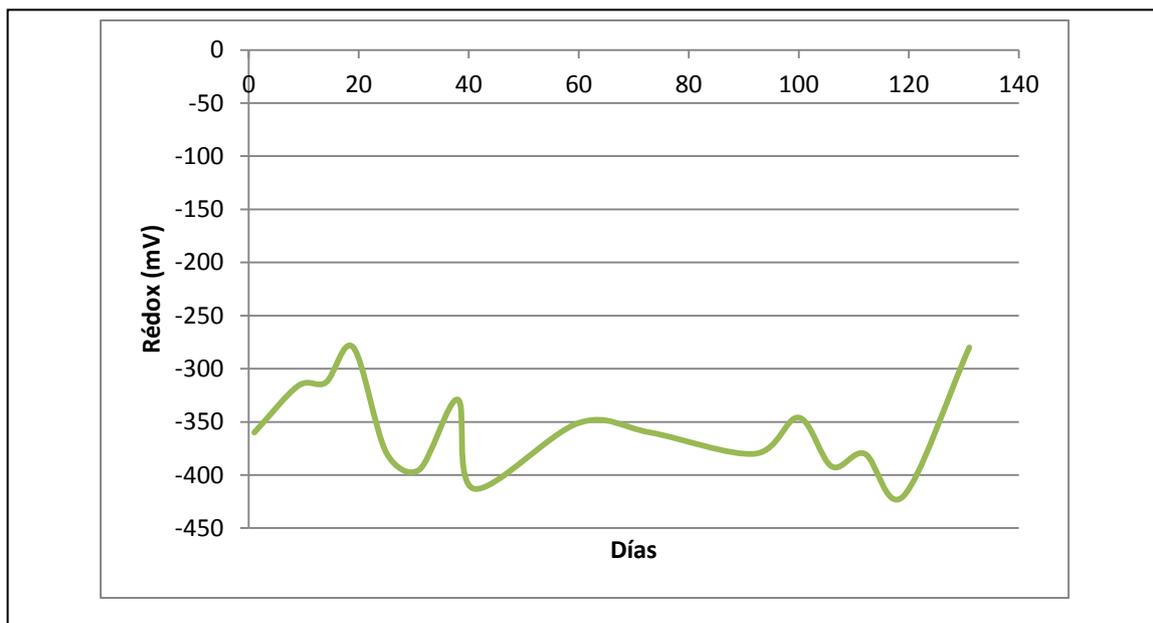


Fig. 3.40. Evolución del potencial rédox en el ensayo semicontinuo (1)

Tal como se observa en las Figuras 3.39 y 3.40, el pH se mantiene entre 7 y 8 y el potencial rédox entre -300 y -400 lo que favorece la etapa de metanogénesis.

3. Resultados y discusión

Con el fin de determinar el potencial de la chumbera como inóculo, y la capacidad para recuperarse de una inhibición, se diseñó un experimento en semicontinuo sobre la mezcla que había finalizado. Se comenzó con VCO de 0,23 g SV/Ld y se fue aumentando paulatinamente hasta que se detuvo, nuevamente en 1.19 g SV/Ld.

3.3.4 Producción de metano para el ensayo en semicontinuo (2)

La Figura 3.41 muestra la producción de biogás y metano.

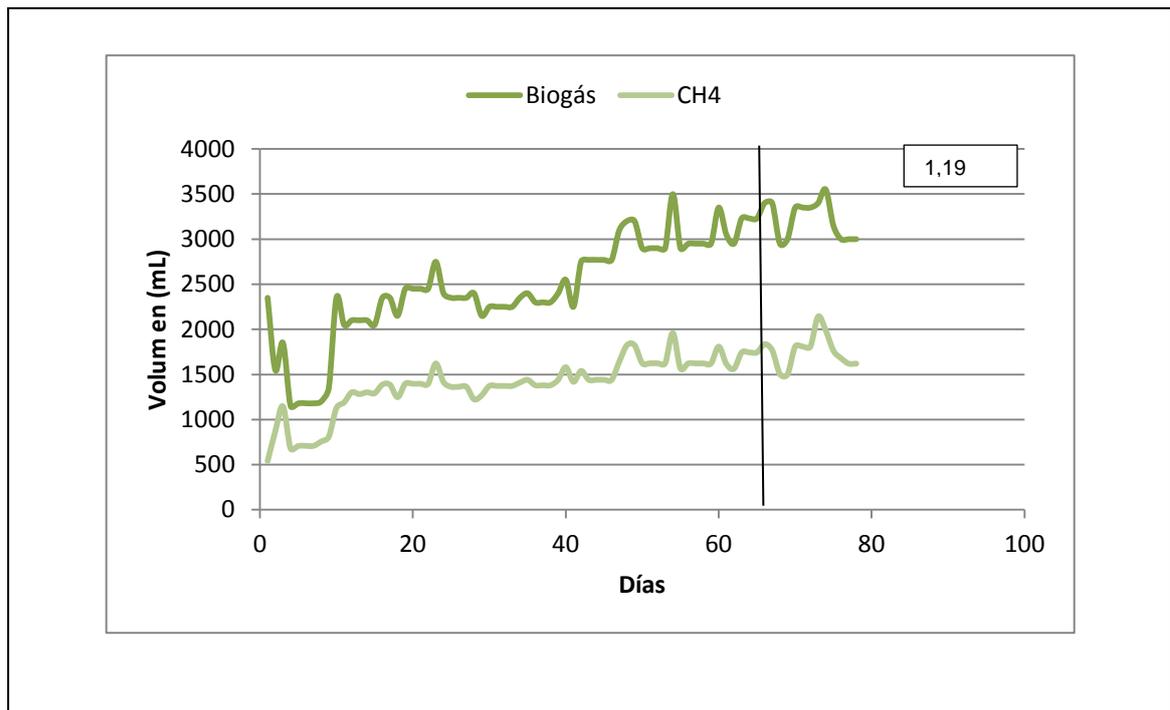


Fig. 3.41. Producción de biogás y metano en el ensayo semicontinuo (2)

Al igual que el ensayo semicontinuo anterior, la producción se detuvo cuando se le adicionó la VCO de 1.19 g SV/Ld. El proceso se mantuvo durante 78 días.

Las producciones son más altas que en el experimento anterior, esto se explica porque el sustrato de partida está mejor acondicionado. La Figura 3.42 compara la producción acumulada de metano para cada proceso.

3. Resultados y discusión

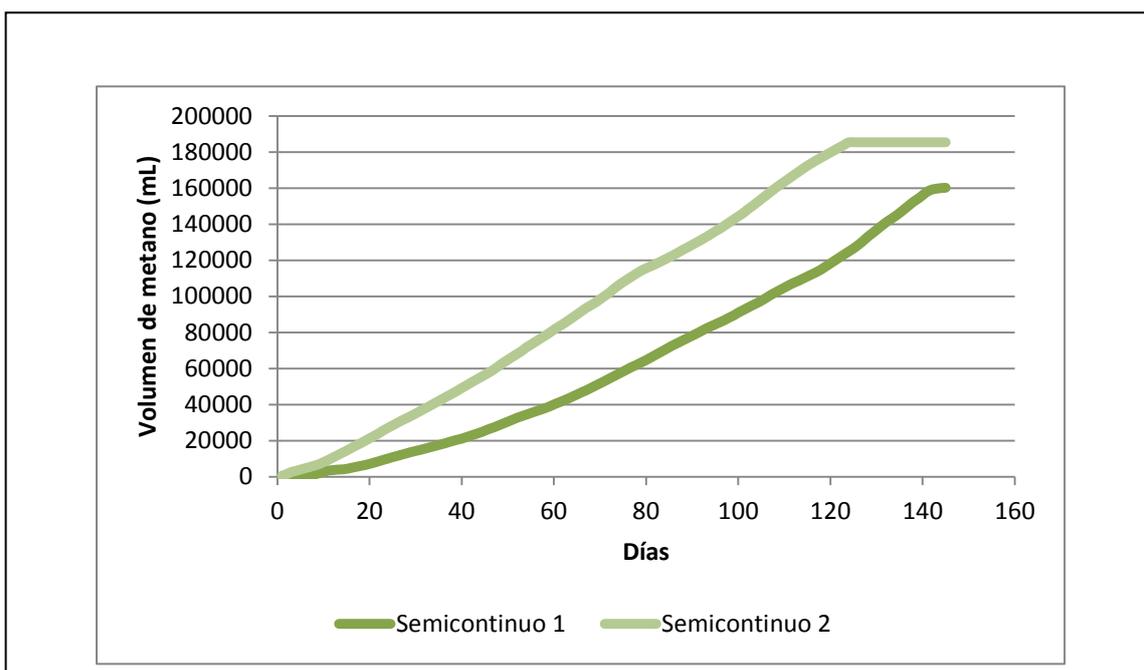


Fig. 3.42. Producción acumulada de CH_4 en los experimentos semicontinuo (1) y (2)

La evolución del % de metano con el tiempo se muestra en la Figura 3.43.

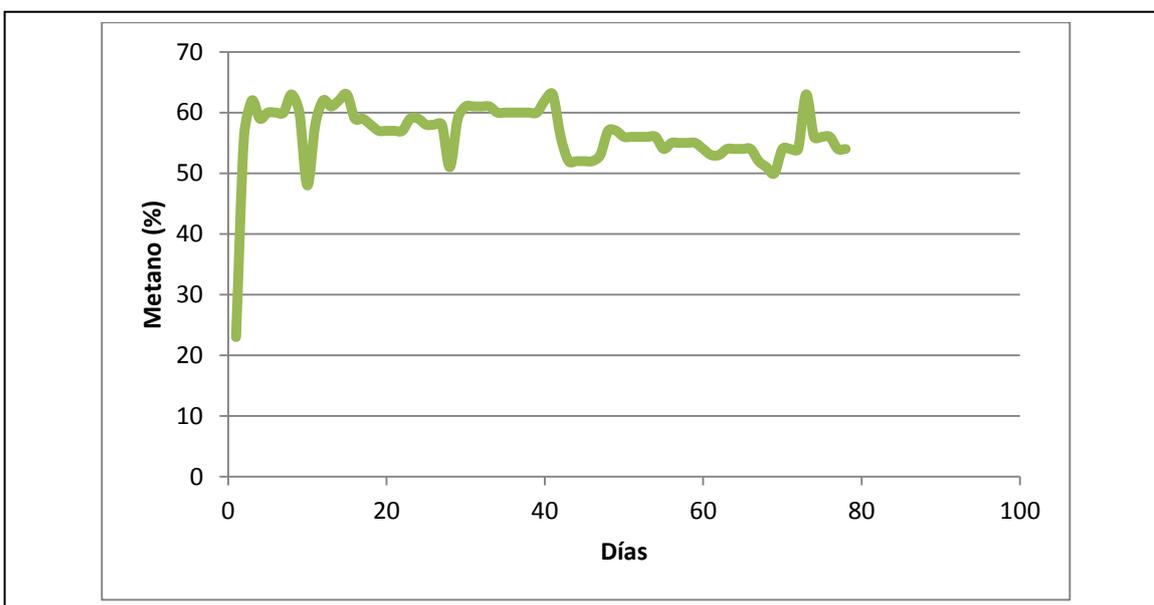


Fig. 3.43. %de metano en el ensayo semicontinuo (2)

El porcentaje de metano se mantuvo entre un 50 y 60%, lo cual se puede decir que es un proceso estable.

3. Resultados y discusión

3.3.5 Parámetros de control en el ensayo semicontinuo (2)

La Figura 3.44 muestra la variación en la DQO_T con el tiempo de este ensayo.

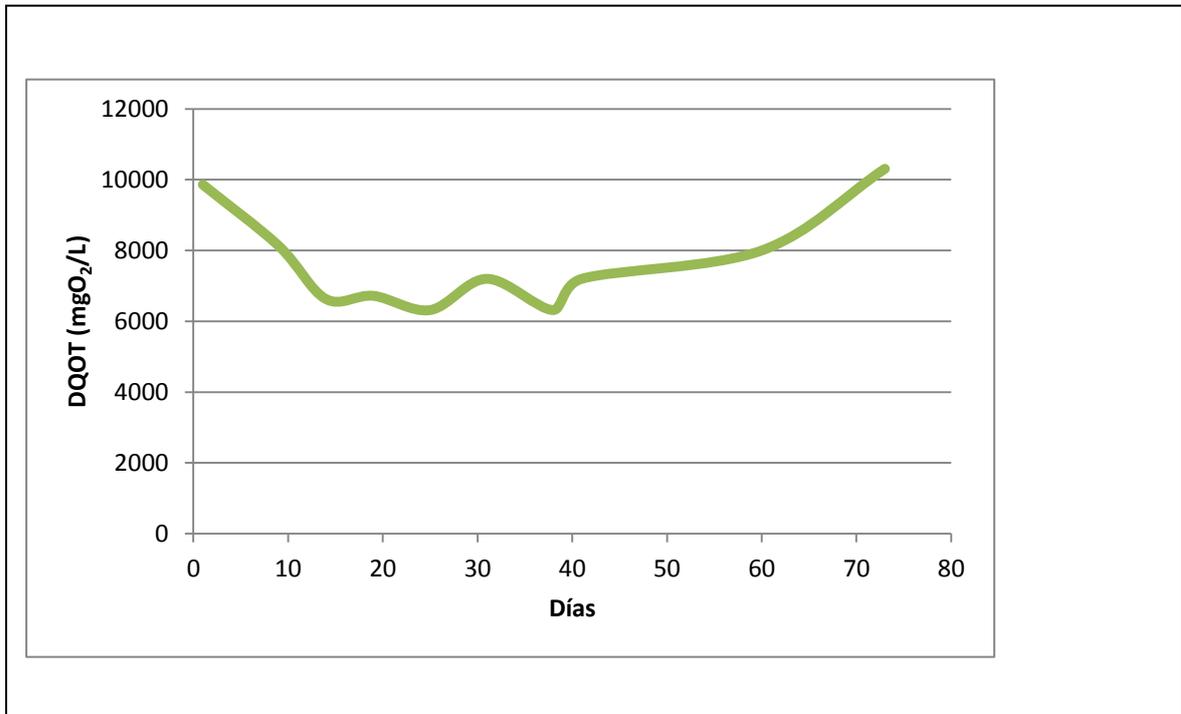


Fig. 3.44. Evolución de la DQO_T en el ensayo semicontinuo (2)

Se mantiene entre 6.000 y 8.000 mg O₂/L, observándose un crecimiento al adicionarse la VCO de 1.19 g SV/Ld, debido a un incremento de la relación C/N, razón por la cual se detiene el proceso de degradación de esa materia orgánica.

Las variaciones de los ST Y SV con el tiempo se muestran en las Figuras 3.45 y 3.46.

