



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño e implementación de reactor anaerobio
semicontinuo para aprovechamiento de cáscaras de cacao**

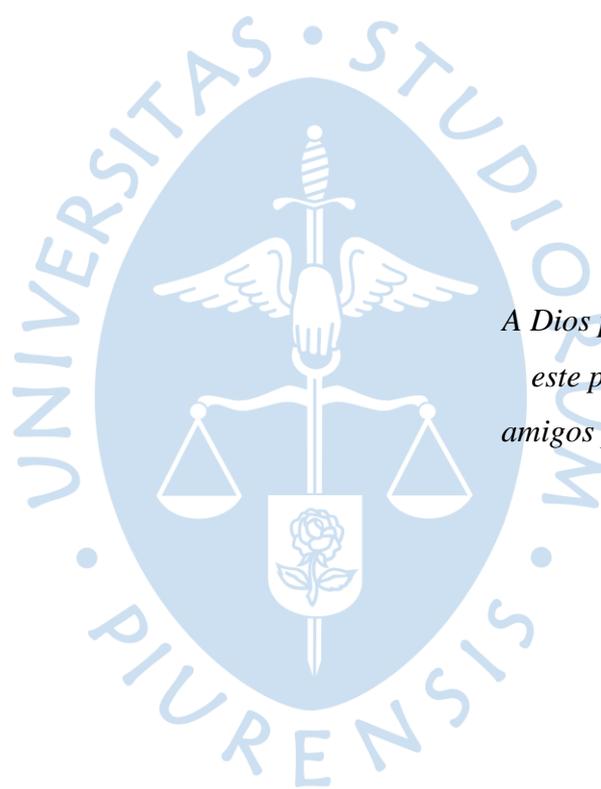
Tesis para optar el Título de
Ingeniero Mecánico – Eléctrico

Manuel Edmundo Merino Chumacero

Asesora:
Mgtr. Ing. Irene Alvarado Tabacchi

Piura, agosto de 2019





A Dios por permitirme concluir este proyecto y a mi familia y amigos por su apoyo constante.



Resumen Analítico-Informativo

Diseño e implementación de reactor anaerobio semicontinuo para aprovechamiento de cáscaras de cacao

Manuel Edmundo Merino Chumacero

Asesor(es): Mgtr. Ing. Irene Alvarado Tabacchi

Tesis.

Ingeniero Mecánico Eléctrico

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, Agosto de 2019

Palabras claves: Digestión anaerobia / biodigestores / energías renovables / tratamiento de residuos / cáscara de cacao

Introducción: En el proceso productivo del cacao se generan gran cantidad de residuos orgánicos, entre los que destaca la cáscara de la bellota del cacao. Actualmente, la cáscara de cacao es dejada en los campos de cultivo para su degradación al aire libre y reincorporación de sus nutrientes a la tierra. Sin embargo, esta práctica conlleva la proliferación de insectos, patógenos, malos olores y enfermedades en las plantas y animales. Una alternativa a esta práctica es la aplicación de la digestión anaerobia, un proceso bioquímico que permite degradar la materia orgánica para obtener biogás y biofertilizante. En el presente trabajo se realizó el estudio experimental de la biodigestión de la cáscara de cacao para determinar su potencial de producción de biometano y se estableció una metodología para el dimensionamiento, puesta en marcha y operación de biodigestores de residuos orgánicos.

Metodología: La metodología aplicada fue de carácter teórico y experimental, siguiendo los lineamientos de la normativa alemana VDI 4630 para garantizar resultados reproducibles y validables. Se realizaron ensayos de digestión BMP y ensayo de biodigestión semicontinua para determinar la biodegradabilidad y potencial de metano de la cáscara de cacao. Los resultados de los ensayos son base para la determinación del tamaño y condiciones operacionales del reactor a implementar.

Resultados: Se determinó el potencial de producción de biometano de la cáscara de cacao para determinadas condiciones de operación y distintos regímenes de carga orgánica. Además, se establecieron métodos y procedimientos para el estudio experimental de la biodigestión de residuos orgánicos, siguiendo las recomendaciones establecidas por la normativa técnica VDI 4630. Finalmente, también se estableció una metodología para el dimensionamiento, puesta en marcha y operación de biodigestores de residuos orgánicos.

Conclusiones: La cáscara de cacao es un sustrato atractivo y biodegradable por medio del proceso de biodigestión anaerobia. Esto permitiría aprovechar el potencial energético y fertilizante de este tipo de residuo orgánico que no es explotado actualmente. La metodología experimental propuesta posee ventajas respecto a otros métodos de dimensionamiento y operación de digestores pues permite determinar desde la fase de diseño las inhibiciones y predecir la producción específica de metano durante la operación del reactor.

Fecha de elaboración del resumen: 15 de Agosto de 2019

Analytical-Informative Summary

Diseño e implementación de reactor anaerobio semicontinuo para aprovechamiento de cáscaras de cacao

Manuel Edmundo Merino Chumacero

Advisor: Mgtr. Eng. Irene Alvarado Tabacchi

Thesis

Mechanical Electrical Engineer

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, August 2019

Keywords: anaerobic digestion / biodigesters / renewable energy / waste management / cocoa pod husk

Introduction: In the productive process of organic cocoa, a large amount of organic waste is generated, mainly the cocoa pod husk. Currently, the cocoa pod husk is left outdoors in the crop fields for its degradation in the open air to accomplish the reincorporation of cocoa pod husk nutrients into the soil. However, this practice leads to the proliferation of insects, pathogenic microorganisms, bad smells and diseases in plants and animals. An alternative to this practice is the application of anaerobic digestion technology, which is a biochemical process that allows organic matter to degrade to obtain biogas and biofertilizer. In this work, an experimental study of the anaerobic digestion of cocoa pod husk was carried out to determine its biomethane production potential and a methodology was established for the design, start-up and operation of organic waste biodigesters.

Methodology: The methodology applied was theoretical and experimental, following the guidelines of the German VDI 4630 to ensure reproducible and valid results. BMP digestion tests and semi-continuous biodigestion tests were carried out to determine the biodegradability and methane potential of cocoa shells. The results of the tests are the basis for the determination of the size and operational conditions of the designed anaerobic reactor.

Results: The biomethane production potential of cocoa pod husks was determined for certain operational conditions and different organic load rates. In addition, methods and procedures were established for the experimental study of organic waste biodigestion, following the recommendations established by technical standard VDI 4630. Finally, a methodology was also established for the design, start-up and operation of organic waste biodigesters.

Conclusions: Cocoa pod husk is an attractive feedstock for anaerobic digestion process and its possible to benefit from his fertilizing and energy potential that are currently wasted. The proposed experimental methodology has advantages over other methods of design and operation of digesters because it allows us to determine inhibitions and predict the specific production of methane for a given substrate and operational conditions.

Summary date: August 15th, 2019

Prefacio

En el proceso productivo del cacao orgánico se generan varios productos de descarte, entre los que destacan la cáscara de cacao y algunos frutos desechados (bellotas de cacao). Actualmente estos desechos orgánicos son sometidos al proceso de “reincorporación” por el cual se dejan en el suelo de las plantaciones para su descomposición al aire libre.

Esta práctica trae como consecuencia la proliferación de insectos y malos olores, así como la generación de focos donde los microorganismos y patógenos pueden reproducirse y dispersarse hacia las plantas, animales y seres humanos, propagando enfermedades.

La elaboración del presente proyecto de tesis surgió por el interés de realizar un estudio experimental de la digestión anaerobia de la cáscara de cacao, para el aprovechamiento de su potencial energético y fertilizante en beneficio de los pequeños productores de cacao orgánico de la región Piura y establecer una metodología experimental para el diseño y operatividad de reactores anaerobios para el tratamiento de residuos orgánicos.

Cabe mencionar que el presente trabajo de investigación fue ejecutado con el apoyo del Programa Nacional de Innovación para la competitividad y productividad Innóvate Perú del Ministerio de la Producción, bajo el contrato N° 145-PNICP-PIAP-2015, en el marco del proyecto “Estudio y desarrollo teórico experimental para obtención planta piloto de biodigestor con parámetros controlados mediante aplicación de sistemas embebidos para aprovechar el potencial energético y fertilizador de la cáscara de cacao”.