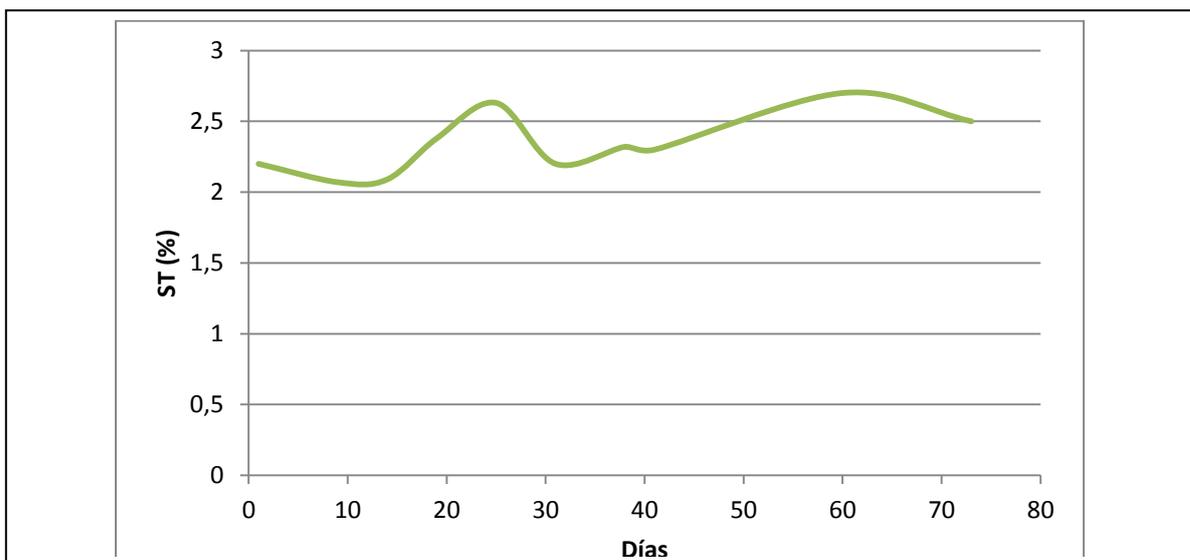


Fig. 3.45. Evolución de los ST en el ensayo semicontinuo (2)

3. Resultados y discusión

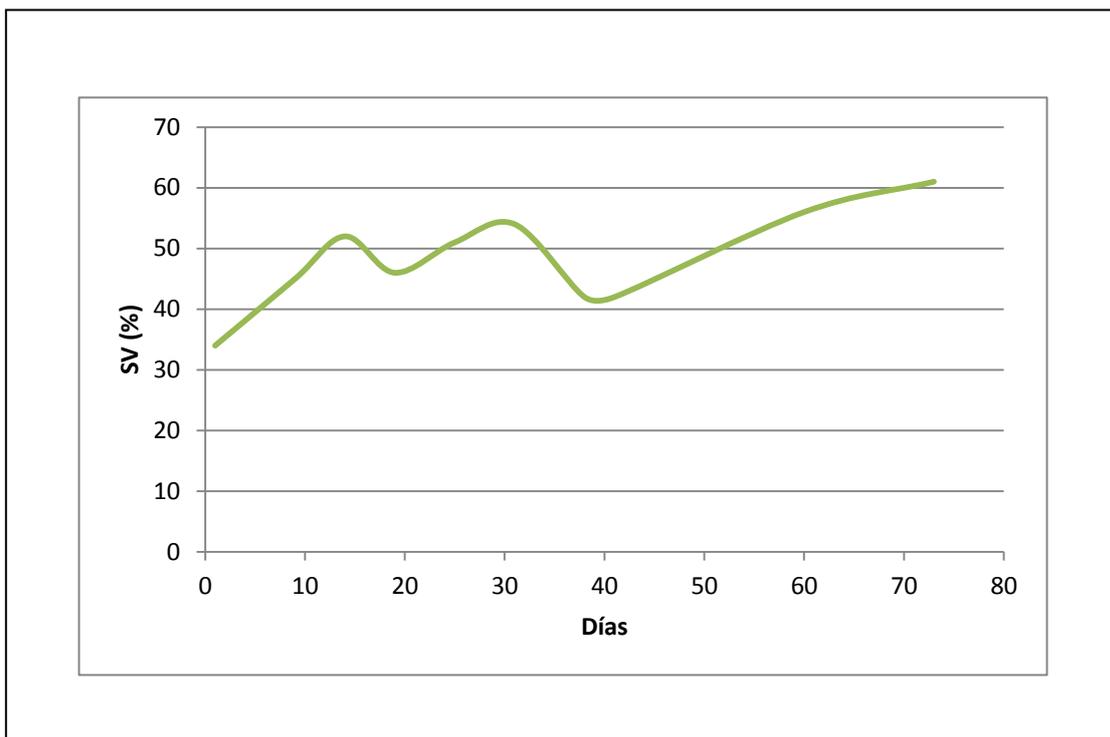


Fig. 3.46. Evolución de los SV en el ensayo semicontinuo (2)

Los SV y ST tienen igual comportamiento que en el ensayo anterior, el proceso se desarrolla en un medio muy estable y aumentan los valores de estos parámetros cuando se adiciona la VCO de 1.19 g SV/Ld.

Las evoluciones del pH y el potencial rédox con el tiempo se muestran en las Figuras 3.47 y 3.48.

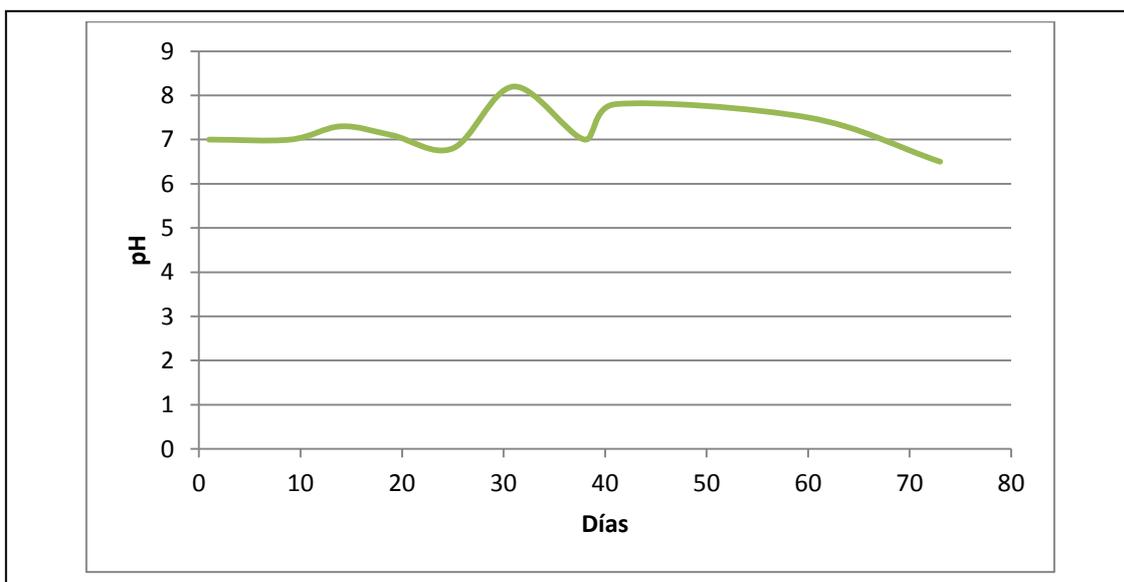


Fig. 3.47. Evolución del pH en el ensayo semicontinuo (2)

3. Resultados y discusión

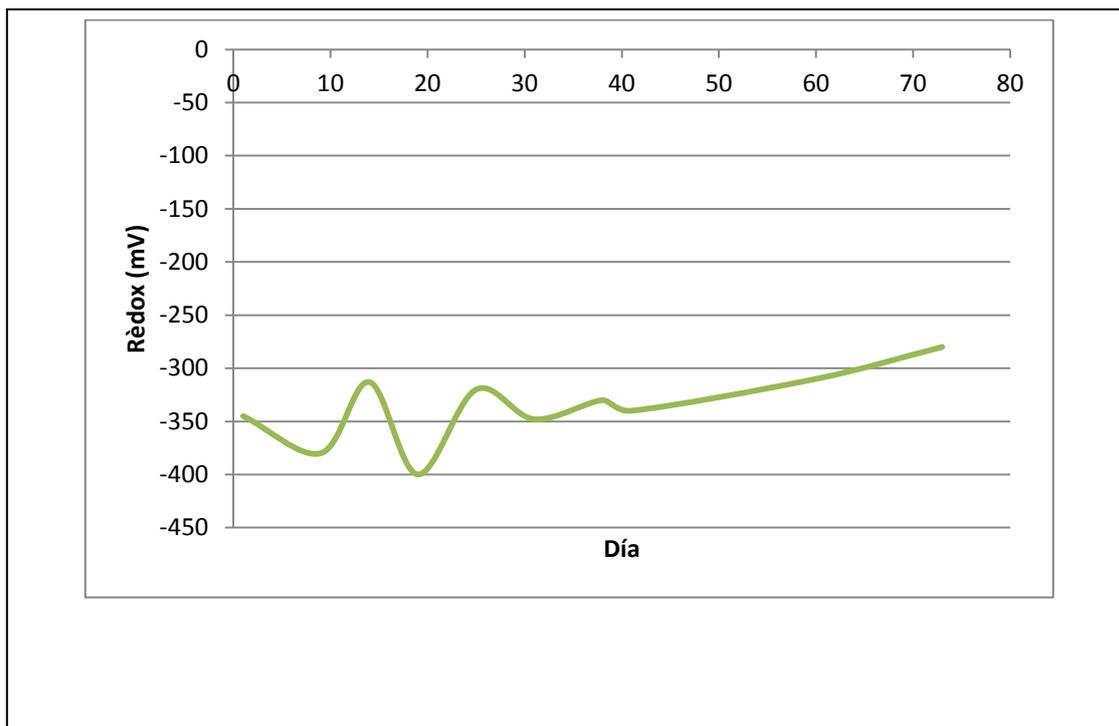


Fig. 3.48. Evolución del potencial rédox en el ensayo semicontinuo (2)

En los procesos semicontinuo (1) y (2), se observó la misma tendencia, en la medida en que si se aumentaba la VCO de la chumbera añadida, aumentaban las producciones de biogas y CH_4 , observándose una reducción en estos parámetros al utilizar una VCO de 1.19 g SV/Ld.

Por lo tanto se diseñó un ensayo semicontinuo con un TRH de 20 días, y con VCO de 0.48, 0.71 y 0,95 g SV/Ld. Se harán dos replicas por cada uno.

3.3.6 Producción de metano en el ensayo en semicontinuo (3)

En la Figura 3.49 puede apreciarse la evolución en la producción media diaria de metano con las diferente VCO.

3. Resultados y discusión

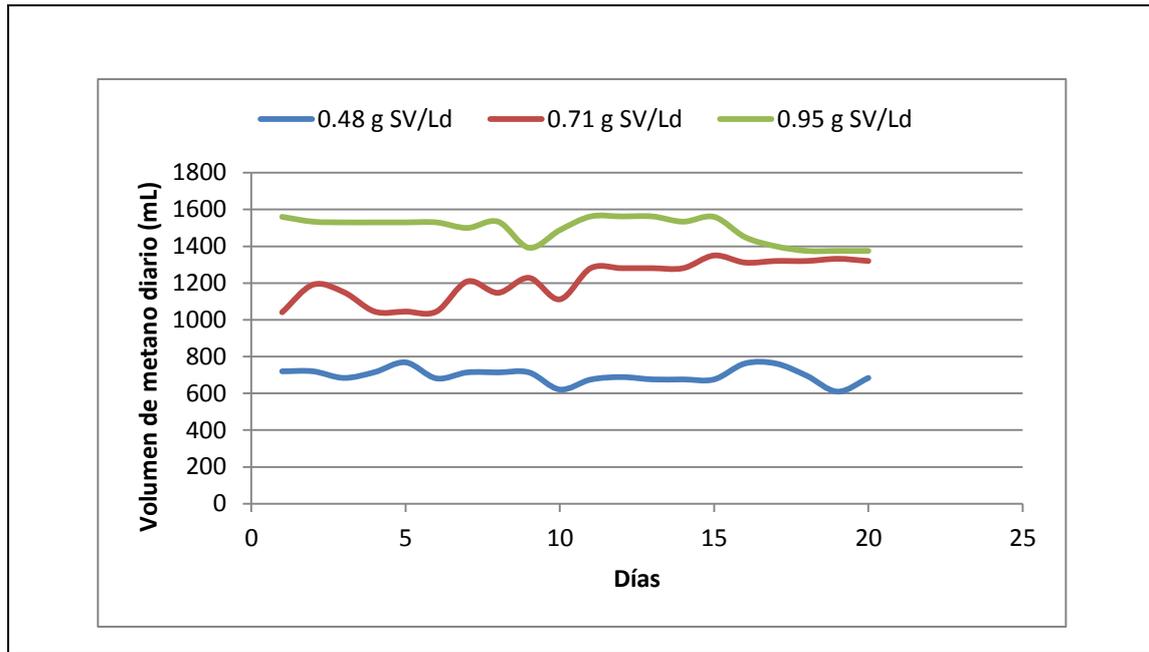


Fig. 3.49. Producción media diaria de metano durante el ensayo en semicontinuo (3)

La producción media diaria de metano más alta correspondió a la VCO de 0.95 g SV/Ld.

La figura 3.50 se puede observar el porcentaje de metano durante todo el ensayo.

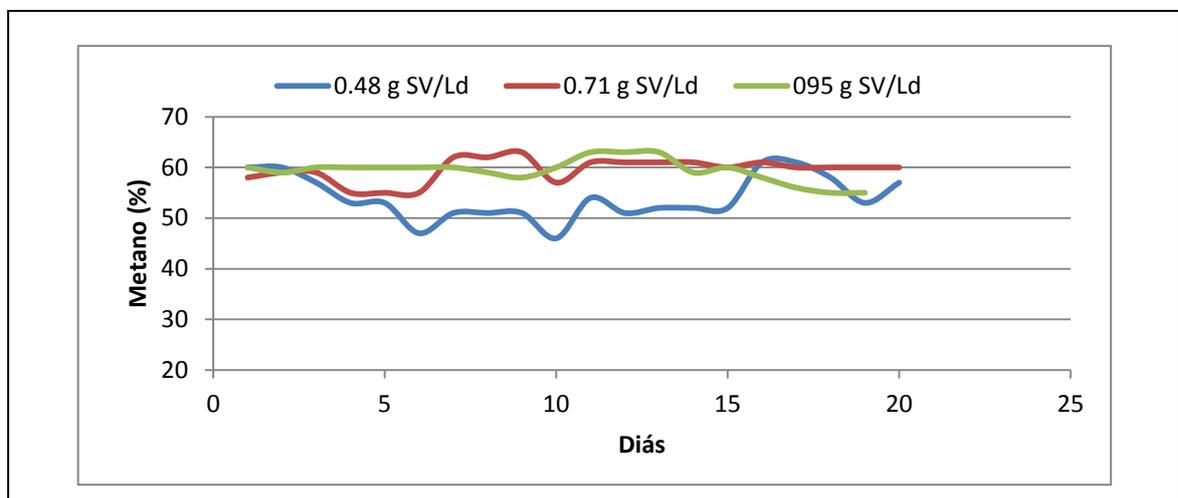


Fig. 3.50. % de metano en el ensayo en semicontinuo (3)

Los mejores porcentajes de metano se observan con las VCO 0.71 y 0.95 gSV/Ld. La VCO 0.48 g SV/Ld tiene porcentajes por debajo del 50%.

En la Figura 3.51 se puede apreciar la producción acumulada de metano para cada VCO.

3. Resultados y discusión

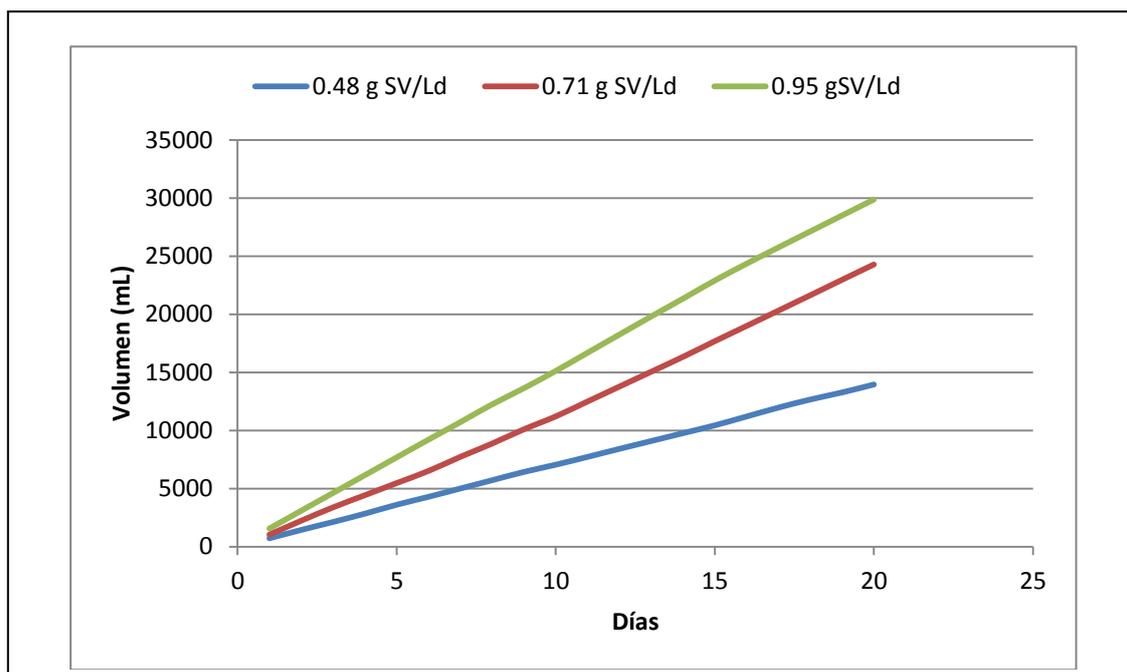


Fig. 3.51. Producción acumulada de metano en el ensayo semicontinuo (3)

La mejor producción acumulada de metano corresponde a la VCO de 0.95 g SV/Ld.

La tabla 3.13. muestra los rendimientos promedio de biogás y metano para cada VCO en estudio.

Tabla 3.13. Rendimiento de biogás y metano en el ensayo semicontinuo (3)

<i>Descripción</i>	0.48 g SV/Ld	0.71 g SV/Ld	0.95 g SV/Ld
<i>L CH₄/kg SV</i>	352,55±20,68	415,85±38,11	377,39±18
<i>L Biogás/kg SV</i>	655,42±46,70	694,28±54,67	637,99±20,68
<i>CH₄ (%)</i>	54±4,4	59,90±1,99	59,15±2,46
<i>THR</i>	20	20	20

La Figura 3.52 muestra el rendimiento medio diario para cada ensayo donde se varió la VCO.

3. Resultados y discusión

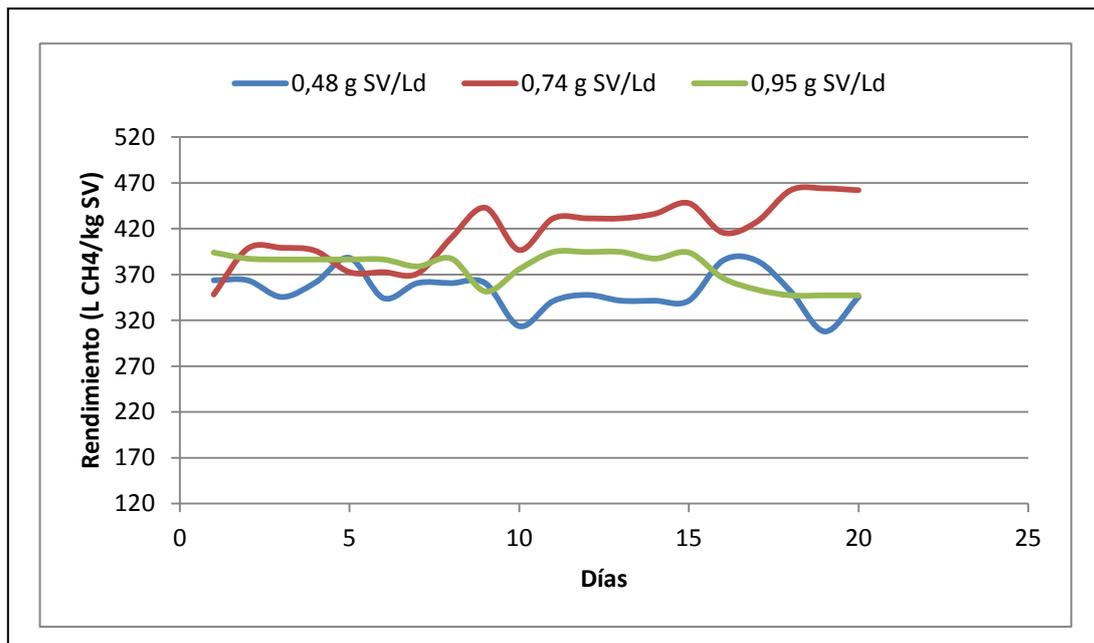


Fig. 3.52. Rendimiento de metano a diferentes VCO en el ensayo semicontinuo (3)

De acuerdo con los datos mostrados en la tabla 3.13 y la Figura 3.52, la VCO de 0.71 g SV/Ld presenta los mayores rendimientos de biogas y metano con valores de $694,28 \pm 54,67$ y $415,85 \pm 38,11$ L/kg SV, respectivamente y con un porcentaje de metano de $59,90 \pm 1,99$. Corresponde a un alto rendimiento si se tiene en cuenta que se parte de un purín, con rendimientos de metano de $21,16 \pm 1,5$ L CH₄/kg SV y con un porcentaje de metano del 26,75%. Al comparar con datos bibliográficos, de ensayos similares realizados en semicontinuo, se encuentran rendimientos entre 300-500 L CH₄/kg SV con codigestiones de purines y paja de arroz (Li et al, 2015); 398 L CH₄/kg SV con codigestiones de purines y pasto ensilado (Wall et al, 2014).

3. Resultados y discusión

3.3.7 Parámetros de control en el análisis semicontinuo (3)

La variación de la DQO_T se muestra en la Figura 3.53. se realizan cada 5 días.

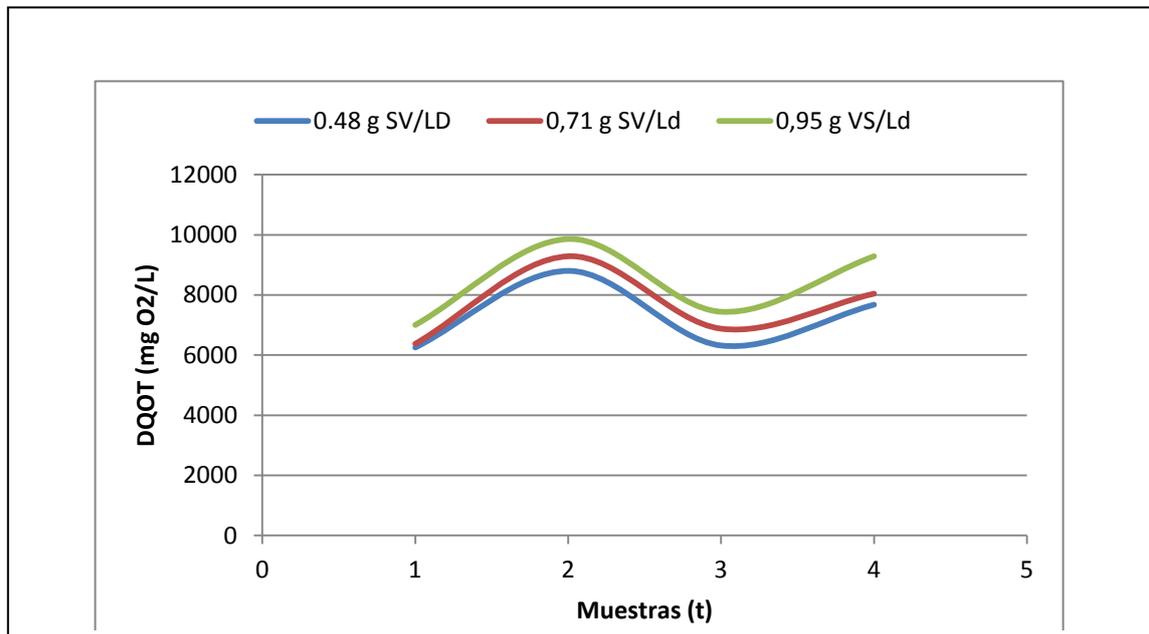


Fig. 3.53. Evolución de la DQO_T en el ensayo en semicontinuo (3)

Se observa que las DQO_T presentan oscilaciones, como habíamos analizado anteriormente, las subidas se relacionan con el suministro de sustrato y los descensos con la degradación de la mezcla y producción de biogás.

Las Figuras 3.54 y 3.55 muestran la variación de los ST y SV. Se realizan cada 5 días

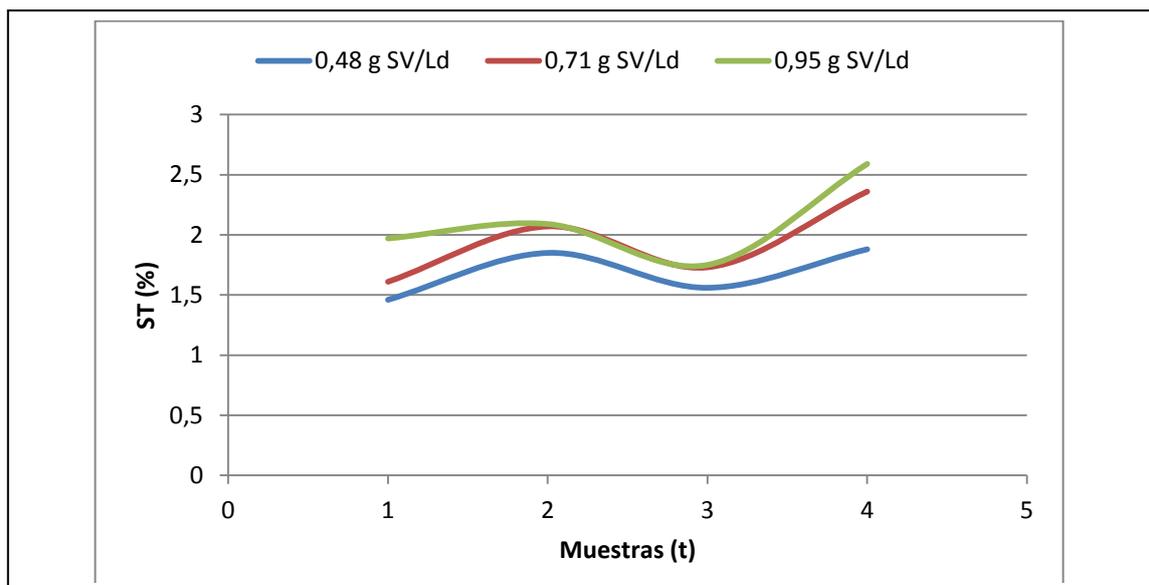


Fig. 3.54. Evolución de los ST en el ensayo semicontinuo (3)

3. Resultados y discusión

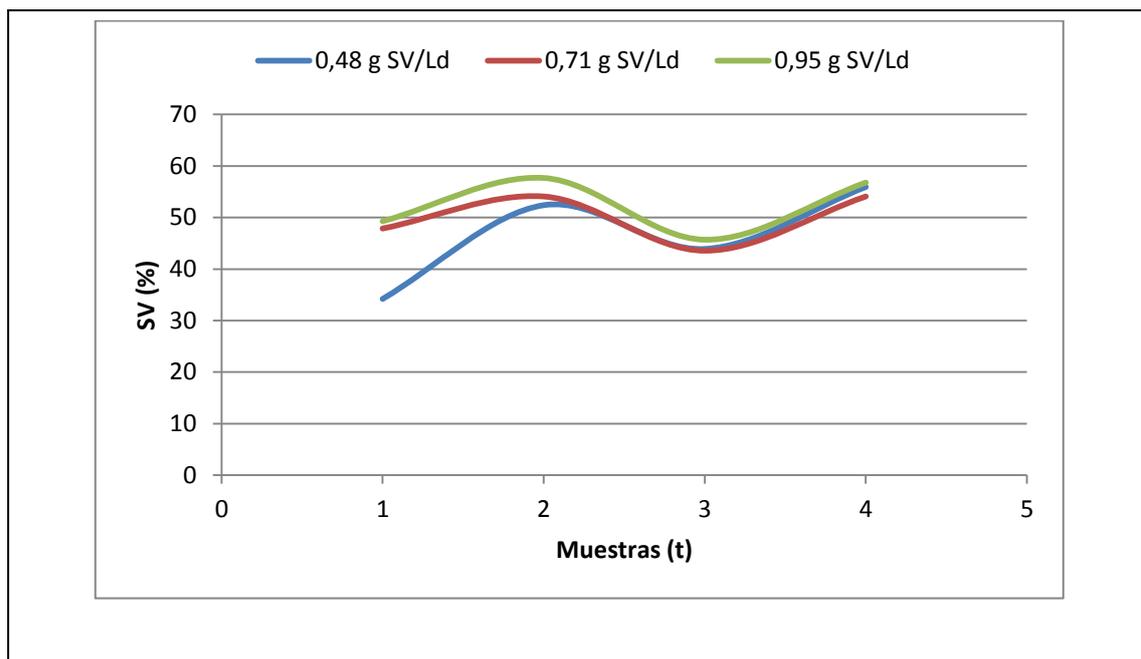


Fig. 3.55. Evolución de los SV en el ensayo en semicontinuo (3)

La evolución del pH y el potencial rédox se muestran en la Figuras 3.56 y 3.57, respectivamente. Se realizan cada 5 días

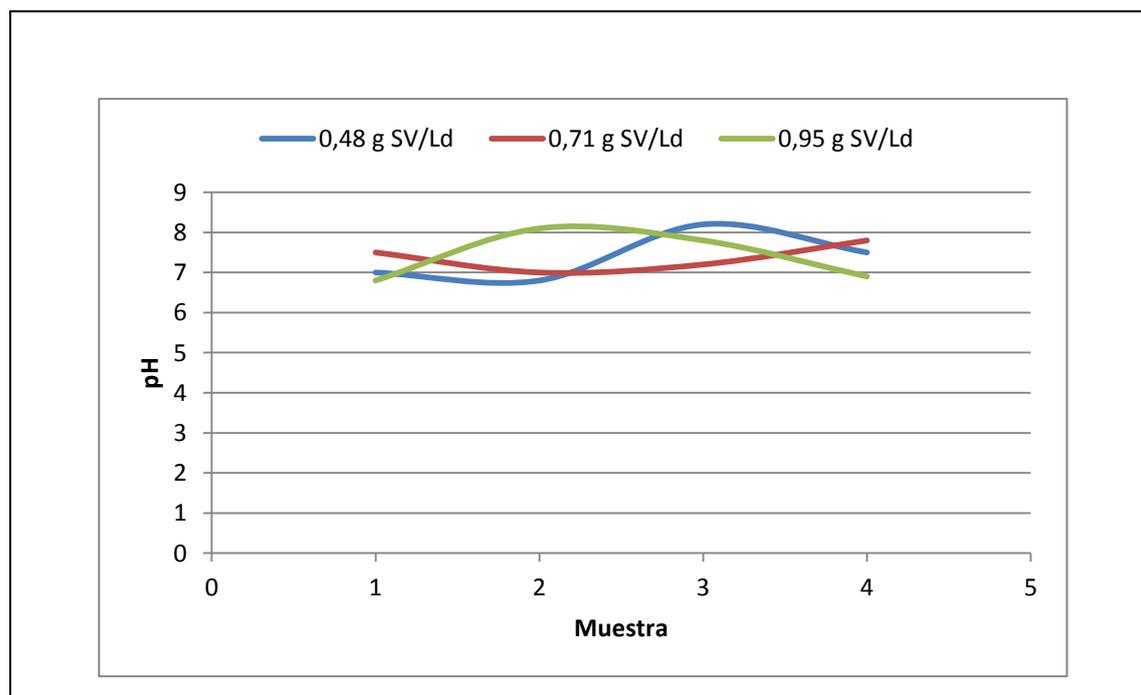


Fig. 3.56. Evolución del pH en el ensayo semicontinuo (3)

3. Resultados y discusión

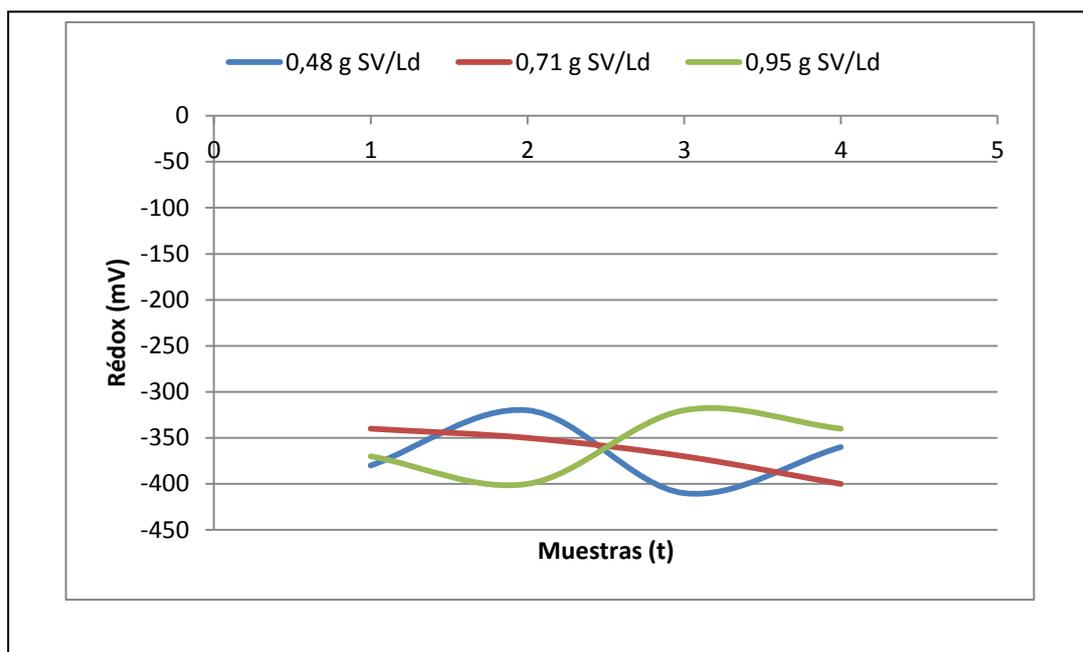


Fig. 3.57. Evolución del potencial rédox en el ensayo semicontinuo (3)

3.4 Análisis del digestato.

Una vez terminado los ensayos de biodegradabilidad, se hizo un análisis del digestato del purín y al codigerido con chumbera con objeto de evaluar sus aplicaciones. La tabla 3.14 muestra los valores promedios de los nutrientes y micronutrientes.