Un agradecimiento especial al Dr. Ing. William Ipanaqué, Mgtr. Ing. Irene Alvarado y al equipo del laboratorio de Sistemas Automáticos de Control de la Universidad de Piura por el apoyo y asesoría brindada durante la ejecución del presente trabajo. Asimismo, un agradecimiento a la Ing. Gisse Alvarado, de la *Brandenburg University of Technology (BTU)* por el asesoramiento en las etapas iniciales de los experimentos e interpretación de resultados.



Tabla de contenido

Capítulo 1 Introducción a la digestión anaerobia.....	3
1. Biomasa	3
1.1. Definición de biomasa.....	3
1.2. Fuentes de biomasa.....	4
1.3. Conversión de la biomasa en energía	5
1.3.1. Procesos termoquímicos.....	5
1.3.2. Procesos bioquímicos.....	6
2. Biodigestión anaerobia	7
2.1. Etapas de la biodigestión anaerobia.....	7
2.1.1. Hidrólisis.....	9
2.1.2. Acidogénesis o fermentación.....	9
2.1.3. Acetogénesis.....	9
2.1.4. Metanogénesis.....	10
2.2. Productos de la digestión anaerobia.....	10
2.2.1. Biogás.....	10
2.2.2. Digestato.....	11
2.3. Microbiología de biodigestión.....	11
2.4. Inhibición e indicadores tempranos.....	13
2.4.1. Alcalinidad y pH.....	13
2.4.2. Potencial redox.....	15
2.4.3. Amoníaco.....	15
2.4.4. Sulfuro de hidrógeno.....	16
3. Digestores anaerobios.....	16
3.1. Parámetros de operación.....	17
3.1.1. Temperatura de digestión.....	17

3.1.2. Carga orgánica diaria.....	18
3.1.3. Tiempo de retención hidráulica.....	19
3.1.4. Agitación.....	20
3.2. Tipos de digestores.....	20
3.2.1. Biodigestores de laguna cubierta.....	20
3.2.2. Digestores de tanque mezclado completo.....	21
3.2.3. Digestor plug flow.....	22
3.2.4. Reactor de película fija.....	22
Capítulo 2 Proceso productivo de cacao orgánico en el Perú.....	25
1. Cacao orgánico en el Perú.....	25
1.1. Variedades de cacao orgánico.....	28
1.2. Producción de cacao orgánico.....	29
2. Proceso productivo del cacao orgánico.....	32
2.1. Etapas del proceso productivo del cacao orgánico.....	32
2.1.1. Cosecha, selección y separación de cáscara.....	33
2.1.2. Fermentación.....	33
2.1.3. Secado.....	36
2.2. Residuos del proceso productivo del cacao orgánico.....	36
3. Problemática de la cáscara de cacao.....	38
Capítulo 3 Generación de biogás a partir de la cáscara de cacao.....	41
1. Planteamiento.....	41
2. Metodología y procedimientos.....	42
2.1. Caracterización de la biomasa.....	42
2.1.1. Consistencia.....	42
2.1.2. Composición.....	42
2.1.3. Impurezas y contaminantes.....	43
2.1.4. Fermentabilidad.....	43

2.1.5. Producción y calidad de biogás.	43
2.1.6. Clasificación legal.	43
2.2. Ensayo de potencial bioquímico de metano.	44
2.2.1. Tanque de ensayos BMP.	45
2.2.2. Lodos anaerobios.	50
2.2.3. Cáscaras de cacao.	51
2.2.4. Preparación de reactores.	53
2.2.5. Análisis y ensayos.	53
2.3. Ensayo semicontinuo de digestión anaerobia.	54
2.3.1. Reactor semicontinuo.	54
2.3.2. Calibración de sensores.	66
2.3.3. Inóculo e inoculación.	68
2.3.4. Biomasa.	69
2.3.5. Carga orgánica diaria.	70
2.3.6. Muestreo y análisis.	72
2.3.7. Biofertilizante.	74
3. Resultados obtenidos.	74
3.1. Degradabilidad de la cáscara de cacao.	74
3.2. Producción de metano y carga orgánica.	76
3.3. Composición del biogás y biofertilizante.	79
3.4. Estabilidad del biodigestor.	82
Capítulo 4 Diseño y operatividad de biodigestor de cáscaras de cacao.	85
1. Diseño del biodigestor.	85
1.1. Metodología del diseño.	85
1.2. Ecuaciones de diseño.	87
1.2.1. Ecuaciones de sólidos totales y sólidos volátiles.	87
1.2.2. Ecuaciones de volumen de biodigestor.	88

1.2.3. Ecuaciones de producción de biogás.....	89
2. Operatividad del biodigestor	91
2.1. Inoculación	91
2.1.1. Obtención y preparación del inóculo.....	91
2.1.2. Preparación de carga inicial.	92
2.2. Alimentación.	93
2.3. Análisis de parámetros.	93
2.4. Inhibición.....	95
3. Caso de estudio: Biodigestor para una familia productora de cacao.....	96
3.1. Suposiciones.....	96
3.2. Demanda de biogás.	97
3.3. Producción de metano.	97
3.4. Comentarios.....	98
Conclusiones.....	99
Referencias.....	101
Apéndices.....	107
Apéndice A. Métodos y procedimientos para determinación de sólidos totales y volátiles en materia orgánica.....	108
Apéndice B. Métodos y procedimientos para la determinación del potencial de biometano a partir de la biodigestión anaerobia de sustratos orgánicos.....	110
Apéndice C. Formato de registro de datos para - Ensayo BMP	119
Apéndice D. Formato de registro de datos – Ensayo semicontinuo	120
Apéndice E. Presión parcial de vapor de agua en función de la temperatura.....	121

Lista de figuras

Figura 1. Captura de energía solar por parte de las plantas mediante el proceso de fotosíntesis.	4
Figura 2. Fuentes de biomasa.	4
Figura 3. Entradas y salidas del proceso de digestión anaerobia.	7
Figura 4. Esquema simplificado secuencial del proceso de biodigestión anaerobia.	8
Figura 5. Sustratos y productos en las distintas etapas del proceso de biodigestión de materia orgánica compleja.	8
Figura 6. Relación entre la actividad bacteriana y el nivel de pH.	14
Figura 7. Digestor anaeróbico psicrófilo instalado en Lochmead Farms, Junction City, Oregón.	16
Figura 8. Tasa de crecimiento de los microorganismos metanogénicos psicrófilos, mesófilos y termófilos.	17
Figura 9. Composición de la biomasa por sólidos y humedad.	19
Figura 10. Biodigestor tipo laguna cubierta.	21
Figura 11. Biodigestor tipo CSTR o de tanque de mezclado completo.	21
Figura 12. Biodigestor del tipo <i>plug flow</i> o pistón.	22
Figura 13. Reactor de película fija.	22
Figura 14. Principales zonas de cultivo de cacao.	26
Figura 15. Fruto o baya de cacao.	26
Figura 16. Partes del fruto del cacao.	27
Figura 17. Distribución de variedades genéticas (<i>clústeres</i>) de cacao en América Latina.	29
Figura 18. Perú, superficie cosechada y producción de cacao en grano, 2000-2015.	30
Figura 19. Perú, producción de cacao por región (2016).	31
Figura 20. Producción mensual de cacao en Perú durante el periodo enero 2014 a agosto 2018.	32
Figura 21. Etapas del proceso productivo del cacao y desechos generados en cada etapa.	32
Figura 22. Fermentación de las semillas de cacao.	34
Figura 23. Mezclado o remoción de las semillas de cacao en un fermentador de caja de madera.	35
Figura 24. Secado de granos de cacao.	36
Figura 25. Residuos orgánicos del proceso productivo del cacao: cáscara de cacao en mitades y mucílago exudado durante la fermentación.	37