Tabla 3.14. Análisis del digestato

	Ca	Fe	K	Mg	P	N	Cu	Zn
Purín+	0,024	0,0005	0,3348	0,0084	0,0069	0,066	0,0002	0,0015
Purín+ chumbera	0,035	0,00145	0,0575	0,0472	0,01931	0,045	0,0328	0,00004

Como se observa la codigestión aumentó los valores de P, y disminuyó los valores de K y N. Este descenso de N es favorable para los cultivos si el digestato se utiliza para añadirlo a las tierras donde crecen éstos, ya que uno de los problemas de los purines, es su alto contenido en N, que sobresaturan los suelos de nitrógeno, adicionalmente el aporte del componente vegetal (chumbera) le aporta aminoácidos que favorecen el crecimiento de los cultivos.

3. Resultados y discusión

3.5 Análisis estadístico.

Los datos obtenidos durante los ensayos realizados fueron tratados estadísticamente, todos los experimentos se hicieron por duplicados, para luego determinar los valores promedios y su desviación estándar. Previamente se realizaba la comprobación con el método ANOVA, para determinar si los ensayos podían ser comparables.

El procedimiento que se siguió para cada uno de los ensayos fue el siguiente:

En el batch (1) por ejemplo, lo primero que se hizo fue comprobar la normalidad.

Debido a que el número de muestras fueron 30 se asumió que seguía una distribución normal. Por lo tanto se propuso la hipótesis de igualdad entre medias:

$H_0: \mu_1 = \mu_2$ y $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$, la tabla 3.15 muestra el resultado de la prueba F, que se realizó con los valores diarios de producción de metano de los dos ensayos.

Tabla 3.15. Estadístico de prueba

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	29507,5	1	29507,5	0,080	0,778	3,978
Dentro de los grupos	25863206,6	70	369474,4			
Total	25892714,1	71				

El valor de $F=0,080$ es menor que $F_{\text{crítico}}=3,978$ por lo cual se puede decir que las muestras provienen de una misma población.

De igual forma se realizaron las comparaciones para el ensayo batch (2) y batch (3), indicando en todos los casos que el estadístico de prueba F era menor que F_c , con lo cual podemos decir que existía evidencia estadística de que las muestras de cada experimento tenían una misma media poblacional.

Para los ensayos en semicontinuo cuyo número de muestras eran 20, para una VCO de 0,71 g SV/Ld, se siguió el siguiente procedimiento:

La comprobación de la normalidad de cada muestra con ANOVA se representa en las Figuras 3.58 y 3.59.

3. Resultados y discusión

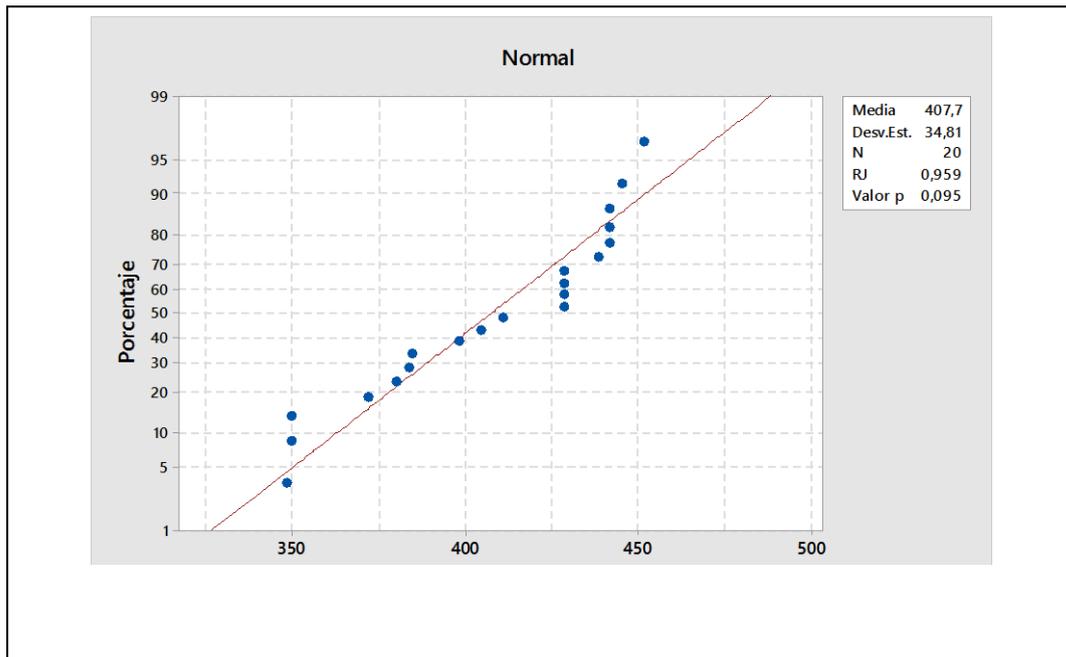


Fig. 3.58. Prueba de normalidad (1) para una VCO de 0.71 g SV/Ld en el ensayo semicontinuo (3)

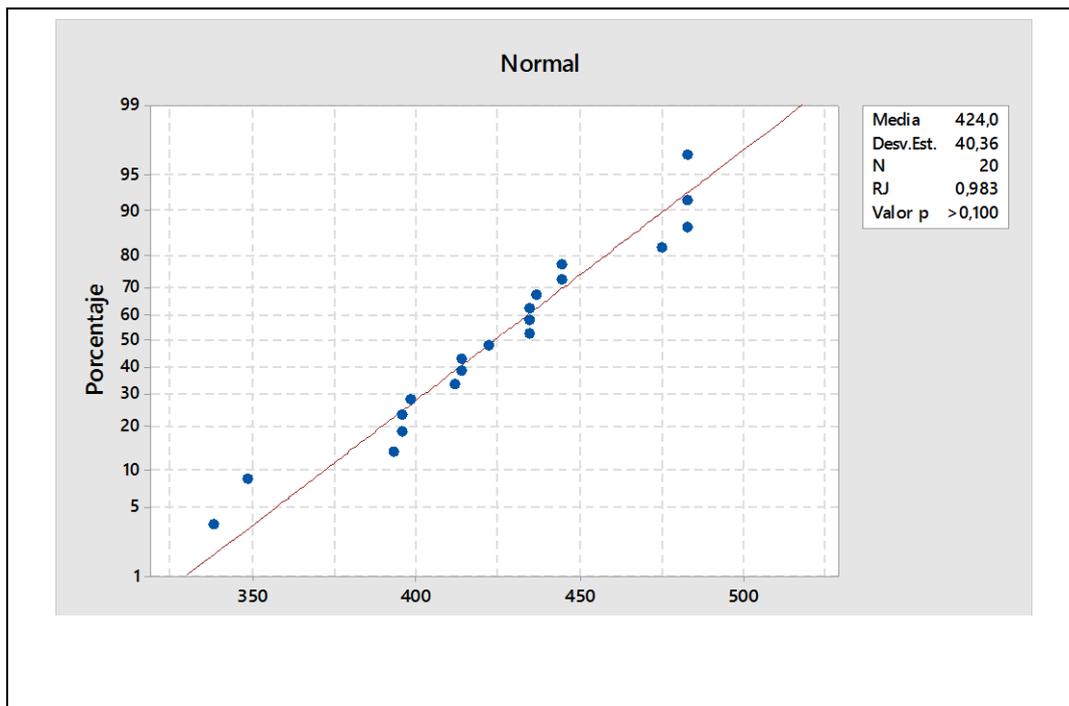


Fig. 3.59. Prueba de normalidad (2) para una VCO de 0.71 g SV/Ld en el ensayo semicontinuo (3)

3. Resultados y discusión

El valor de $p > 0.05$ indicaba que las variables se ajustaban a una distribución normal. Por lo tanto se hizo la hipótesis de igualdad entre medias:

$H_0: \mu_1 = \mu_2$ y $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$, la tabla 3.16 muestra el resultado de la prueba F.

Tabla 3.16. Estadístico de prueba

Análisis de varianza de un factor					
RESUMEN					
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza	
ensayo 1	20	8153,23	407,66	1211,92	
ensayo 2	20	8480,77	424,04	1628,58	
ANÁLISIS DE VARIANZA					
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad
Entre grupos	2682,11	1	2682,11	1,89	0,177
Dentro de los grupos	53969,54	38	1420,25		Valor crítico para F 4,098
Total	56651,65	39			

El valor de $F = 1.89$ es menor que el $F_c = 4.098$ por lo tanto se aceptó la hipótesis de que las muestras correspondían a una misma población y por lo tanto se realizaron las comparaciones de los experimentos.

A continuación se hará el estudio de factibilidad para la implementación de una planta de biogás en una granja de cerdos para autoconsumos eléctricos y térmicos, y con ventas de excedentes eléctricos a la red.

3.6 EVALUACIÓN DE UN CASO PRÁCTICO

Para una evaluación práctica se eligió la granja **Ibérico Montepistacho**, ubicada en la carretera EX 300 km 30, con 15 hectáreas de terreno de difícil acceso y orografía. Esta granja inició operaciones en el año 2008, tiene 320 cerdas ibéricas para la cría de lechones, y está compuesta por 4 naves:

- Recela de inseminación
- Gestación comprobada
- Partos-destete
- Nave de reposición

3. Resultados y discusión

Dispone de un estercolero para el almacenamiento de purines de unos 600 m³, y puede acopiar hasta 3 meses seguidos de producción de los mismos. Se les da uso agrícola como fertilizante y se distribuye con cubas.

Los requerimientos de electricidad y calor los supe a través de la red eléctrica. Consumen 102.581 kWh y pagan 11.650 Euros por año. El valor del kWh actual incluido en la factura eléctrica es 0,1136 €/kWh.

A continuación se estudiarán todos los parámetros que se requieren para evaluar el proyecto.

3.6.1 Tamaño del digestor

Para la elección del digestor se tendrá en cuenta los siguientes parámetros:

- El tiempo de retención hidráulico THR, para ello se diseñó un proceso en semicontinuo (4) con el purín con una VCO de 1,5 g SV/Ld. La Tabla 3.17 resume los resultados

Tabla 3.17. Resultados del Purín en semicontinuo (4)

Descripción	Valor
Rendimiento	200 LCH ₄ /kg SV
THR	20 días
ST	4,9%
SV	63 %
%CH ₄	58%

- La cantidad de cerdas que dispone la granja son 320.
- La producción esperada de purines y su contenido en nitrógeno se determina de acuerdo con el anexo 1 del Real decreto 324/200 (Tabla 3.18), por el que se establecen normas básicas de ordenación de las explotaciones porcinas.

3. Resultados y discusión

Tabla 3.18. Producción de purines del ganado porcino

Tipo de ganado porcino (Plaza)	Estiércol líquido y semilíquido (m ³ /año)	Contenido en Nitrógeno (kg/plaza y año)
Cerda en ciclo cerrado (incluye madre y su descendencia hasta el final de cebo)	17,75	57,60
Cerda con lechones hasta destete (de 0 a 6 kg)	5,10	15,00
Cerda con lechones hasta 20 kg	6,12	18,00
Cerda de reposición	2,50	8,50
Lechones de 6 a 20 kg	0,41	1,19
Cerdo de 20 a 50 kg	1,80	6,00
Cerdo de 50 a 100 kg	2,50	8,50
Cerdo de cebo de 20 a 100 kg	2,15	7,25

Con base en esta información y con el tiempo de retención (THR) de 20 días, se usará la siguiente ecuación para hallar el volumen del digestor:

$$V [m^3] = m^3 \text{ purines/año} * (\text{THR}).$$

$$V = \frac{17,75}{\text{año}} m^3 * 320 * 20 \text{ días} * \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}}$$

Resolviendo la ecuación se obtiene que el volumen del digestor para el tratamiento de los purines es:

$$V = 311 \text{ m}^3,$$

Con lo cual se cargarían 15,55 ton/día.

Para una codigestión con chumberas con una VCO de 0,48 g SV/Ld, equivalente a 2,78 ton/día, con 20 días de residencia aumenta el volumen en 55,6 m³.

Con lo cual resulta un digestor con un volumen útil de 366,6 m³.

Generalmente se acostumbra a asignar un % de seguridad (borde libre) que suele ser de 1,0 m o el equivalente a un 20% del volumen calculado.

Por lo tanto el volumen del digestor será de 440 m³, la cantidad y la procedencia de los sustratos se resume en la Fig. 3.60.

3. Resultados y discusión

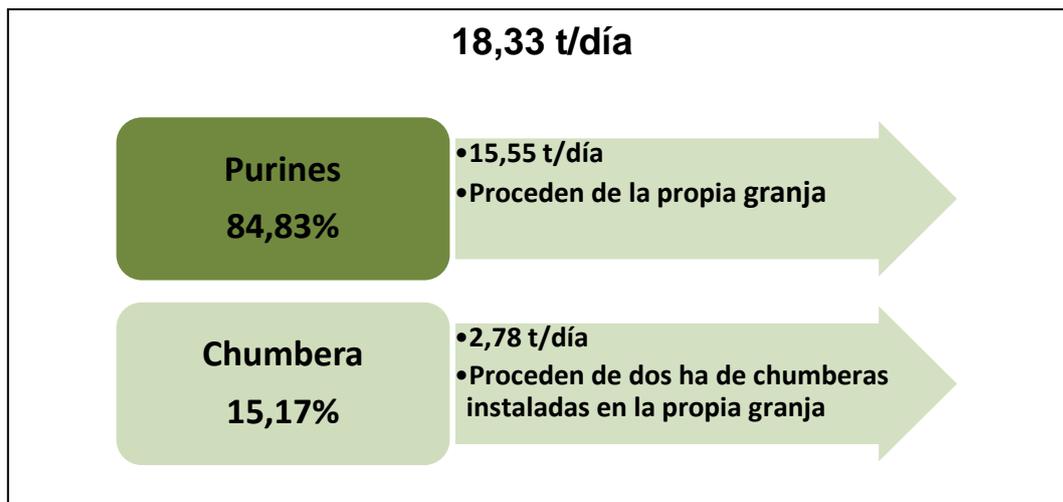


Fig. 3.60. Codigestión de sustratos.