Figura 26. Granos de cacao descartados por no cumplir criterio de calidad.....	37
Figura 27. Descarte de las cáscaras en las tierras de cultivo.....	38
Figura 28. Descarte de cáscaras de cacao en tierras de cultivo.....	39
Figura 29. Planteamiento de desarrollo de investigación.....	41
Figura 30. Tanque para la elaboración de ensayos BMP.....	45
Figura 31. Estructura del tanque de ensayos BMP.....	46
Figura 32. Estructura del tanque BMP con paredes de vidrio colocadas.....	46
Figura 33. Matraces Erlenmeyer de 250 mL y botellas Schott de 1 L usadas en el ensayo BMP.....	47
Figura 34. Esquema de línea de medición de biogás para ensayo BMP.....	47
Figura 35. Esquema de línea de medición de metano para ensayo BMP.....	48
Figura 36. PLC Koyo utilizado en el tanque BMP.....	49
Figura 37. Modificación de tapas herméticas para botellas Schott.....	50
Figura 38. Obtención de lodos anaerobios del biodigestor del Instituto Superior Tecnológico CEFOP, Cajamarca.....	50
Figura 39. Reactor de almacenamiento de lodos anaerobios.....	51
Figura 40. Muestras de cacao utilizadas en el presente trabajo.....	52
Figura 41. Cáscaras de cacao picadas y dentro de bolsa hermética para su almacenamiento.....	52
Figura 42. Esquema de sistema de calentamiento de reactor anaerobio semicontinuo.....	55
Figura 43. Sensor RTD - Pt100 utilizado.....	55
Figura 44. Salida normalizada de un regulador por ángulo de disparo - monofásico.....	56
Figura 45. Circuito de detección de paso por cero (<i>zero crossing detector</i>) para el regulador de voltaje por ángulo de disparo.....	57
Figura 46. Etapa de potencia del regulador de voltaje por ángulo de disparo.....	57
Figura 47. Regulador de voltaje por ángulo de disparo para <i>heater</i>	58
Figura 48. Esquema de estrategia de control de temperatura usando controlador PI.....	58
Figura 49. Esquema de estrategia de control de temperatura usando controlador PI en cascada.....	59
Figura 50. Respuesta del sistema <i>heater - tanque de agua</i> a entrada escalón.....	60
Figura 51. Respuesta del sistema de calentamiento a entrada escalón.....	60
Figura 52. Prueba experimental de validación de sintonización PI Cascada.....	61
Figura 53. Modelado en SolidWorks de soporte y acople para agitador.....	62

Figura 54. Motor de 30 W utilizado.	62
Figura 55. Manómetro analógico utilizado para la medición de presión al interior del reactor.	63
Figura 56. Manómetro digital para monitoreo remoto de presión del reactor.....	63
Figura 57. Electrodo HI 1006-32 para medición de pH en línea.....	64
Figura 58. Esquema del circuito de recirculación y medición de pH en línea.	64
Figura 59. Sensores IR15TT-R y EC4-1000-H2S para medición de contenido de metano y dióxido de carbono; y H2S respectivamente.	65
Figura 60. Interfaz del sistema SCADA del biodigestor.....	66
Figura 61. Esquema completo del biodigestor anaerobio.	66
Figura 62. Equipo OAKTON ION 700 utilizado para medición de pH fuera de línea.....	67
Figura 63. Soluciones <i>buffer</i> para calibración de electrodos de pH.	68
Figura 64. Cacao recolectado en Morropón, Piura.....	69
Figura 65. Cáscara de cacao picada y dentro de bolsa hermética.	70
Figura 66. Pesado y licuado de la mezcla para alimentación de biodigestor semicontinuo.	70
Figura 67. Gráfica de carga orgánica diaria para un experimento continuo o semicontinuo.	71
Figura 68. Medición (fuera de línea) de pH, ORP y temperatura usando electrodo ION 700.	73
Figura 69. Agitación para homogenización de la muestra utilizando un agitador magnético de laboratorio.....	73
Figura 70. Muestras para análisis de sólidos totales y sólidos volátiles.....	74
Figura 71. Producción acumulada de biogás y metano. Ensayo BMP Cáscaras de cacao.	75
Figura 72. Carga orgánica diaria del biodigestor durante el ensayo semicontinuo.....	76
Figura 73. Producción diaria de biogás durante el ensayo semicontinuo.....	77
Figura 74. Producción diaria en fase final del ensayo semicontinuo.	77
Figura 75. Relación entre la carga orgánica diaria y la producción de biogás y metano. ..	78
Figura 76. Contenido de metano en volumen obtenido durante el ensayo semicontinuo. .	80
Figura 77. Porcentaje de sólidos totales y sólidos volátiles durante el experimento semicontinuo.....	83
Figura 78. Evolución de nivel de pH durante el ensayo semicontinuo.	84
Figura 79. Evolución de la temperatura al interior del reactor durante el día.	84

Figura 80. Esquema de metodología de diseño experimental de un biodigestor anaerobio de residuos orgánicos.86

Figura 81. Esquema de la división de volúmenes de un reactor anaerobio.88

Figura 82. Curva de producción acumulada de biogás obtenida de un ensayo BMP.90

Figura 83. Relación entre carga orgánica diaria y producción específica de metano.91



Lista de tablas

Tabla 1. Fuentes y características de distintos tipos de biomasa.....	5
Tabla 2. Sustratos y productos de la hidrólisis.	9
Tabla 3. Equivalencias entre biogás y otros combustibles.	11
Tabla 4. Nivel de pH óptimo de algunos microorganismos metanogénicos.	14
Tabla 5. Relación entre ORP y actividad celular efectuada.	15
Tabla 6. Perú, producción de cacao en grano y consumo de cacao. Cifras reales del 2014 al 2017 y predicciones del 2018 al 2022 por <i>Fitch Solutions</i>	30
Tabla 7. Aprovechamiento de la cáscara de cacao: Métodos y procesos en la literatura. ..	39
Tabla 8. Preparación de 1 L de solución barrera.	48
Tabla 9. Preparación de 1 L de solución depuradora.....	48
Tabla 10. Resultados de análisis de sólidos totales y sólidos volátiles realizados a la cáscara de cacao y al inóculo.....	53
Tabla 11. Cantidades para la preparación de reactores BMP. Fuente: Elaboración propia.	53
Tabla 12. Características principales del reactor utilizado.	54
Tabla 13. Datos del motor del agitador mecánico.	62
Tabla 14. Mezcla de gases de calibración utilizados.....	67
Tabla 15. Proporciones de mezcla preparada para inoculación.....	68
Tabla 16. Equivalencias en gramos de cáscara de cacao para distintos valores de carga orgánica diaria.	72
Tabla 17. Cronograma de muestreo y análisis de digestato de reactor semicontinuo	72
Tabla 18. Caracterización de la cáscara de cacao como material fermentable según VDI 4630.	75
Tabla 19. Producción de biogás y metano obtenida en distintas fases de alimentación.....	78
Tabla 20. Comparación entre resultados obtenidos de producción específica de biogás y contenido de metano respecto a otros resultados teóricos y experimentales disponibles en la literatura.....	79
Tabla 21. Comparación de la composición química entre biol obtenido a partir de la cáscara de cacao (Biol 1) y otros cuatro bioles obtenidos de distintas fuentes de biomasa.	81
Tabla 22. Medición de parámetros de un reactor anaerobio.....	94
Tabla 23. Posibles causas de inhibición y acciones correctivas sugeridas.	95
Tabla 24. Demanda anual de metano de una familia productora de cacao.....	97



Introducción

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo el estudio experimental de la biodigestión anaerobia de las cáscaras de cacao y se divide en cuatro capítulos:

En el primer capítulo, se estudian las bases y conceptos básicos relacionado a la biomasa, procesos de aprovechamiento energético de la biomasa y la biodigestión anaerobia, revisando los tipos de biodigestores anaerobios, parámetros de operación y factores influyentes en la estabilidad e inhibición del proceso.

En el segundo capítulo se realiza un recuento de la cadena productiva del cacao orgánico en el Perú y se recopilan algunas cifras obtenidas de la producción de cacao orgánico. Se menciona también la problemática de los residuos orgánicos generados en esta cadena productiva y se hace una revisión de las alternativas de aprovechamiento planteadas en la literatura.

En el tercer capítulo se establece una metodología experimental para el estudio de la digestión anaerobia de residuos orgánicos mediante los ensayos BMP y de digestión semicontinua y se muestran los resultados obtenidos de aplicar dicha metodología para el estudio de la degradabilidad de la cáscara de cacao por medio del proceso de biodigestión.

Finalmente, el cuarto capítulo establece una metodología basada en los resultados experimentales obtenidos en los ensayos BMP y semicontinuo para el dimensionamiento y operación de un digestor anaerobio de residuos orgánicos, para finalmente realizar un breve caso de estudio en el que se analiza el potencial de un sistema de biodigestión de cáscaras de cacao para cubrir las necesidades básicas de una familia productora de cacao orgánico.



Capítulo 1

Introducción a la digestión anaerobia

La creciente demanda energética, así como las nuevas políticas de cuidado ambiental han convertido la búsqueda de nuevas fuentes de energía renovables en un campo importante e interesante de investigación, desarrollo e innovación. Entre las diversas fuentes de energía renovable se tiene a la biomasa, cuyo principal atractivo es su relativa abundancia y disponibilidad.