El reactor que se usará es un digestor vertical anaerobio de mezcla completa hecho de acero, a continuación se enumeran algunas de sus principales características (Fernández García, 2016):

- Es apto para todo tipo de sustrato
- Es un tanque cilíndrico vertical con agitación
- Se construye bajo nivel de terreno o sobre tierra
- Se deben considerar las condiciones climáticas, topográficas y aspectos socioeconómicos del lugar
- Se debe tener un sistema de calefacción permanente para mantener la temperatura
- Debe tener instalaciones para la alimentación de biomasa con su respectivo medidor de caudal y una tubería de rebose para la descarga del digestato
- Debe tener un sistema de captación de biogás y las respectivas válvulas de seguridad sobre presión y subpresión
- Prever instalaciones o tuberías para la descarga de sedimentos que se acumulen en el fondo de digestor
- Prever instalaciones para la toma de muestras de sustrato en el interior del digestor
- Instalar en lo posible un “ojo de buey” para observar el proceso de formación de espumas o costras en la superficie
- Se debe instalar un sistema de control de todo el proceso para medir la temperatura y el pH

3. Resultados y discusión

Un ejemplo de este tipo de digestores se muestra en la Figura. 3.61 (Equimar, 2017).

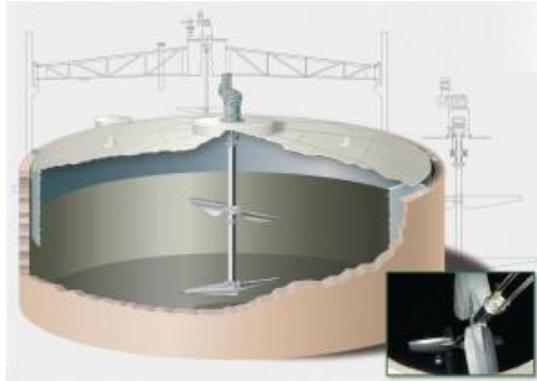


Fig. 3.61. Digestores de mezcla completa

Es importante seleccionar algunas características técnicas que permita un mejor funcionamiento del digestor como son:

- El tipo de aislamiento térmico, que minimice las pérdidas de calor
- Las alternativas para la extracción del digestato, teniendo en cuenta que es una alimentación continua
- El sistema de agitación, normalmente se utilizan agitadores mecánicos y algunas veces son de ejes inclinados
- El sistema de calefacción, el más usual es el intercambiador de calor por su facilidad en el mantenimiento y en la limpieza
- El almacenamiento del biogás, en este caso se almacenara en una cubierta de doble membrana en la parte superior del digestor. Tiene una membrana exterior para darle forma y una membrana interior, que cumple con la función de cerrar herméticamente el fermentador. Debe poseer válvulas de seguridad para que el gasómetro no se vea expuesto a sobrepresión ni depresión (Fernández García, 2016).

3.6.2 Potencia eléctrica instalada

En la Tabla 3.19 se muestra la energía anual producida y la potencia eléctrica instalada.

3. Resultados y discusión

Tabla 3.19. Potencia eléctrica instalada

<i>Cantidad de Purín (t/año)</i>	5.680,00
<i>Rendimiento CH₄ purín (m³/t)</i>	6,17
<i>Cantidad de Chumbera (t/año)</i>	1.014,00
<i>Rendimiento CH₄ Chumbera (m³/t)</i>	14,85
<i>Producción anual de metano (m³/año)</i>	50.126,22
<i>Energía producida (9,96 kW/m³ metano) kWh/año</i>	499.257,15
<i>Rendimiento eléctrico</i>	35%
<i>Rendimiento térmico</i>	45%
<i>Energía eléctrica producida (kWh/año)</i>	174.740,00
<i>Energía térmica total producida (kWh/año)</i>	224.665,72
<i>Funcionamiento anual del motor (horas)</i>	8.000,00
<i>Potencia Eléctrica Instalada kWe</i>	21,84

Adicionalmente se tiene que:

- Se usará un 30% de la energía térmica para el calentamiento del digestor.
- Se usará un 10% de la energía eléctrica para la agitación y bombeo de los sustratos. Por lo tanto en la Tabla 3.20 se muestra la disponibilidad total de energía.

Tabla 3.20. Disponibilidad de energía

<i>Energía térmica para calefacción del digestor (30%) kW/año</i>	67.399,72
<i>Energía eléctrica para agitación del digestor (10%) kW/año</i>	17.474,00
<i>Energía térmica disponible kW/año</i>	157.266,00
<i>Energía eléctrica disponible kW/año</i>	157.266,00

A continuación, en la tabla 3.21 se muestra la energía que se consume en la granja, y el coste medio del kW/h que se ha pagado durante todo el año.

3. Resultados y discusión

Tabla 3.21. Energía consumida en la granja y coste por kWh

<i>Energía térmica consumida kW/año</i>	61.548,60
<i>Energía eléctrica consumida kW/año</i>	41.032,40
<i>Valor del kWh consumido € (euros)</i>	0,114

Los saldos de la energía eléctrica y térmica después del autoconsumo se muestran en la Tabla 3.22.

Tabla 3.22. Energía disponible después del autoconsumo de la planta

<i>Saldos de energía térmica kW/año</i>	95.717,40
<i>Saldos de energía eléctrica kW/año</i>	116.233,60

3.6.3 Presupuesto de inversión

En la Tabla 3.23 se exponen los presupuestos de la instalación de la chumbera y la maquinaria que se requiere en la planta.

Tabla 3.23. Presupuestos de inversión

<i>Descripción</i>	<i>Valor(€)</i>
<i>Coste del cultivo de 2 ha de chumbera</i>	13.040,000
<i>Máquina cosechadora de chumbera</i>	4.000,00
<i>Molino triturador de chumbera</i>	5.000,00
<i>Tanque de homogenización</i>	7.000,00
<i>Digestor , incluye intercambiador de calor, tuberías, gasómetro, filtro de H₂S, trampa de agua, antorchas de seguridad, motor, sistemas de impulsión, transformador y enganche a la red eléctrica, control y automatización</i>	150.000,00
<i>Elaboración de balsas para almacenamiento de digestato</i>	8.000,00
<i>Total inversión</i>	187.440,00

3. Resultados y discusión

3.6.4 Bonos de carbono

La reducción de CO₂ por ahorro en la producción de CH₄ se muestra en la Tabla 3.24.

Tabla 3.24. Reducción de CO₂ por emisión de CH₄

<i>Producción de CH₄ anual (m³/año)</i>	50.126,22
<i>Densidad del CH₄ (kg/m³)</i>	0,65
<i>Producción de CH₄ anual (kg/año)</i>	32.582,04
<i>Producción de CH₄ anual (t/año)</i>	32,58
<i>Emisiones de CO₂ eq (tCO₂-eq/año)</i>	684,22

Con porcentajes de CH₄ de 58% y del CO₂ del 42%, las Tablas 3.25 y 3.26 muestran las toneladas de CO₂ por la valorización energética del CO₂ y CH₄ en el biogás.

- Incremento por valorización energética en el biogás

Tabla 3.25. Incremento por valorización energética en el biogás

<i>Producción de CO₂ anual (m³/año)</i>	36.298,29
<i>Densidad del CO₂ (kg/m³)</i>	1,80
<i>Producción de CO₂ anual (kg/año)</i>	65.336,92
<i>Producción de CO₂ anual (t/año)</i>	65,34

- Incremento por valorización energética del metano, por cada kg de CH₄ se producen 2,75 kg de CO₂

Tabla 3.26. Incremento de CO₂, por valorización energética de CH₄

<i>Producción de CH₄ anual (m³/año)</i>	50.126,22
<i>Densidad del CH₄ (kg/m³)</i>	0,65
<i>2,75 kg CO₂ por cada kg CH₄ en combustión (kg)</i>	2,75
<i>Producción de CO₂ anual (kg/año)</i>	89.600,62
<i>Producción de CO₂ anual (t/año)</i>	89,60

Por lo tanto las toneladas anuales de CO₂ que se reducen son 529,29 por cada 5.680 t de purines digerido, o sea, 0,093 t CO₂-eq/t purín digerido.

3. Resultados y discusión

3.6.5 Digestato

La cantidad del digestato que se produce es teóricamente la diferencia entre el caudal másico de la entrada del digestor y el caudal másico del biogás (Fernández García, 2016), en la tabla 3.27 se calcula el caudal másico de las toneladas de sustrato que entran y el caudal másico del biogás que se forma en el digestor, la diferencia entre ellos son las toneladas de digestato disponible.

Tabla 3.27. Producción de digestato

<i>Alimentación de entrada (t/año)</i>	6.694,00
<i>Producción de biogás (m³/año)</i>	86.424,52
<i>Densidad del biogás (kg/m³)</i>	1,08
<i>Producción de biogás (kg/año)</i>	93.684,18
<i>Producción de biogás (t/año)</i>	93,68

Por lo tanto las toneladas anuales de digestato disponibles son 6.600,32 t.

3.6.6 Costes de operación

Los costes de operación se muestran en la Tabla 3.28.

Tabla 3.28. Costes de operación

<i>Descripción</i>	<i>Euros (€)</i>
<i>Reparación y mantenimiento de equipos (1,5% de la inversión)</i>	2.775,00
<i>Seguros y administración</i>	1.800,00
<i>Personal de planta</i>	5.400,00
<i>Gastos generales</i>	2.700,00
<i>Peajes a pagar a la red</i>	1.322,08
<i>Total costes</i>	13.997,68

3. Resultados y discusión

3.6.7 Ingresos

La tabla 3.29 muestra los ingresos de la planta.

Tabla 3.29. Ingresos de la planta

Descripción	Cantidad	Valor (€)	Vr total (€)
Toneladas de digestato (t)	6.600,32	2	13.200,63
Toneladas de CO ₂ evitadas (t)	529,29	4,87	2.577,64
Energía eléctrica ahorrada (kWh)	41.032,40	0,114	4.677,69
Energía térmica ahorrada (kWh)	61.548,60	0,114	7.016,54
Energía eléctrica vendida a la red (kWh)	116.233,00	0,05	5.811,68
Total ingresos (€)			33.284,20

3.6.8 Evaluación económica

Los resultados para el proyecto son positivos, el VAN>0 y la TIR >5. La tabla 3.30 muestra el resumen de los indicadores.

Tabla 3.30. Resumen de los indicadores

Indicador	Valor
VAN	7.211,97
TIR	5,5%
Payback	10.30 años

En el anexo 2 se muestra el estado de resultados durante la vida útil del proyecto.

3. Resultados y discusión

3.6.9 Análisis de sensibilidad

Debido a la sensibilidad del proyecto, se va a hacer un estudio de como variarían los indicadores económicos con respecto a las siguientes variables:

- Precio del kWh
- Sin impuestos a la red
- Sin impuestos a la red y variando el precio del kWh
- Aumento en la energía consumida
- Inversión
- Precios digestato
- Sin ventas de digestato y con subvención

Los valores resaltados en verde oscuro corresponden al escenario real.

3.6.9.1 Precio de kWh

En la tabla 3.31 se muestra la sensibilidad a la retribución eléctrica.

Tabla 3.31. Sensibilidad al precio del kWh

Precio €/kWh	VAN (€)	TIR (%)	Payback (años)
0,05	7.211,97	5,5 4	10,30
0,06	16775,29	6,25	9,86
0,07	26338,60	6,9 3	9,45
0,08	35.901,92	7,61	9,03
0,09	45.465,23	8,26	8,73
0,1	55.028,54	8,91	8,41

En la medida en que aumenten los precios del kWh mejorarán los indicadores VAN y TIR, y la recuperación de la inversión disminuirá.

3. Resultados y discusión

3.6.9.2 Sin impuestos de conexión a la red

En la tabla 3.32 se muestra los cambios en los indicadores económicos del proyecto si no se pagaran los impuestos por conexión a la red.

Tabla 3.32. Sensibilidad al impuesto de conexión

Impuesto (€)	VAN (€)	TIR (%)	Payback (años)
1322,08	7.211,97	5,54	10,30
0	18.089,63	6,34	9,80

Se puede observar que si no se aplicara este impuesto, se mejoran los indicadores de rentabilidad, el VAN y la TIR aumentan en un 14,15% y 4,6%, respectivamente.

3.6.9.3 Precio de kWh y sin impuestos de conexión a la red

Si se varían los precios de kWh y no se pagan los impuestos de conexión actuales los indicadores de rentabilidad varían como se indica en la Tabla 3.33.

Tabla 3.33. Sensibilidad variación del precio del kWh y al impuesto de conexión

Precio €/mWh	Impuesto (€)	VAN (€)	TIR (%)	Payback (años)
0,05	1322,08	7.211,97	5,54	10,30
0,06	0	27.652,95	7,03	9,39
0,07	0	37.216,26	7,70	9,03
0,08	0	46.779,57	8,35	8,68
0,09	0	56.342,89	8,99	8,36
0,1	0	65.906,20	9,63	8,07

Se evidencia que la variación al alza del kWh y eliminar los impuestos de conexión mejoran notablemente los indicadores de rentabilidad.

3. Resultados y discusión

3.6.9.4 Aumento en la energía consumida.

Si existiera un aumento de energía consumida, los indicadores de rentabilidad varían como se indica en la Tabla 3.34.

Tabla 3.34. Sensibilidad en el aumento en la energía consumida

Consumo (kWh)	VAN (€)	TIR (%)	Payback (años)
102.581,00	7.211,97	5,54	10,30
112.839,10 (+10%)	15.263,76	6,14	9,92
123.097,20 (+20%)	23.315,54	6,72	9,57
133.355,30 (+30%)	31.367,32	7,29	9,25
143.611,40 (+40%)	39.419,10	7,85	8,94
314.532,01 (207%)	161.542,87	15,45	5,03

Como era de esperar al aumentar el consumo, mejoran los ingresos por energía ahorrada, y los indicadores. Lo óptimo es que toda la energía que se produjera pudiera ser consumida por la granja, lo cual corresponde al último análisis de la tabla, en el que se obtienen valores con muy buenas condiciones de rentabilidad, incluso si no se vendiera el digestato. Los indicadores VAN, TIR y Payback tendrían valores de €52.932,47, 8.77% y 8.53 años respectivamente.

3.6.9.5 Inversión

La inversión es un factor muy importante en el proyecto. La tabla 3.35 muestra los valores de los indicadores a la variación de esta variable.

Tabla 3.35. Sensibilidad en la inversión

Inversión (€)	VAN (€)	TIR (%)	Payback (años)
186.040,00	7.211,97	5,54	10,30
213400 (+10%)	-9.225,85	4,35	11,12
232800 (+20%)	-25.663,67	3,32	11,90
252200 (+30%)	-42.101,49	2,41	12,60

Se observa como a partir de un 10% adicional a la inversión actual, el proyecto deja de ser atractivo, el VAN es <0 y la TIR<5. La recuperación de la inversión también aumenta en años.

3. Resultados y discusión

3.6.9.6 Precio digestato

Es una de las variables que forman parte de los ingresos del proyecto, la Tabla 3.36 muestra cómo afecta su precio en los indicadores económicos.

Tabla 3.36. Sensibilidad al precio del digestato

Precio (€)	VAN (€)	TIR (%)	Payback (años)
0	- 101.398,43	-4,53	>15
1	-47.093,23	1,12	13,84
2	7.211,97	5,54	10,30
3	61.517,18	9,34	8,20
4	115.822,38	12,76	6,82

El proyecto no es atractivo si el digestato se vende por debajo de 2 €.

La viabilidad del proyecto sin vender el digesto dependerá si:

- Promueven las subvenciones
- Eliminan los impuestos a la red
- Aumentan los precios en un 30%-40%.

También es posible la viabilidad del proyecto sin vender el digestato, si toda la energía producida se consumiera, como se estudió en la sección 3.6.9.4.

3. Resultados y discusión

3.6.10 Impacto ambiental

A continuación se enumeran las actividades del proyecto que pueden producir impactos en el medio.

➤ **Acciones en la etapa de instalación**

Cultivo de la chumbera
Preparación del terreno
Siembra, riego y fertilización
Recolección y trituración
Construcción del digestor
Movimiento de tierras
Limpieza /instalación de equipos
Instalaciones hidráulicas
Construcción de drenaje
Instalaciones eléctricas
Instalaciones térmicas
Instalaciones de tanques de predigestión
Instalación del digestor

➤ **Acciones en la etapa de funcionamiento**

Preparación de sustratos
Producción de biogás
Almacenamiento del biogás
Purificación del biogás
Distribución de energía térmica
Distribución de energía eléctrica
Acondicionamiento del digestato
Funcionamiento y control

Una vez identificado las acciones se procede a su evaluación con la matriz de Leopold (Tabla 3.37).

3. Resultados y discusión

Tabla 3.37. Matriz de Leopold: Evaluación de impactos

(Magnitud/importancia)	FACTORES AMBIENTALES										
	AIRE		SUELO		AGUA		FLORA Y VEGETACIÓN	FAUNA	MORFOLOGÍA EN EL PAISAJE	MEDIO SOCIO - ECONÓMICO Y CULTURAL	
ACTIVIDADES DEL PROYECTO	Alteración de la atmósfera	Niveles de ruido	Uso de suelo	Características edáficas	Calidad del agua	Disponibilidad del agua	Especies existentes	Especies existentes	Alteración en el paisaje	empleo	Actividades comerciales
Preparación del terreno/ cultivo chumbera	-2/2		-3/4	-3/3		-3/4	-3/3	-2/2		+2/3	+2/2
Siembra, riego y fertilización			+2/4		-3/4	-3/2			+3/4	+2/3	+2/2
Recolección y trituración		-3/3						-1/1		+2/3	+2/2
Movimiento de tierras	-3/4	-2/4	-2/4	-3/4		-2/3		-3/5		+3/4	
Limpieza/ instalación de equipos	-3/5			-3/4		-2/2	-3/4	-2/3	-3/4	+1/2	+1/1
Instalaciones hidráulicas	-2/2			-2/3	-3/2	-3/4	-2/2	-3/3	-3/4	+2/3	+2/2
Construcción de drenaje	-2/1	-2/1	-3/4		-3/3		-3/4	-3/5	-4/5	+3/3	1/1
Instalaciones eléctricas										+2/3	+2/2
Instalaciones térmicas					-2/2	-2/3				+2/3	+1/2
Instalación de tanques de pre-digestión	-2/2	-1/1	-3/4				-2/2	-2/3	-3/4	+1/1	+1/2
Instalaciones del digestor	-2/3	-2/1	-4/6				-4/5	-4/5	-7/7	+1/2	+1/1
Preparación de sustratos	-3/4	-2/3								+1/2	+1/1
Producción de biogás	+8/10	-3/2								+2/3	+1/1
Almacenamiento del biogás	-2/3									+1/1	+2/3
Purificación del biogás	-3/3										+2/2
Acondicionamiento del digestato	-2/3		+6/8								+2/2
Funcionamiento de equipos	-4/5	-4/4			-3/4	-3/4				+2/2	+2/2

A continuación se analizó aquellos factores ambientales que se vieron afectados por mayor cantidad de acciones: Alteración atmosférica y medio socioeconómico y cultural (Tablas 3.38 y 3.39).

3. Resultados y discusión

Tabla 3.38. Análisis de la alteración atmosférica

Impacto	Alteración atmosférica: Aire
Actividades	<i>Preparación del terreno/ cultivo chumbera</i>
	<i>Movimiento de tierras</i>
	<i>Limpieza/ instalación de equipos</i>
	<i>Instalaciones hidráulicas</i>
	<i>Construcción de drenaje</i>
	<i>Instalación de tanques de pre-digestión</i>
	<i>Instalaciones del digestor</i>
	<i>Preparación de sustratos</i>
	<i>Producción de biogás</i>
	<i>Almacenamiento del biogás</i>
	<i>Purificación del biogás</i>
	<i>Acondicionamiento del digestato</i>
	<i>Funcionamiento de equipos</i>
Descripción	<p><i>La atmósfera puede verse afectada negativamente principalmente en la etapa inicial del proyecto, donde se realizan movimientos de tierra que causan partículas en suspensión, la siembra del cultivo, que requiere arados de la tierra, plaguicidas, ruidos por el funcionamiento de equipos, y los gases que estos emiten, olores por el manejo de purines, manipulación de químicos para la purificación del biogás.</i></p> <p><i>El impacto positivo es que el metano que anteriormente era enviado a la atmósfera es aprovechado para producir energía y disminuir los GEI .</i></p>
Medidas	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Gestión adecuada de escombros</i> • <i>Programa de seguridad industrial</i> • <i>Manejo adecuado de plaguicidas</i> • <i>Aislar los equipos con mayores ruidos</i> • <i>Medidas de tipo preventivo para evitar fugas de biogás y/o metano</i> • <i>Promover la creación de plantas de biogás para reducir gases de efecto invernadero e incrementar las instalaciones de energías renovables que permitan cumplir con el objetivo 20/20/20</i>

3. Resultados y discusión

Tabla 3.39. Análisis del medio socio-económico

Impacto	Medio socio-económico
Actividades	<i>Preparación del terreno/ cultivo chumbera</i>
	<i>Siembra, riego y fertilización</i>
	<i>Recolección y trituración</i>
	<i>Movimiento de tierras</i>
	<i>Limpieza/ instalación de equipos</i>
	<i>Instalaciones hidráulicas</i>
	<i>Construcción de drenaje</i>
	<i>Instalaciones eléctricas</i>
	<i>Instalaciones térmicas</i>
	<i>Instalación de tanques de pre-digestión</i>
	<i>Instalaciones del digestor</i>
	<i>Preparación de sustratos</i>
	<i>Producción de biogás</i>
	<i>Almacenamiento del biogás</i>
	<i>Purificación del biogás</i>
<i>Acondicionamiento del digestato</i>	
<i>Funcionamiento de equipos</i>	
Descripción	<i>Todas las actividades influyeron positivamente en la contratación de la mano de obra</i>
	<i>También se vio favorecido el sector empresarial y/o comercial que aumenta sus ventas y/o servicios cuando se está desarrollando un sector</i>
Medidas	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Crear políticas claras que permitan el desarrollo de un sector que impulse el gremio comercial y empresarial, aumente la generación de empleo, reduzca las emisión de gases efecto invernadero y sobre todo permita una autonomía energética</i> • <i>Generar estrategias de comunicación promocionando los beneficios de las instalaciones de energía renovables</i> • <i>Realizar capacitaciones a los empresarios del sector</i>

Se consideró importante evaluar también el uso de los suelos, no sólo por los impactos negativos que cause la construcción de la planta, sino también por el uso inadecuado de los purines (Tabla 3.40).

Después de la DA se obtiene un digestato estable, elimina materia orgánica fácilmente biodegradable, se elimina xenobióticos u otros contaminantes orgánicos (GIRO, 2011).

3. Resultados y discusión

Tabla 3.40. Análisis del impacto en los suelos

Impacto	Contaminación del suelo
Actividades	Preparación del terreno/ cultivo chumbera
	Siembra, riego y fertilización
	Movimiento de tierras
	Limpieza/ instalación de equipos
	Instalaciones hidráulicas
	Construcción de drenaje
	Acondicionamiento del digestato
Descripción	<p>Se tienen impactos negativos en el suelo debido a las construcciones, remoción de tierra, arado para el cultivo, principalmente porque se le cambia su uso. También se eliminan pastos propios de la zona.</p> <p>Se derivan impactos positivo en los suelos ya que después de la DA los purines se convierten en un digestato, cuyo uso en los cultivos asegura un fertilizante estable, libre de contaminantes orgánicos y más higienizados</p>
Medidas	<ul style="list-style-type: none"> • Programa de protección de suelos • Programa de recuperación de cobertura vegetal • Promover la ventaja de usar digestato después de un proceso de DA. • Generar estrategias de negocio para crear canales de distribución y venta del digestato adaptado a las necesidades de nutrientes de cada cultivo.

4. CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

- De los sustratos utilizados, el purín posee características físico-químicas muy variables, al igual que sus rendimientos, se obtuvieron potenciales de $21,16 \pm 1,5$, $107,05 \pm 3,4$ y $102,19 \pm 5,27$, $\text{CH}_4/\text{kg SV}$, los cuales son muy bajos para la producción de biogás.
- La chumbera como sustrato en la codigestión con el purín, mejoró los potenciales de rendimientos.
- En los ensayos batch con proporciones de chumbera de 5%, 7,5%, 10%, se encontraron potenciales de rendimientos de $117,98 \pm 3,5$, $122,00 \pm 5,12$ y $135,31 \pm 4,21$ L $\text{CH}_4/\text{kg SV}$, respectivamente. Los incrementos de la producción con respecto al purín fueron de 10,21, 13,96 y 26,40 %, respectivamente. La relación C/N fue de 16, 17 y 18 y las constantes cinética fueron de 0,0736, 0,0815 y 0,0826 d^{-1} , respectivamente.
- En ensayos batch con proporciones de chumbera de 15%, **30%**, 50%, se encontraron potenciales de rendimientos de $132,47 \pm 8,4$, **$159,43 \pm 6,5$** y $105,98 \pm 10,6$ L $\text{CH}_4/\text{kg SV}$, respectivamente. Los incrementos de la producción con respecto al purín fueron de 29,63, **56** y 3,70%. La relación C/N fue de 19, **23** y 28 y las constantes cinéticas fueron de 0,1491, **0,1866** y 0,0141 d^{-1} , respectivamente.
- La mezcla óptima en la codigestión batch fue 30% chumbera y 70% purín, con % de metano de $63 \pm 3,2\%$ y reducciones en ST, SV y DQO_T de $44,23 \pm 2,34$, $42,14 \pm 1,9$ y $53,72 \pm 2,7$ %, respectivamente.
- Para los ensayos en semicontinuo con VCO de 0,48 g SV/Ld, **0,71 g SV/Ld** y 0,95 g SV/Ld se obtuvieron rendimientos de metano de $352,55 \pm 20,68$, **415, 85 $\pm 38,11$** y $377,39 \pm 18$ L $\text{CH}_4/\text{kg SV}$. Siendo la óptima la VCO de **0,71 g SV/Ld**, con % de metano de $59,90 \pm 1,99$.

4. Conclusiones

- Adicionalmente la chumbera tiene gran potencial como inóculo, ya que promueve la producción de biogás en procesos que tengan problemas de inhibición.
- La factibilidad de plantas de biogás agroindustrial a pequeña escala es viable económicamente, siempre que la energía producida sea usada para autoconsumo, ya que los ahorros en la compra de (0,10 - 0.13) €/kWh a la red ameritan esta inversión, en contraste con el modelo de venta de energía a la red, con precios en el mercado mayorista que ronda alrededor de 0,05 €/kWh, haciendo inviable esta opción.

Otra variable importante que afecta los indicadores económicos es el digestato, en el modelo que vende energía a la red, es importante el ingreso por digestato para que resulten indicadores económicos viables, mientras que en el tipo de planta 100% autoconsumo, sin vender el digestato, es factible el proyecto y los indicadores económicos siguen siendo mejores.

Los proyectos que venden energía a la red son más sensibles a la variación de algunos parámetros, como son los impuestos que se pagan, variación de las inversiones, rendimientos en la producción de metano, por lo tanto se recomienda tener un control sobre éstos para que no afecte la rentabilidad del proyecto.

- A nivel socio-ambiental se obtienen grandes beneficios con la producción de energía renovable e independencia energética y la reducción de las emisiones de GEI. En este proyecto se deja de emitir anualmente a la atmosfera 529,29 t CO₂ (0.093t CO_{2-eq}/t purín digerido).

En la evaluación de impacto ambiental destaca la generación de empleo directo, relacionado con la gestión de las instalaciones e indirecto con el sector industrial que fabrica los digestores, mantenimiento, equipos de medición y control, que se requieren en las plantas de biogás.

Se obtiene un digestato con menos nitrógeno, más higienizado y con mejores propiedades agronómicas.

5. BIBLIOGRAFIA

5. Bibliografía

- Aboudi, K., Alvarez-Gallego, C., & Romero- Garcia, L. (2017). Influence of total solids concentration on anaerobic codigestion of sugar beet by products and livestock manures. *Science of The Total environment*, 438-445.
- Agencia Andaluza de la Energía. (2011). *Estudio Básico del Biogás*. Sevilla: Consejería de Economía Innovación y Ciencia.
- Aguilera, M., Borie, G., Periano, P., Mora, M. I., & Demanet, R. (1995). Caracterización de purines para su potencial uso como fertilizante y mejorador de suelos. *Agricultura técnica (Chile)* 55 (3-4), 251-256.
- Ahmad, R., Liu, Z., & Lund, M. (2016). The impact of biogas technology adoption for farm households-Empirical evidence from mixed crop and livestock farming system in Indonesia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Ahring, B. (2003). Perspectives for anaerobic digestion. . *Advances in Biochemical engineering/Biotechnology*, 1-30.
- AINIA. (2011). Curso Básico de biogás agroindustrial. *Caso práctico* (pág. 10). Paterna: AINIA.
- Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, S., & R., y. J. (2008). *biogas HANDBOOK*. University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs Vej 9-10.
- ALTERCEXA. (2010). *Informe complementario sobre el estudio de soluciones viables para el aprovechamiento del biogás en extremadura, en el marco del proyecto de cooperación transfronteriza España-Portuga ALTERXECA*. Mérida: Junta de Extremadura.
- Amaya Robles, J. E. (2009). *El cultivo de Tuna*. Trujillo-Peru.
- Amon, T., Amon, B., Kyvoruchko, V., Bodiroza, V., Potsch, E., & Zollitsch, W. (2006). Optimising methane yield from anaerobic digestion of manure: Effect of dairy systems and of glycerine supplementation. *El sevier*, 217-220.
- Angelidaki, I., & Sanders, W. (2004). assesment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Enviromental Science and Biotechnology*, 117-129.

5. Bibliografía

- APHA. (1995). *Standar methods for the examination of water and waster 19th ed.* Washington. D.C.American Public Health Association.
- Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 755-781.
- Ariunbaatar, J., Panico, A., Esposito, G., Pirozzi, F., & Lens, P. (2014). Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste. *Applied Energy*, 143-156.
- Arstupho, L., Jutakradsada, P., Laungphairojana, A., Rodriguez, F., & Kamwilaisak, K. (2016). Effect of temperature on increasing biogas production from sugar industrial wastewater treatment by UASB process in pilot scale. *Energy Procedia*, 30-33.
- Arthur, R., & Baidoo, M. (2011). Harnessing methane generated from livestock manure in Ghana, Nigeria, Mali and Burkina Faso. *Biomass and Bioenergy* 35, 4648-4656.
- Astals, S., Ariso, M., Gali, A., & Mata-Alvarez, J. (2011). Co-Digestion of pig manure and glycerine. Experimental and modelling study. *Journal of environmental Management*, 1091-1096.
- Bajracharya, T., Dhungana, E., Thapaliya, N., & Hamal, G. (2009). Purification and compression of biogas. *Journal of teh institute of engineering*, 7, 1-9.
- Bangson, H., & Angelidaki, I. (2008). Strategies for optimizing recovery of the biogas process following ammonia inhibition. *Bioresource Technology*(99), 7995-8001.
- Bian, b., Linlv., Yang, D., & Zhou, L. (2014). Migration of heavy metals in vegetable farmlands amended with biogas slurry in the Taihu Basin, China. *Ecological Engineering*, 380-383.
- BOE. (2013). Disposición 7540. *BOLETIN OFICIAL DEL ESTADO*, 51119-51207.
- Bonmatí, A., Flotats, X., Mateu, L., & Campos, E. (2001). Study of thermal hydrolysis as a pre-treatment to mesophilic anaerobic digestion of pig slurry. *Water Science and Technology*, 109-116.