Existen diversas tecnologías para la obtención de la energía a partir de la biomasa, desde la más sencilla, que es la combustión directa para la generación de calor, hasta transformaciones bioquímicas, como la fermentación y digestión anaerobia. Esta última ha sido empleada ampliamente durante los últimos 200 años, tanto a escala doméstica como industrial, con diversos fines, entre los que destacan el tratamiento de aguas residuales, la estabilización de residuos orgánicos y la producción de biogás y biometano.

Este primer capítulo tiene como objetivo realizar una breve introducción al proceso de digestión anaerobia. En primer lugar, se define qué es la biomasa, fuentes de biomasa y los principales procesos existentes para el aprovechamiento energético de la biomasa. Luego se estudia el proceso de digestión anaerobia, las etapas que lo conforman y el aspecto microbiológico del proceso, así como las condiciones para la inhibición. Finalmente, se hace un repaso de los reactores anaerobios o biodigestores, principales tipos de reactores y parámetros de operación.

1. Biomasa

1.1. Definición de biomasa. El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica de origen natural que puede ser materia vegetal o animal. Como ejemplos de biomasa tenemos la madera, cultivos energéticos, algas, residuos de procesos agrícolas y desechos orgánicos de origen animal, vegetal y humano (Saidur, Abdelaziz, Demirbas, Hossain, & Mekhilef, 2011). La biomasa es una fuente renovable de energía, como la energía solar y eólica, y posee un amplio rango de aplicaciones como la generación de calor (combustión), generación de energía eléctrica (centrales de ciclo combinado) y producción de biocombustibles.

1.2. Fuentes de biomasa La energía del sol es capturada por las plantas y transformada en energía química en el proceso de la fotosíntesis, quedando fijada en la forma de vegetación terrestre y acuática (**Figura 1**). Esta vegetación al ser consumida por los animales se convierte en biomasa animal y residuos biológicos, como el estiércol (Saidur et al., 2011). De esta forma, la biomasa puede provenir de cultivos, residuos agrícolas y forestales, residuos animales, residuos industriales y residuos urbanos, como las aguas residuales y residuos sólidos urbanos (**Figura 2 y Tabla 1**).

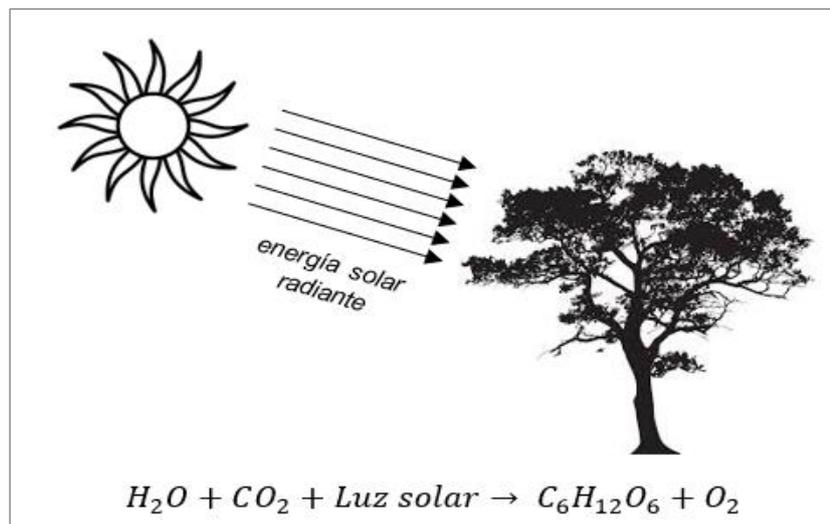


Figura 1. Captura de energía solar por parte de las plantas mediante el proceso de fotosíntesis.

Fuente: Adaptado de “*Biomass at a glance*” (National Energy Education Development, n.d.).

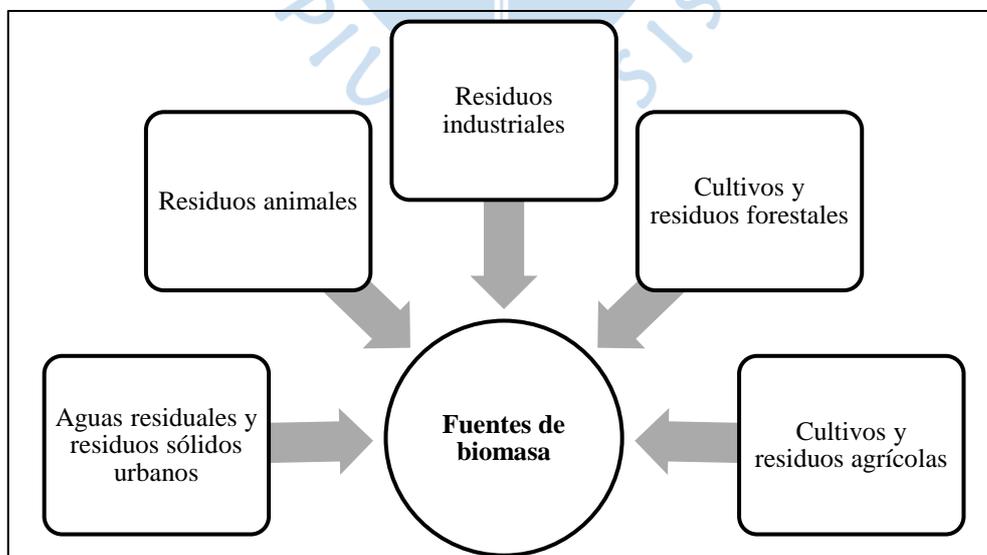


Figura 2. Fuentes de biomasa.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Fuentes y características de distintos tipos de biomasa.

Fuente	Tipo de residuo	Características físicas
Residuos forestales	<ul style="list-style-type: none"> • Restos de aserrío: corteza, aserrín, astillas. • Restos de ebanistería: aserrín, trozos, astillas. • Restos de plantaciones: ramas, corteza, raíces 	<ul style="list-style-type: none"> • Polvo, sólido, HR >50% • Polvo sólido, HR 30-45% • Sólido, HR > 55%
Residuos agropecuarios	<ul style="list-style-type: none"> • Cáscara y pulpa de frutas y vegetales. • Cáscara y polvo de granos secos (arroz, café) • Estiércol • Residuos de cosechas: tallos y hojas, cáscaras 	<ul style="list-style-type: none"> • Sólido, alto contenido humedad. • Polvo, HR < 25% • Sólido, alto contenido humedad. • Sólido, HR > 55%
Residuos industriales	<ul style="list-style-type: none"> • Pulpa y cáscara de fruta y vegetales • Residuos de procesamiento de carnes. • Aguas de lavado y precocido de carnes y vegetales • Grasas y aceites vegetales 	<ul style="list-style-type: none"> • Sólido, humedad moderada • Sólido, alto contenido de humedad • Líquido • Gaseoso
Residuos urbanos	<ul style="list-style-type: none"> • Aguas residuales. • Desechos domésticos orgánicos (cáscara de vegetales) • Basura orgánica (madera) 	<ul style="list-style-type: none"> • Líquido • Sólido, alto contenido de humedad • Sólido, alto contenido de humedad

Fuente: Adaptado de “*Manuales sobre energía renovable: Biomasa*” (Biomass Users Network (BUN-CA), 2002).

1.3. Conversión de la biomasa en energía Existen diversos procesos para convertir la biomasa en formas aprovechables de energía, los cuales pueden ser clasificados en dos principales tipos de procesos: los procesos termoquímicos y los procesos bioquímicos (McKendry, 2002).

1.3.1. Procesos termoquímicos. Dentro de los procesos termoquímicos de conversión de biomasa existen cuatro principales procesos: combustión, pirólisis, gasificación y licuefacción.

- **Combustión:** Es el quemado de la biomasa en presencia de aire, proceso que libera en forma de calor la energía almacenada en la biomasa. La combustión de la biomasa produce gases calientes a temperaturas entre 800 y 1000 °C. Teóricamente, es posible la combustión de cualquier biomasa, pero en la práctica solo es viable cuando la biomasa posee un contenido de humedad menor al 50% a menos que se realice un secado previo.