5. Bibliografía

- Borja, R., & Rincón, B. (2011). Biogas production. *Comprehensive Biotechnology*, 785-798.
- Bouzoubaa, Z., Essoukrati, Y., Tabrouch, S., Hatimi, A., Gharby, S., & Harhar, H. (2016). Phytochemical study of prickly pear from southern Morocco. *Journal of the Saudi Societ of Agricultural Science*, 155-161.
- Bouzoubaa, Z., Essoukrati, Y., Tahrouch, S., Hatimi, A., Gahrby, S., & Harhar, H. (2014). Physico-chemical study of two varieties of prickly pear ('Achefri' and 'Amouslem') of southern Morocco. . *Les Technologies de Laboratoire*, 137-144.
- Buendia, I., Fernández, F., Volaseñor, J., & Rodríguez, L. (2009). Feasibility of anaerobic co-digestion as treatment option of meat industry wastes. *Bioresource Technology* (100), 1903-1909.
- Bustos, E. (1981). Alcoholic beverage from Chilean *Opuntias ficus indica*. *American Journal of Enology and Viticulture*, 228-229.
- Carrère, H., Dumas, C., Battimelli, A., Batstone, D., Delgenes, J., Steyer, J., y otros. (2010). Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability. *Journal of Hazardous Materials*, 1-15.
- Cechi, F., Pavan, P., & Mata-Alvarez, J. (1996). Anaerobic co-digestion of sewage sludge: application to the macroalgae from the Venice lagoon. *Resources, Conservation and Recycling*, 57-66.
- Cesaro, A., & Velgiorno, B. (2014). Pretreatment methods to improve anaerobic biodegradability of organic municipal solid waste fraction. *Chemical Engineering Journal*, 24-37.
- Chandra Kandpal, T., & Purohit, P. (2007). Techno-economic of biogas-based water pumping in India: An attempt to internalize CO₂ emissions mitigation and other economic benefits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1208-1226.
- Chen, R., Murillo, M., Yuan, Z., Marsh, T., Bustamante, M., Hernandez, W., y otros. (2015). Responses of anaerobic microorganisms to different culture conditions and corresponding effects of biogas production and solid digestate. *Biomass and Bioenergy*, 84-93.

5. Bibliografía

- Chen, Y., Cheng, J., & Creamer, K. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource technology*(99), 4044-40064.
- Cipiti, F., Barbera, O., Brigualio, N., Giacoppo, G., Italiano, C., & Vita, A. (2016). Design of a biogas steam reforming reactor: A modelling and experimental approach. *Hiridrogen Energy*, 1-7.
- CONFERENCIA DE LA ONU SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO. (11 de 12 de 2015). www.consilium.europa.eu. Recuperado el 09 de 10 de 2016, de www.consilium.europa.eu
- Croce, S., Wei, Q., D'Imporzano, G., Dong, R., & Adani, F. (2016). Anaerobic digestion of straw and stover. The effect of biological process optimization and pre-treatment on total bio-methane yield and energy performance. *Biotechnology Advances*, 1289-1304.
- Cronquist, A. (1981). *An integrated system of classification of flowering plants*. New York: Colombian University press.
- Dada, O., & Mbohwa, C. (2017). Biogas Upgrade to Biomethane from Landfill Wastes: A review. *Procedia Manufacturing*, 333-338.
- Danes, R., Molina, V., Prats, I., Alamos, M., Boixadera, J., & Torres, E. (1996). *Manual de gestió dels purins i la seva reutilització agrícola*. Generalitat de Catalunya.
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2010). *Biogas from waste and renewable Resources: An Introduction*. Weinheim, Germany: Wiley VCH.
- Do Nascimento, T., Damilano, E., Gomes, A., Bezerra, F., Rodriguez, R., D., C., y otros. (2016). Potential for biofuels from biomass of prickly pear cladodes: Challenges for bioethanol and biogas production in dry areas. *Biomass and Bioenergy*, 215-222.
- EBA, E. B. (2015). *Biogas report*. Bruselas.
- El Kossori, R., Villaume, C., El boustani, E., Sauvaire, Y., & Mejean, L. (1998). Composition of pulp, skin and seed of prckly pear fruit (*Opuntia ficus indica* sp.). *Plant foods for human nutrition*, 236-250.

5. Bibliografía

- Equimar. (11 de 04 de 2017). *www.equimar.mx*. Recuperado el 11 de 04 de 2017, de <http://www.equimar.mx>
- Esmatges-Teira, M., & Flotats, X. (2003). A method for livestock waste management planning in NE Spain. *Waste Management*, 917-932.
- Espinosa, J., Borrocal, J., M., J., Zorilla, C., & J., M. (1973). Quelques proprietes et essais preliminaires de conservation des fruits et du jus de figue de barbarie (opuntia ficus indica). *Fruits*, 285-289.
- EUR-LEX. (12 de 12 de 2009). *RESUMEN DE LA LEGISLACION EUROPEA SOBRE GESTIÓN DE RESIDUOS*. Recuperado el 07 de 10 de 2016, de <http://eur-lex.europa.eu>: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=URISERV%3Aev0010>
- EUROBSERVE. (2014). *BIOGAS BAROMETER*.
- European Biogas Association EBA. (2016). *Biogas report 2015*. Bruselas.
- EUROSTAT. (2015). *Agriculture, fishery and forestry static*. Luxembourg: Publications office of the European Union.
- Fannin, K. (1987). Anaerobic digestion of biomass. *Elsevier applied science LTD*, 171-196.
- Fdez-Guelfo, L., Alvarez-Gallego, C., & Sales, D. y. (2011). Biological pretreatments to enhance organic matter hydrolysis and solubitation from organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *Chemical Engineering Journal*, 249-252.
- Feng, H., Qu, G.-f., Ning, P., Xiong, X-feng., Jia, L.-j., y otros. (2011). Theresource Utilization of Anaerobic Fermentation Residue. *Procedia Enviromental Science*, 1092-1099.
- Fernández García, L. (2016). Selección y dimensionado de un sistema de generación de biogás mediante digestión anaerobia de purines digerido con glicerina. Cadiz, Andalucía, España.
- Flotats, X. (2010). Biogas y gestión de deyecciones ganaderas. *International Veterinary Information Service (IVIS)*, 22-28.

5. Bibliografía

- Flotats, X., Magri, A., Paltsi, J., Sole, F., Illa, J., & Campo, E. (2004). *Guia de los tratamientos de las deyecciones ganaderas*. Lleida: Agencia de Residuos de Cataluña. Departamento del medio ambiente.
- Flotats, X.; Sarquella, L. (2008). *Producció de biogas per codigestió anaerobia*. Barcelona: Institut català d'Energia. Generalitat de Catalunya.
- Frankle-whittle, I., Walter, A., Ebner, C., & Insam, H. (2014). Investigation in tothe effect of high concentrations of volatile fatty acids in naerobic digestion on methanogenic communities. *Waste Management*, 2080-2089.
- Garfi, M., Marti-Herrero, M., Garwood, A., & Ferrer, I. (2016). Household anaerobic digesters for biogas productionin Latin America: A review. *EISEVIER*, 599-614.
- Gewal, D., Siokos, K., Karella, S., & Spliethoff, H. (2012). Waste heat recovery from a landfill gas fired power plant. *Renewable Sustainable Energy*, 1779-1789.
- GIRO. (2011). Análisis económicos de plantas de biogás. *Gestión de Residuos*. Tarragona.
- Goto, K., Alam, F., Okabe, H., Shimizu, S., & Fujioka, Y. (2011). Developmentof a low cost CO2 Capture System with a Novel Absorbent under the COCS Poject. *Energy Procedia* , 253-258.
- Gou, C., Yang, Z., Huang, J., Wang, H., Xu, W., & Wang, L. (2014). Effect of temperature and organic loading rate on the performance and microbial community of anaerobic co-digestion of waste activated sludge and food waste. *Cremosphere*, 146-151.
- Hamdi, M. (1997). Prickly pear cladodes and fruits as potential raw material for bioindustries. *Bioprocess Engineering*(17), 387-391.
- Hendriks, A., & Zeeman, G. (2009). Pretreatments to enhancen the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 1-10.
- Hendroko, R., Wahono, S., Praptinigsih, G., Salafudin, A., Yudhanto, I., & Dohong, S. (2014). The study of Optimization Hydrolysis Substrate Retention Time and Augmentation as an Effort to Increasing Biogas Productivity from *Jatropha curcas* Linn. Capsule Husk at two Stage Digestion. *Procedia*, 255-262.

5. Bibliografía

- Herrmann, A. (2013). Biogás production from maize: current state, challenges and prospects. 2. Agronomic and enviromental aspect. *Bioenergy Research*, 372-387.
- Holm-Nielsen, J., Alseadi, T., & Oleskowicz-Propiel, P. (2009). The future anaerobic digestion and biogas utilization . *Bioresource tecchnology* (100), 5478-5484.
- IDAE. (2007). *BIOMASA: Digestores anaerobios*. Madrid: Ministerio de Industria y Turismo.
- IPCC, G. I. (2014). *Informe anual de IPCC*. Nairobi: Organización Meteorológica mundial.
- Irruretagoiena, I., & Gonzalez, I. (2010). *Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás*. Madrid: PSE PROBIOGAS.
- Jard, G., Jackowiak, D., Carrere, H., Delgenes, J., Torrijos, M., Steyer, J., y otros. (2012). Batch and semi-continuous anaerobic digestion of palmaria palmata: Comparison with Saccharina latissima and inhibition studies. *Chemical Engieneering Journal*, 513-519.
- Jeongsik, K., P., C., Tak-hyun, K., Mynggu, L., Sanyong, K., K., S.-W., y otros. (2003). Effects of Various Pretreatments for Enhanced Anaerobic Digestion with Waste Activated Sludge. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 271-275.
- Jigar, E., Sulaiman, H., Asfaw, A., & Bairu, A. (2011). Study on Renewable biogas energy production from cladodes of opuntia ficus indica. *Journal of Food and Agriculture Science*, 44-48.
- Jiménez, E., & González, E. (2009). *Microturbinas: Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás*. Madrid: PSE PROBIOGAS.
- Kaparaju, P., Serrano, M., & Angelikadi, I. (2009). Effect of reactor configuration on biogas production from wheat straw hydrolysate. *Bioresource Technology*, 6317-6323.
- Kapdi, S., Vijai, V., Rajesh, S., & Prasad, R. (2005). Biogas scrubbing compression and storage: perspective and prospectus in Indian context. *Renewable Energy*, 30, 1195-1202.

5. Bibliografía

- Kobayasshi, T., Li, Y., Kubota, K., Harada, H., & Maeda, T. Y. (2012). Characterization of sulfide- oxidizing microbial mats developed inside a full scale anaerobic digester employing biological desulfuration. *Applied microbiology and biotechnology*, 93, 847-857.
- Krich, K., Augestein, D., Balmale, J., Benemann, J., Rutledge, B., & Salour, D. (2005). *Biomethane from dairy waste a source book for the production and use of renewable natural gas in california*. California: USDA Rural Development.
- Leon, C. (2007). *Evaluación de Inversiones: Un enfoque privado y social*. Lima-Perú: Disponible en www.eumed.net/libros/2007a/232.
- Leopold, L., Clarke, F., Hanshaw, B., & Baisey, J. (1971). *A procedure for evaluating enviromental impact*.
- Li, D., Liu, S., MI, L., Li, Z., Yuan, Y., Yan, Z., y otros. (2015). Effect of feedstock ratio and organic loading rate on the anaerobic mesophilic codigestion of rice straw and cow manure. *Bioresource Technology*, 319-326.
- Lin, W., Chen, Y., & Tseng, C. (2013). Pilot-scale chemical- biological system for efficient H₂S removal from biogas. *Bioresource Technology*, 135, 283-291.
- Lin, W., Pei, C., & Tseng, C. (2013). Pilot-Scale chemical-niological system efficient H₂S removal from biogas. *Bioresource technology*, 283-291.
- Liu, C.-F., X.-Z., Y., Zeng, G.-M., Li, W.-W., & Li, J. (2008). Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource Technology*, 882-888.
- Mace, S., Costa, J., & Mata-ALvarez, J. (2001). Sewage Sludge pre-treatments for enhancing its anaerobic biodegradability. e. *Bioprocessing of Solid Waste and Sludg*, 1-9.
- Madesn, M., Holm-Nielsen, J-Bo., & Esbesen, k.-H. (2011). Monitoring of anaerobic digestion processes: Areview perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 3141-3155.
- Mahdy, A., Fotidis, L., Mancini, E., Ballesteros, M., González-Fenández, C., & Angelikadi, I. (2017). Ammonia tolerant inocula provide a good base for

5. Bibliografía

- anaerobic digestion of microalgae in third generation biogas process. *Bioresource Technology*, 272-278.
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on Research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(45), 540-55.
- Mao, C., Feng, Y., Wang, Z., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 540-555.
- MARM, Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. (2013). *Anuario de estadística 2013*. Madrid: MARM.
- MARM, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2010). *El sector Del Biogas Agroindustrial en España*. Madrid.
- Mast, B., Lemme, A., Oeschner, H., Reinard-Hanisch, W., & Graeff-Honninger, S. (2014). Methane yield potential of novel perennial biogas crops influenced by harvest date. *Industrial Crops and Products*, 194-203.
- Mata-Alvarez, J., Mace, S., & Llabres, P. (2000). An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*, 3-16.
- Mehedi, M., Nurul, M., Mohiuddine, M., Akhtarg, A., & Begumi, H. (2017). Adaptation barriers and strategies toward climate change: Challenges in the agricultural sector. *Journal of Cleaner Production*, 968-706.
- Mehind, A., & Normak, A. (2009). *Study on grinding biomass as pre-treatment for biogasification*. Recuperado el 12 de 02 de 2017, de Agronomy research: <http://www.eau.ee/~agronomy/>
- Méndez-Gallegos, J., Rossel, D., Amante Orozco, A., Gomez-Gonzalez, A., & Garcia-Herrera, J. (2010). El nopal en la producción de biocombustible. *Revista salud pública y nutrición, Edición Especial* (5), 70-83.
- Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente. (07 de 10 de 2016). www.managrama.gob.es. Recuperado el 07 de 10 de 2016, de http://www.managrama.gob.es/imagenes/es/pemaraprobado6noviembrecondae_tcm7-401704.pdf

5. Bibliografía

- Molinuevo-Salces, B., M., G.-G., Gonzalez-Fernandez, M., Moran, A., & Gomez, X. (2010). Anaerobic codigestion of livestock with vegetableprocessing wastes: A statistical analysis. *Bioresource Technology*, 9479-9485.
- Morlachchini, M., Armerio, M., & Piva, G. (1992). L'a alimentazione quale mezzo per ridurre l'azione inquinante delle diezioni suine. . *Supplemento a l'informatores agrario n.18*, 7-10.
- Mussnug, J., Klassen, V., Schüter, A., & Kruse, O. (2010). Microalgae as substrate for fermentative biogas production in a combined biorefinery concept. *Journal of Biotechnology*, 51-56.
- Nannos, N., Bersimis, S., & Georgakellos, D. (2013). Evualating climate change in Grece trough the insurance compensations of the rural production damages. *Global and Planetary Change*, 51-66.
- Nobel, P. (1999). "*Biología ambiental*" en "*Agroecología, cultivo, y usos del Nopal*". Roma: Estudio F.A.O.
- Obach, J., & Lemus, M. (2006). Bio energy generation using opuntia ficus indica in arid and semi-arid zones of developing countries. *Venice Conference 2006 (November 2006)*.
- Olsson, L., & Falde, M. (2014). Waste(d) potencial: a soci-technichal analysis of biogas production and use in Sweden. *Journal of cleanner production*, 1-9.
- Olugasa, T., Odelosa, I., & M.O., O. (2014). Energy production of biogas: A conceptual review for use in Nigeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews(32)*, 770-776.
- Pagés, J., Pereda, I., Lundin, M., & Savari, I. (2011). Co-digestion of different waste mixture from agroindustrial activities: kinetic evaluation and synergetic effects. *Bioresource Technology*, 10834-10840.
- Palatsi, J., Laurení, M., Andrés, M., Floltats, X., Nielsen, H., & Angelikadi, I. (2009). Strategies for recovering inhibition caused by long chain fatty acids on anaerobic thermophilic biogas reactor. *Bioresource Technology*, 4588-4596.
- Pinto Arroyo, S. (2007). *Valoración de impactos ambientales*. INERCO.

5. Bibliografía

- PROBIOGAS. (2009). *Manual de Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales*. Madrid: Gobierno de España.
- PROBIOGAS. (2010). *Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás*. Madrid.
- PROBIOGAS. (2011). *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)*. Madrid.
- Ramos, J. (2014). TESIS DOCTORAL : Producción de biogás a partir de biomasa de la microalga *scenedemus* S.P. procedentes de diferentes procesos. Madrid, España.
- Rasapoor, M., Ajasbshirchi, Y., Adl, M., Abdi, R., & Gharibi, A. (2016). The effect of ultrasonic pretreatment on biogas generation yield from organic fraction of municipal solid waste under medium solids concentration circumstance. *Energy Conversion and Management*, 444-452.
- Retamal, N., Duran, J., & Fernandez, J. (1987). Ethanol production by fermentation of cladodes and fruits of prickly pear *Cactus Opuntias ficus indica*(L) Miller. *Science of Food and Agriculture*, 303-311.
- Rios Ramos, J., & Quintana, M. V. (2004). *Manejo general del cultivo del Nopal*. Cordoba-Mexico.
- Rodriguez, a., & Lomas, J. (1999). Kinetic study of the anaerobic digestion of the solid fraction of piggery slurries. *Biomass and Bioenergy*, 435-443.
- Rodriguez, C., Alaswad, A., Benyounis, K., & Olabi, A. (2016). Pretreatment techniques used in biogas production from grass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Saenz, C. (2000). Processing technologies: an alternative for cactus pear (*Opuntia* spp.) fruits and cladodes. *Journal of Arid Environments*, 209-225.
- Saenz, C., Berger, H., Carvales, J., Garcia de Cortazar, V., Higuera, I., Mondragon, C., y otros. (2006). *Utilización agroindustrial del Nopal*. Roma: Estudio de la F.A.O.

5. Bibliografía

- SAGARPA. (03 de 01 de 2015). *www.sagarpa.gob.mx*. Recuperado el 25 de 10 de 2016, de <http://sagarpa.gob.mx/Delegaciones/bajacalifornia/Boletines/Paginas/2015B005.aspx>
- Savery, W., & Cruzan, D. (1972). Methane recovery from chicken manure digestion. *Water Pollution Control Federation*, 44, 2349-2354.
- Sawaya, M., Khatchadourian, H., Safi, W., & Al- Muhammad, H. (1983). Chemical characterization of prickly pear pulp, *Opuntia ficus indica*, and the manufacturing of prickly pear Jam. *Journal Food Technology*, 183-193.
- Scano, E., Asquer, C., Pistis, A., Orto, L., Demontis, V., & Cocco, D. (2014). Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant. *Energy Conversion and Manager*, 22-30.
- Schmidt, T., Ziganshin, A., Nicolausz, M., Scholwin, F., Nelles, M., Kleinsteuber, S., y otros. (2014). Effect of the reduction of the hydraulic retention time of 1.5 days at constant organic loading in CTR, ASBR, and fixed-bed reactor performance and methanogenic community composition. *Biomasa & Bioenergy*, 241-248.
- Silva, G., Couturier M, B., Buleón, A., & Rouau, X. (2012). Effect of grinding processes on enzymatic degradation of wheat straw. *Bioresource Thechnology*, 192-200.
- Singh, M., & Srivastava, R. (2011). Sequencing batch reactor technology for biological wastewater treatment: a review. *Asia-Pacific Journal of chemical engineering*(6), 3-13.
- Sosa, V., & Garcia, M. (1997). *Especies arbóreas y arbustivas para las zonas áridas y semiáridas de América Latina*. Santiago de Chile: FAO.
- Stintzing, F., & Carle, R. (2005). Cactus stem (*Opuntia* spp): a review on their chemistry, technology, and uses. *Molecular Nutrition & Food Research*(49), 175-194.
- Sudzuki, F. (1999). "Anatomía y morfología" En "Agroecología, cultivo y usos del nopal". Roma: Estudio F.A.O Producción y Protección vegetal.

5. Bibliografía

- Temilola, T., Olugasa, I., Odesola M.O., & Oyewola. (2014). Energy production from biogas: A conceptual review for use in Nigeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 770-776.
- Tiehm, A., Nickel, K. Z., & Neis, U. (2001). Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization. *Water Resource*, 2003-2009.
- United States Environmental Protection Agency [US EPA]. (2002). *Wastewater Technology Fact Sheet Anaerobic Lagoons*. Recuperado el 14 de 07 de 2015, de www.epa.gov: www.epa.gov/own/mtb/mtbfact.htm
- Uribe, J., Varnero, M., & Benavides, C. (1992). Biomass of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L Mill) as bovine manure anaerobic digestion accelerator. *Simiente* (62), 14-14.
- Varnero, M. (2011). *Manual de Biogas*. Santiago de Chile: FAO.
- Varnero, M., Uribe, J., & Lopez, X. (1992). Factibilidad de una biodigestión anaerobia con mezclas de guano caprino y cladodios de tuna (*Opuntia ficus-indica* L Mill). *Terra aridae* (11), 166-172.
- Vavilin, V., Fernandez, B., Palatsi, J., & Flotats, X. (2008). Hydrolysis Kinetic in anaerobic degradation of particulate organic material: An overview. *Waste Management*, 939-951.
- Vavrus, S., Ruddiman, W.F., & Kutzbach, J.E. (2008). Climate model test of the anthropogenic influence on greenhouse-induced climate change: the role of early human agriculture, industrialization and vegetation feedbacks. *Quaternary Science review*, 1410-1425.
- VDI 4630. (2006). *Fermentation of organic materials. Characterisation of the substrate, sampling, collection data, fermentation tests*. Düsseldorf.
- Velez, A. (2017). *Biogas production & electricity Generation Opuntia*. Mexico D.F.
- Wall, D., Allen, E., Stracciaini, B., O'kiely, P., & Murphy, J. (2014). Optimisation of digester performance with increasing organic loading rate for mono- and codigestion of grass silage and dairy slurry. *Bioresource Technology*, 422-428.

5. Bibliografía

- Wang, X., Yang, G., Feng, Y., Ren, G., & Han, X. (2012). Optimizing feeding composition and carbon-nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw. *Bioresource Technology*, 78-83.
- Wang, Y., Zhang, Y., Wang, J., & Meng, L. (2009). Effect of volatile fatty acid concentration on methane yield and methanogenic bacteria. *Biomass and Bioenergy*, 848-853.
- Ward, A., Hobbs, P., Holliman, P., & Lones, D. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 7928-7940.
- Yahia, E., & Saenz, C. (2011). Cactus pear (*Opuntia* species). *Postharvest Biology and Technology of tropical and subtropical Fruits*, 290-329.
- Zamasiya Byron, M., Nykahadzoi, k., & Mukarami, B. (2017). Factors influencing smallholder farmer's behavioural intention toward adaptation to climate change in transitional climatic zones: A case study of Hwedza District in Zimbabwe. *Journal of Environmental Management*, 233-239.
- Zhang, C., Haijia, S., Jan, B., & Tianwec, T. (2014). Review the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 383-392.
- Zhang, Z., Zhang, G., Li, W., Li, C., & Xu, G. (2016). Enhanced biogas production from sorghum stem by co-digestion with cow manure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1-6.
- Zhen, G., Lu, X., Kobayashi, G., Kumar, G., & Xu, K. (2016). Anaerobic codigestion on improving methane production from mixed microalgae (*Scenedesmus* sp., *Chorella* sp) and food waste: Kinetic modeling and synergistic impact evaluation. *Chemical Engineering journal*, 332-341.

ANEXOS

Anexo 1. Costes de una ha de chumbera con fines energéticos

Concepto	Cantidad/ha	Vr /uni. (€)	Vr Total (€)
<i>Materia vegetativo (Cladodios o pencas)</i>	45.000,00	0,1	4.500,00
<i>Preparación del terreno</i>	1	70	70,00
<i>Abonado de fondo</i>	1	120	120,00
<i>Reparto abonado</i>	1	30	30,00
<i>Sistema de riego</i>	1	1200	1.200
<i>Siembra</i>	1	800	800
Total			6.720,00

Costes de cosechadora industrial

Concepto	Vr Total (€)
<i>Maquina cosechadora de chumbera</i>	3.000,00

Costes anualizados de cultivo

Concepto	Cantidad/ha	Vr /uni. (€)	Vr Total (€)
<i>Herbicida y aplicación</i>	1	40	40
<i>Abonado cobertera 100Kg /ha Urea 46%</i>	100	040	40
<i>Riego</i>	1	120	120
<i>Control de hierbas</i>	1	30	30
<i>Recolección</i>	1	250	300
Total			530

Para la obtención de biomasa se obtienen rendimientos de 600^a 800 ton/ha. (Velez, 2017)

Los cortes se hacen cada cuatro meses y las plantaciones permanecen 10- 20 años de vida

Anexo 2. Balance económico de 1-5 años.

Años	0	1	2	3	4	5
Ingresos						
Energía eléctrica ahorrada (granja)		4.677,69	4.771,25	4.866,67	4.964,01	5.063,29
Energía térmica ahorrada (granja)		7.016,54	7.156,87	7.300,01	7.446,01	7.594,93
Energía vendida a la red		5.811,68	5.927,91	6.046,47	6.167,40	6.290,75
Venta de digestato		13.200,63	13.464,64	13.733,94	14.008,62	14.288,79
Venta de bonos de carbono		2.577,62	2.629,17	2.681,76	2.735,39	2.790,10
Total ingresos		33.284,17	33.949,85	34.628,85	35.321,42	36.027,85
Menos costes de operación						
Reparación y mantenimiento de equipos (1,5% de la inversión)		2.775,60	2.831,11	2.887,73	2.945,49	3.004,40
Seguros y administración		1.500,00	1.530,00	1.560,60	1.591,81	1.623,65
Personal de planta		7.200,00	7.344,00	7.490,88	7.640,70	7.793,51
Gastos generales		2.000,00	2.040,00	2.080,80	2.122,42	2.164,86
Peajes a pagar a la red + impuestos de energía exportada		1.728,90	1.763,48	1.798,75	1.834,72	1.871,42
Total costes de operación		15.204,50	15.508,59	15.818,76	16.135,14	16.457,84
EBITDA		18.079,67	18.441,26	18.810,08	19.186,29	19.570,01
Amortización		12.336,00	12.582,72	12.834,37	13.091,06	13.352,88
BAI		5.743,67	5.858,54	5.975,71	6.095,22	6.217,13
Impuestos sociedades 30%		1.723,10	1.757,56	1.792,71	1.828,57	1.865,14
BDI		4.020,57	4.100,98	4.183,00	4.266,66	4.351,99
Inversión	-185040					
CASH FLOW	-185040	16.356,57	16.683,70	17.017,37	17.357,72	17.704,87
CASH FLOW ACUMULADO	-185040	-168.683,43	-151.999,74	-134.982,37	-117.624,65	-99.919,78

Anexo 3. Balance económico de 6-10 años.

Años	6	7	8	9	10
Ingresos					
Energía eléctrica ahorrada (granja)	5.164,55	5.267,84	5.373,20	5.480,66	5.590,28
Energía térmica ahorrada (granja)	7.746,83	7.901,76	8.059,80	8.221,00	8.385,42
Energía vendida a la red	6.416,56	6.544,90	6.675,79	6.809,31	6.945,50
Venta de digestato	14.574,56	14.866,06	15.163,38	15.466,64	15.775,98
Venta de bonos de carbono	2.845,90	2.902,82	2.960,87	3.020,09	3.080,49
Total ingresos	36.748,41	37.483,38	38.233,04	38.997,70	39.777,66
Menos costes de operación					
Reparación y mantenimiento de equipos (1,5% de la inversión)	3.064,49	3.125,78	3.188,29	3.252,06	3.317,10
Seguros y administración	1.656,12	1.689,24	1.723,03	1.757,49	1.792,64
Personal de planta	7.949,38	8.108,37	8.270,54	8.435,95	8.604,67
Gastos generales	2.208,16	2.252,32	2.297,37	2.343,32	2.390,19
Peajes a pagar a la red + impuestos de energía exportada	1.908,85	1.947,02	1.985,96	2.025,68	2.066,20
Total costes de operación	16.787,00	17.122,74	17.465,19	17.814,50	18.170,79
EBITDA	19.961,41	20.360,64	20.767,85	21.183,21	21.606,87
Amortización	13.619,94	13.892,34	14.170,19	14.453,59	14.742,66
BAI	6.341,47	6.468,30	6.597,67	6.729,62	6.864,21
Impuestos sociedades 30%	1.902,44	1.940,49	1.979,30	2.018,89	2.059,26
BDI	4.439,03	4.527,81	4.618,37	4.710,73	4.804,95
Inversión					
CASH FLOW	18.058,97	18.420,15	18.788,55	19.164,32	19.547,61
CASH FLOW ACUMULADO	- 81.860,81	- 63.440,66	- 44.652,10	- 25.487,78	- 5.940,17

Anexo 4. Balance económico de 11 a 15 años

Años	11	12	13	14	15
Ingresos					
Energía eléctrica ahorrada (granja)	5702,082397	5.816,12	5.932,45	6.051,10	6.172,12
Energía térmica ahorrada (granja)	8553,123595	8.724,19	8.898,67	9.076,64	9.258,18
Energía vendida a la red	7084,405651	7.226,09	7.370,62	7.518,03	7.668,39
Venta de digestato	16091,49631	16.413,33	16.741,59	17.076,42	17.417,95
Venta de bonos de carbono	3142,104074	3.204,95	3.269,05	3.334,43	3.401,11
Total ingresos	40573,21203	41.384,68	42.212,37	43.056,62	43.917,75
Menos costes de operación					
Reparación y mantenimiento de equipos (1,5% de la inversión)	3383,440912	3.451,11	3.520,13	3.590,53	3.662,35
Seguros y administración	1828,49163	1.865,06	1.902,36	1.940,41	1.979,22
Personal de planta	8776,759824	8.952,30	9.131,34	9.313,97	9.500,25
Gastos generales	2437,98884	2.486,75	2.536,48	2.587,21	2.638,96
Peajes a pagar a la red + impuestos de energía exportada	2107,520027	2.149,67	2.192,66	2.236,52	2.281,25
Total costes de operación	18534,20123	18.904,89	19.282,98	19.668,64	20.062,02
EBITDA	22039,01079	22.479,79	22.929,39	23.387,97	23.855,73
Amortización	15037,51517	15.338,27	15.645,03	15.957,93	16.277,09
BAI	7001,495629	7.141,53	7.284,36	7.430,04	7.578,64
Impuestos sociedades 30%	2100,448689	2.142,46	2.185,31	2.229,01	2.273,59
BDI	4901,046941	4.999,07	5.099,05	5.201,03	5.305,05
Inversión					
CASH FLOW	19938,56211	20.337,33	20.744,08	21.158,96	21.582,14
CASH FLOW ACUMULADO	13998,39112	34.335,72	55.079,80	76.238,77	97.820,91