- **Pirólisis:** El proceso de pirólisis es la conversión de biomasa en fracciones gaseosas, sólidas y líquidas por medio del calentamiento en ausencia de aire, generalmente a temperaturas alrededor de 500 °C. Dependiendo del proceso de pirólisis empleado, se puede obtener carbón vegetal, bio-aceite y gas combustible.
- **Gasificación:** La gasificación es la conversión de biomasa en combustible gaseoso por medio de la oxidación parcial de la biomasa a elevadas temperaturas, por lo general en el rango de los 800 a 900 °C. El gas producido por el proceso de gasificación puede ser utilizado quemado directamente o utilizado como combustible para turbinas de gas y motores. También se puede obtener syngas a partir de la biomasa para la producción de metanol e hidrógeno, ambos con potencial para ser utilizados como combustibles.
- **Licuefacción:** La licuefacción es la conversión de biomasa en un hidrocarburo líquido usando bajas temperaturas y altas presiones de hidrógeno.

1.3.2. **Procesos bioquímicos.** Principalmente, son dos los procesos bioquímicos que transforman la biomasa en energía: la fermentación y la digestión anaerobia.

- **Fermentación:** La fermentación es la obtención de etanol a partir de cultivos de azúcar, por ejemplo, la caña de azúcar y la remolacha azucarera. El proceso comprende el molido de la biomasa, la degradación del almidón a azúcares por acción enzimática y la conversión de dichos azúcares en etanol por medio de levaduras. Posteriormente la mezcla obtenida es destilada para lograr separar el etanol de los otros compuestos (principalmente agua). Adicionalmente, los residuos sólidos del proceso de fermentación pueden ser utilizados como alimento para animales o para su combustión directa (McKendry, 2002).
- **Digestión anaerobia:** La digestión anaerobia es la conversión de la biomasa en biogás por acción de distintos grupos bacterianos. El biogás está compuesto principalmente de dióxido de carbono y metano y puede ser utilizado como combustible directo o para la obtención de electricidad por medio de generadores.

Además de los procesos termoquímicos y bioquímicos, existen otros procesos de conversión de biomasa como los procesos de extracción mecánica, donde se obtienen aceites vegetales, y la esterificación (McKendry, 2002).

2. Biodigestión anaerobia

La biodigestión anaerobia (AD - *anaerobic digestion*) es un complejo proceso bioquímico, en el cual un consorcio de microorganismos degrada la materia orgánica con el objetivo de obtener energía para la realización de sus actividades metabólicas y su reproducción, obteniéndose como productos finales, biogás y digestato (biofertilizante). Desde un punto de vista microbiológico, la biodigestión es un tipo de respiración celular que se desarrolla en ausencia de oxígeno (Gerardi, 2003).

Generalmente, la biodigestión anaerobia se lleva a cabo dentro de un recipiente o contenedor cerrado, conocido como reactor anaerobio, digestor anaerobio o biodigestor, el cual puede estar compuesto de uno o más reactores para distintas etapas del proceso (Ward, Hobbs, Holliman, & Jones, 2008). El proceso puede realizarse con o sin mezclado y ya sea de manera continua, semicontinua o por lotes (*batch*) (Begum, 2014).

En la **Figura 3**, se puede apreciar un esquema general de las entradas y salidas del proceso de biodigestión anaerobia.

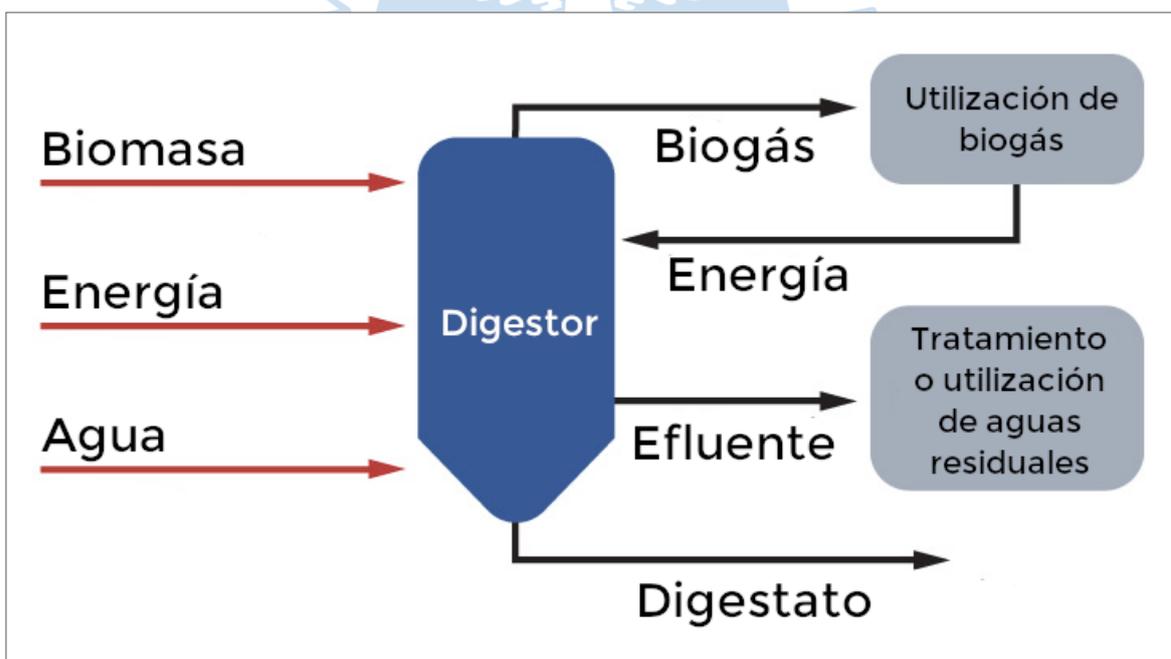


Figura 3. Entradas y salidas del proceso de digestión anaerobia.

Fuente: Adaptado de “*Integrating Anaerobic Digestion with Composting*” (Kraemer & Gamble, 2014).

2.1. Etapas de la biodigestión anaerobia. Para ilustrar la secuencia de procesos microbiológicos que ocurren durante el proceso de AD, este puede dividirse en cuatro etapas:

hidrólisis, acidogénesis (o fermentación), acetogénesis y metanogénesis (Del Real Olvera & Lopez-lopez, 2009).

Se entiende que la biodigestión anaerobia es un proceso secuencial (**Figura 4**) debido a que los productos de una etapa sirven como sustratos a la siguiente etapa (**Figura 5**), por lo que la inhibición de una etapa afecta a las siguientes. No obstante, dentro de un reactor estos procesos ocurren de manera simultánea, por lo que el carácter secuencial no debe interpretarse de manera estricta.

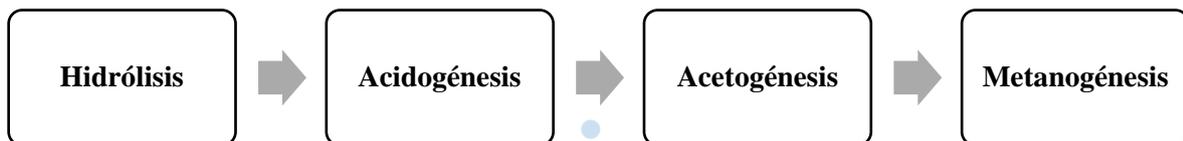


Figura 4. Esquema simplificado secuencial del proceso de biodigestión anaerobia.

Fuente: Elaboración propia.

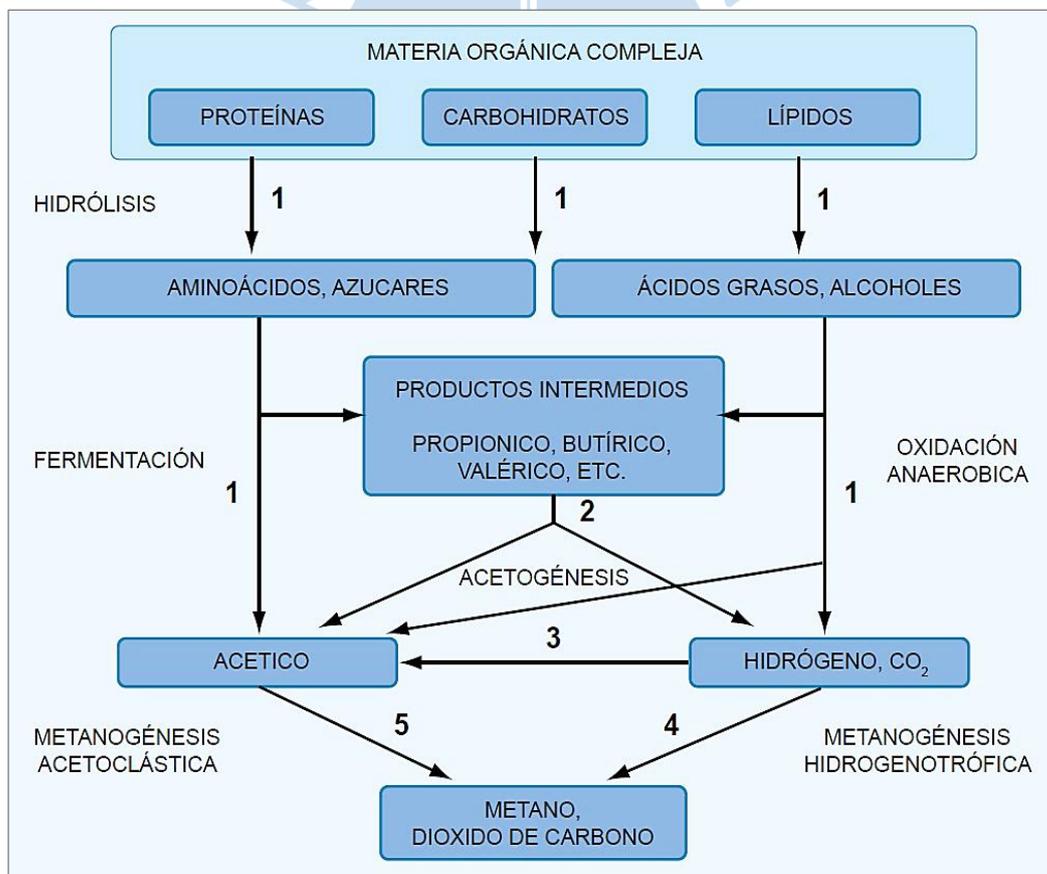


Figura 5. Sustratos y productos en las distintas etapas del proceso de biodigestión de materia orgánica compleja.

Fuente: Tomado de "Manual del biogás" (Varnero, 2011).

2.1.1. **Hidrólisis.** La primera etapa del proceso de biodigestión es la hidrólisis, en la cual los compuestos particulados (carbohidratos, proteínas y lípidos) son degradados a compuestos químicos solubles por acción enzimática de distintas familias de bacterias. Esta etapa se da al exterior de la célula, por medio de exoenzimas producidas por microorganismos anaerobios. Las exoenzimas rompen las uniones de los compuestos orgánicos complejos, degradándolos y permitiendo que pasen a través de la pared celular (Del Real Olvera & Lopez-lopez, 2009; Gerardi, 2003; Varnero, 2011).

En la **Tabla 2**, se han colocado algunos ejemplos de las exoenzimas utilizadas para la degradación de distintos sustratos, las bacterias que las producen y los productos obtenidos.

Tabla 2. Sustratos y productos de la hidrólisis.

Sustratos	Exoenzimas	Ejemplo	Bacterias	Productos
Polisacáridos	Sacarolíticas	Celulasa	<i>Cellulomonas</i>	Monosacáridos
Proteínas	Proteolíticas	Proteasa	<i>Bacillus</i>	Aminoácidos
Lípidos	Lipolíticas	Lipasa	<i>Mycobacterium</i>	Ácidos grasos

Fuente: Adaptado de “*The microbiology of anaerobic digesters*” (Gerardi, 2003).

La facilidad con la que los compuestos orgánicos son hidrolizados influye significativamente en el tiempo requerido para completar el proceso de biodigestión anaerobia y por consiguiente en la cantidad de biomasa que el biodigestor puede procesar por unidad de tiempo.

2.1.2. **Acidogénesis o fermentación.** En la acidogénesis, los productos de la hidrólisis son fermentados en ácidos grasos de cadena larga (LCFA) y ácidos grasos volátiles (VFA). Como productos adicionales se obtienen también dióxido de carbono e hidrógeno. Los monosacáridos y aminoácidos producen, por lo general, ácidos volátiles, mientras que los ácidos grasos de cadena larga son producidos generalmente a partir de los lípidos (Gerardi, 2003).

2.1.3. **Acetogénesis.** La acidogénesis produce ácidos grasos intermedios, los cuales requieren ser degradados en ácido acético antes de que puedan ser asimilados por los microorganismos metanogénicos. La acetogénesis es la etapa en la cual las bacterias

acetogénicas actúan sobre esos ácidos grasos intermedios produciendo ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno.

Esta etapa es llevada a cabo principalmente por dos tipos de bacterias acetogénicas: las productoras obligadas de hidrógeno (*obligate hydrogen-producing acetogens, OHPA*) y las homoacetogénicas. Las primeras producen ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno a partir de los ácidos grasos, mientras que las segundas producen ácido acético a partir del dióxido de carbono e hidrógeno (Del Real Olvera & Lopez-lopez, 2009; Gerardi, 2003).

2.1.4. Metanogénesis. La metanogénesis es la etapa final de la digestión anaerobia. En esta etapa, distintos microorganismos metanogénicos (arqueas) producen metano a partir de los sustratos producidos en las etapas anteriores (acidogénesis y acetogénesis).

Existen dos fuentes de metano: a partir del ácido acético, por acción de los microorganismos metanogénicos acetoclásticos y por reducción del dióxido de carbono con hidrógeno, por acción de los microorganismos metanogénicos hidrogenotróficos. Se ha demostrado que el 70% del metano producido en la metanogénesis proviene de la descarboxilación del ácido acético (Varnero, 2011).

El producto final de la metanogénesis es el metano que junto al dióxido de carbono son los compuestos principales del biogás (Begum, 2014).

2.2. Productos de la digestión anaerobia. Del proceso de biodigestión se obtienen principalmente dos productos: biogás y digestato (biol y biosol). El primero posee potencial de generación de energía y el último tiene aplicaciones en el sector agrícola debido a sus propiedades fertilizantes.

2.2.1. Biogás. Es un biocombustible gaseoso compuesto principalmente por metano (50-75%), dióxido de carbono (25-50%) y otros gases (2-8%) como el nitrógeno, oxígeno y trazas de otros gases como el sulfuro de hidrógeno, amoníaco e hidrógeno (Da Costa Gomez, 2013).

El poder calorífico inferior (PCI) del biogás varía de acuerdo con su contenido de metano; asumiendo un contenido de 65% de metano, el biogás posee un poder calorífico de 22.36 kJ/L o 600 BTU. En la **Tabla 3**, se pueden encontrar las equivalencias entre 1000 L de biogás con 65% de metano y otros combustibles (Del Real Olvera & Lopez-lopez, 2009).

Tabla 3. Equivalencias entre biogás y otros combustibles.

Biogás con 65% de metano (1000 L)	
Gas natural	600 L
Propano	25.0 L
Butano	22.3 L
Gasolina	17.79 L
Diesel	16.28 L

Fuente: Adaptado de “*Biogas Production from Anaerobic Treatment of Agro-Industrial Wastewater*” (Del Real Olvera & Lopez-lopez, 2009).

2.2.2. **Digestato.** El digestato, junto al biogás, es un producto de la biodigestión anaerobia, cuyo valor se encuentra en el área de los biofertilizantes y la agricultura. Los parámetros o características químicas y biológicas de distintos digestatos dependen en gran medida de la biomasa inicial de la cual han sido obtenidos.

Respecto a sus propiedades fertilizantes, los digestatos poseen muy buenas características debido a su alto contenido en nutrientes (Nitrógeno, fósforo y potasio), siendo una alternativa atractiva para el reemplazo de los fertilizantes inorgánicos (Adani et al., 2010; Aparcana & Jansen, 2008).

2.3. **Microbiología de biodigestión.** Los microorganismos que participan en el proceso de biodigestión anaerobia son de dos grandes grupos: las bacterias y las arqueas metanogénicas.

Una forma de clasificar a los microorganismos es de acuerdo con su respuesta o reacción al oxígeno libre molecular, identificándose 3 grupos: aerobias estrictas, anaerobias facultativas y anaerobias (Gerardi, 2003).

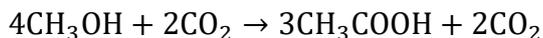
- **Microorganismos aerobios estrictos:** Son aquellos microorganismos que sobreviven y desarrollan su tarea de degradación de sustratos solo en presencia de oxígeno libre molecular y mueren bajo condiciones anaeróbicas, es decir en ausencia de oxígeno libre molecular.
- **Microorganismos anaerobios facultativos:** Este grupo está conformado por aquellas bacterias que se encuentran activas ya sea en presencia o ausencia de oxígeno libre molecular. Estas bacterias, en las condiciones de un digestor anaeróbico, producen una variedad de ácidos y alcoholes, dióxido de carbono e hidrógeno a partir de carbohidratos, lípidos y proteínas.

- **Microorganismos anaerobios:** son aquellos que no realizan ninguna actividad enzimática de degradación de sustratos en presencia de oxígeno libre molecular. Este grupo se puede subdividir en dos subgrupos: aquellos que son tolerantes a la presencia del oxígeno y las que no lo son, también llamados *anaerobios estrictos*. Las arqueas metanógenas forman parte de este subgrupo y mueren en presencia de oxígeno libre molecular.

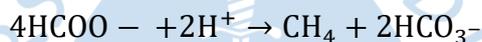
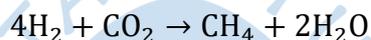
Otra clasificación es la realizada por Del Real Olvera (2009), que agrupa los microorganismos de la digestión anaerobia en cuatro grupos de bacterias considerando las etapas del proceso en las que intervienen:

- **Bacterias Fermentativas:** Este grupo está conformado por las bacterias responsables de la primera etapa del proceso de digestión anaerobia. Las especies anaerobias pertenecientes a este grupo son de la familia *Streptococcaceae* y *Enterobacteriaceae* y los géneros más comunes son: *Bacteroides*, *Clostridium*, *Butyrovivibrio*, *Eubacterium*, *Bifidobacterium* y *Lactobacillus* (Novaes, 1986).
- **Bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno:** Este grupo está conformado por las bacterias que metabolizan los ácidos orgánicos superiores (propionato, butirato, etc.), etanol y ciertos compuestos aromáticos (benzoato) en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono (Zinder, 1990). La oxidación anaeróbica de estos compuestos no es termodinámicamente favorable en una cultura única o pura de bacterias productoras de hidrógeno, sin embargo, en una cultura mixta de bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno y bacterias metanogénicas consumidoras de hidrógeno, estas existen en un equilibrio simbiótico que permiten que ambas lleven a cabo sus funciones metabólicas con normalidad.
- **Bacterias homoacetogénicas:** Este grupo lo conforman las bacterias encargadas de producir acetato, el cual es un importante precursor o sustrato en la generación de metano. Está conformado por bacterias autótrofas y heterótrofas. Las bacterias homoacetogénicas autótrofas utilizan el hidrógeno y el dióxido de carbono para la generación de acetato. Por otro lado, las bacterias homoacetogénicas heterotróficas utilizan compuestos orgánicos como el formiato y el metanol para la producción de acetato.





- **Arqueas metanogénicas:** Este grupo está conformado por los microorganismos encargados de la producción de metano y dióxido de carbono. Existen dos tipos de arqueas metanogénicas que intervienen en la producción de metano: las acetoclásticas y la hidrogenotróficas. Las primeras producen metano y dióxido de carbono a partir del ácido acético y las segundas lo hacen a partir del dióxido de carbono e hidrógeno.



2.4. Inhibición e indicadores tempranos. Se entiende como inhibición a una reducción en la tasa de degradación de sustratos y/o en la tasa de reproducción bacteriana y tiene como consecuencia una reducción en la producción de biogás. La importancia de su estudio radica en la utilidad de saber identificar indicadores tempranos de inhibición y tomar las acciones preventivas y correctivas necesarias para mantener el estado del proceso en sus condiciones estables.

2.4.1. Alcalinidad y pH. La alcalinidad es la capacidad de una solución en resistir cambios a su nivel de pH y es proporcional a la concentración de bicarbonatos (Ward et al., 2008). En el contexto de la biodigestión anaeróbica, el nivel de pH influye en la actividad enzimática (degradación de sustratos) y en la reproducción de las bacterias (**Figura 6**), mientras que la alcalinidad influye en la estabilidad del proceso y es una medida de la capacidad *buffer* del reactor (Gerardi, 2003).

La actividad enzimática de las bacterias acidogénicas y metanogénicas es influenciada por el valor de pH en distinta medida: la acidogénesis se lleva a cabo a niveles de pH mayores a 5.0, mientras que las arqueas metanogénicas no realizan actividad enzimática por debajo de un nivel de pH de 6.2 (Gerardi, 2003; Varnero, 2011).

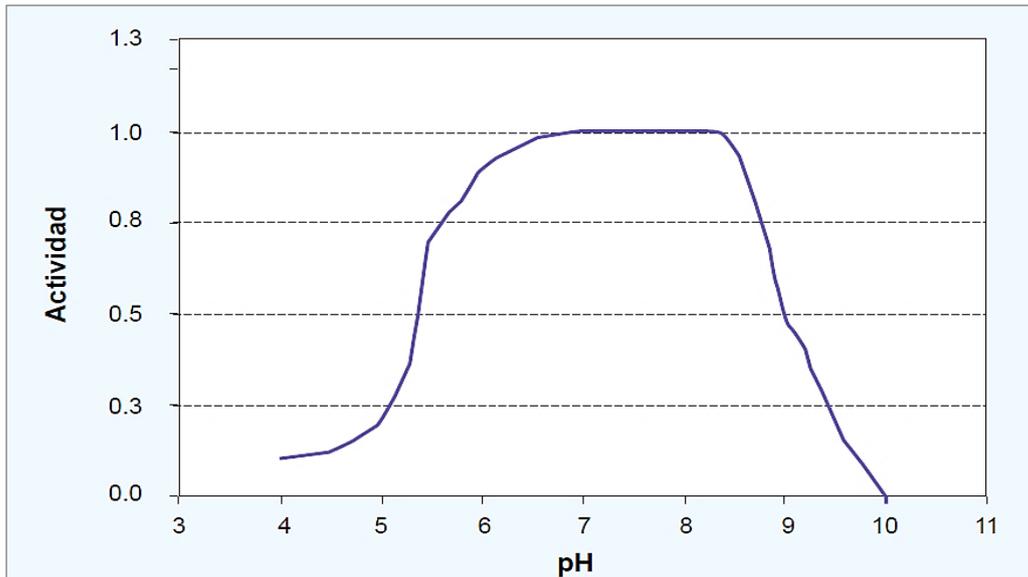


Figura 6. Relación entre la actividad bacteriana y el nivel de pH.

Fuente: Tomado de “Manual de biogás” (Varnero, 2011).

Por lo tanto, el rango de pH óptimo para un biodigestor es muy estrecho: de 6.2 a 7.4 (Cai, Zhang, Zhang, Shi, & Zhang, 2008; Ward et al., 2008). En la **Tabla 4**, se pueden apreciar los valores de pH óptimos para la reproducción de algunos organismos metanogénicos.

Cuando ocurre una inhibición en la etapa metanogénica, los ácidos grasos volátiles empiezan a acumularse y la alcalinidad baja antes de que el pH se vea afectado, por lo que el nivel de pH no es eficaz como indicador temprano de inhibición (Drosg, 2013).

Tabla 4. Nivel de pH óptimo de algunos microorganismos metanogénicos.

Género	Nivel de pH
<i>Methanospaera</i>	6.8
<i>Methanothermus</i>	6.5
<i>Methanogenium</i>	7.0
<i>Methanolacinia</i>	6.6-7.2
<i>Methanomicrobium</i>	6.1-6.9
<i>Methanospirillum</i>	7.0-7.5
<i>Methanococcoides</i>	7.0-7.5
<i>Methanohalobium</i>	6.5-7.5
<i>Methanolobus</i>	6.5-6.8
<i>Methanotherix</i>	7.1-7.8

Fuente: Tomado de “The microbiology of anaerobic digesters” (Gerardi, 2003).

2.4.2. **Potencial redox.** El potencial de oxidación y reducción (*Oxidation reduction potential – ORP*) o potencial *redox*, es un indicador de la capacidad de las moléculas de liberar o ganar electrones (oxidación y reducción, respectivamente) (Suryawanshi PC, Chaudhari AB, Bhardwaj S, & Yeole TY, 2013).

Los microorganismos anaerobios requieren un ORP negativo para efectuar sus actividades metabólicas y en el caso de microorganismos anaerobios estrictos, el ORP debe ser menor a -300 mV. En la **Tabla 5**, se muestran algunos valores de ORP y las distintas actividades celulares que se llevan a cabo a dichos niveles.

Tabla 5. Relación entre ORP y actividad celular efectuada.

ORP (mV)	Condición	Actividad celular
Mayor a +50	Aerobia	Respiración aerobia
Entre +50 a -50	Anaerobia	Respiración anóxica
Menor a -50	Anaerobia	Reducción de sulfatos
Menor a -100	Anaerobia	Fermentación y producción de ácidos y alcoholes
Menor a -300	Anaerobia	Fermentación y producción de metano

Fuente: Adaptado de “*The microbiology of anaerobic digesters*” (Gerardi, 2003).

El ORP es un indicador temprano bastante sensible a la inhibición, comparado al pH o la alcalinidad, pero también es sensible a variaciones en la composición de la alimentación (biomasa), lo cual, sumado al mayor mantenimiento que requieren los electrodos de medición de ORP, hacen que rara vez sean usados en una planta de biodigestión (Drosg, 2013).

2.4.3. **Amoniaco.** El amoniaco es producido por la degradación biológica de materia orgánica con contenido de nitrógeno, principalmente en la forma de proteínas y urea, como los purines y estiércol (Chen, Cheng, & Creamer, 2008).

Existen dos formas principales del nitrógeno amoniacal en solución acuosa: el ion amonio y el amoniaco libre (Drosg, 2013), siendo este último el principal agente inhibidor en el proceso de AD, causando una reducción en la producción de biogás y metano. Esto se debe a que afecta principalmente a los organismos metanogénicos, inhibiendo su tasa de reproducción y crecimiento (Chen et al., 2008). No obstante, mientras se siga un proceso de aclimatación lento de los microorganismos de un biodigestor anaerobia, se pueden obtener

sistemas AD operando a tasas de nitrógeno amoniacal por encima del umbral de inhibición (Yenigün & Demirel, 2013).

2.4.4. **Sulfuro de hidrógeno.** El sulfuro de hidrógeno es producido en la reducción de compuestos de azufre por bacterias reductoras de sulfato. La reducción de sulfatos tiene como consecuencia dos factores de inhibición: la inhibición por la competencia bacteriana por sustratos orgánicos e inorgánicos y la inhibición por la toxicidad de los sulfuros para distintos grupos bacterianos, especialmente los microorganismos metanogénicos (Chen et al., 2008).

3. Digestores anaerobios

Un digestor anaerobio, reactor anaerobio o biodigestor, es el recipiente o contenedor cerrado y hermético en el que se lleva a cabo el proceso de AD. El tipo de digestor utilizado, así como su diseño y parámetros de operación son factores muy influyentes en la producción de biogás y la estabilidad del proceso de AD, por lo que su análisis y estudio son cruciales (Barber & Stuckey, 1999; Ward et al., 2008).

En la **Figura 7**, se aprecia un ejemplo de biodigestor; en específico, un reactor de digestión anaerobia de escala industrial que procesa estiércol de vaca a bajas temperaturas instalado en Oregón, Estados Unidos.



Figura 7. Digestor anaeróbico psicrófilo instalado en Lochmead Farms, Junction City, Oregón.

Fuente: Tomado de “*Anaerobic Digestion in the Northwest*” (Sullivan, 2012).

3.1. Parámetros de operación.

Para la operación de un reactor anaerobio generalmente se consideran distintos parámetros (parámetros operativos) que deben permanecer dentro de rangos específicos para asegurar una operación estable y eficiente del reactor. Entre estos parámetros, los principales son la temperatura de operación, el pH, la carga orgánica y el tiempo de retención hidráulica.

3.1.1. **Temperatura de digestión.** La temperatura es un factor importante dentro de la biodigestión anaerobia, pues define la velocidad de las actividades metabólicas de los microorganismos encargados de degradar los sustratos (bacterias y arqueas). Un incremento en la temperatura acelera el metabolismo del consorcio de bacterias, aumentando su tasa de reproducción y la producción de biogás, permitiendo así una mayor tasa de carga orgánica sin afectar la eficiencia del reactor (Chae, Jang, Yim, & Kim, 2008; El-Mashad, Zeeman, Van Loon, Bot, & Lettinga, 2004; Zamanzadeh, Hagen, Svensson, Linjordet, & Horn, 2016).

Se pueden definir tres rangos de temperatura principales en los cuales se puede dar la biodigestión anaerobia: psicrófilo, mesofílico y termofílico, los cuales son definidos en relación con los microorganismos adaptados a estas temperaturas (**Figura 8**).

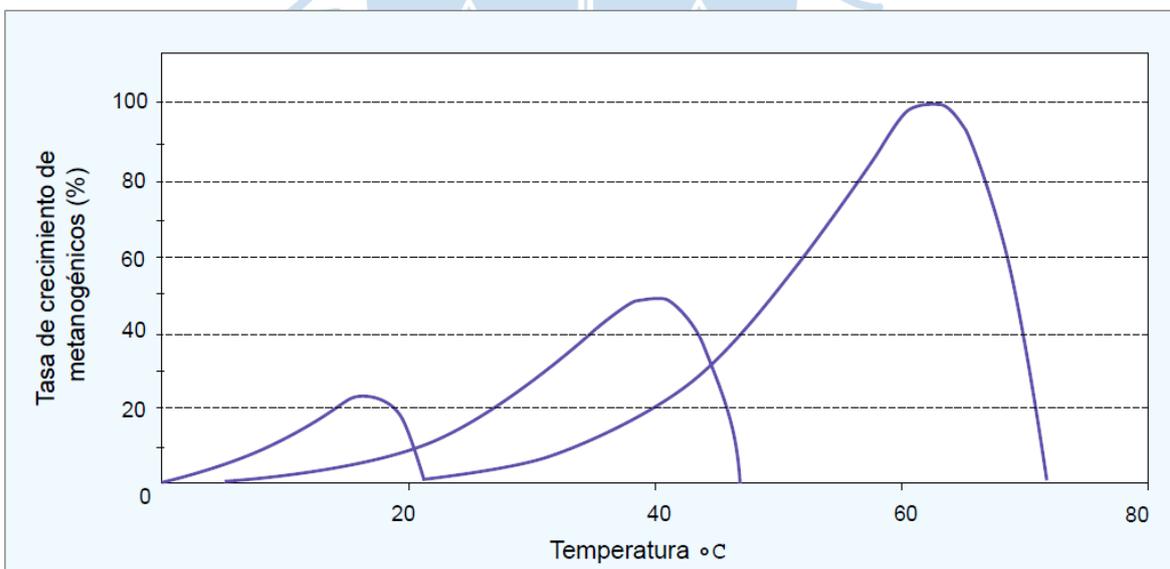


Figura 8. Tasa de crecimiento de los microorganismos metanogénicos psicrófilos, mesofílicos y termofílicos.

Fuente: Tomado de “Manual de Biogás” (Varnero, 2011).

- **Rango psicrófilo:** Este rango de temperatura abarca desde los 5°C hasta los 25°C. La biodigestión realizada en este rango se caracteriza por producciones de biogás

muy bajas, por lo que su aplicación industrial es muy limitada. Se da naturalmente en el fondo de lagos, lechos marinos, *permafrost* y otros lugares con temperaturas muy bajas.

- **Rango mesofílico:** Con temperaturas desde los 30°C hasta los 40°C, el rango mesofílico es el rango más empleado en plantas de tratamiento de aguas residuales y en biodigestores anaeróbicos (Yenigün & Demirel, 2013). En comparación a los otros rangos de temperatura, combina las ventajas de una buena producción de biogás y una menor sensibilidad a inestabilidades operacionales. Los microorganismos mesofílicos son fáciles de obtener a partir de estiércol de ganado y son tolerantes a variaciones de temperatura de hasta 2°C por día (Gerardi, 2003).
- **Rango termofílico:** Abarca desde los 45°C hasta los 60°C, se caracteriza por ser un rango de mayor demanda energética, altas producciones de biogás, alta tasa de destrucción de patógenos y soportar una mayor carga orgánica diaria (Gavala, Yenal, Skiadas, Westermann, & Ahring, 2003; Gerardi, 2003). Los biodigestores que operan en este rango tienen la desventaja de ser más complejos de operar y más sensibles a inhibiciones o inestabilidades operacionales en comparación a los biodigestores que operan en el rango mesofílico. Una variación menor a 1°C es deseable en este tipo de biodigestión (Gerardi, 2003).

Entre las bacterias y las arqueas metanogénicas, estas últimas son las más sensibles a las variaciones de temperatura. Un cambio de temperatura marcado puede causar la inhibición de la metanogénesis, deteniendo la degradación de los ácidos grasos volátiles, los cuales al acumularse reducen la alcalinidad del biodigestor, causando una acidificación, inhibición de la etapa metanogénica y la interrupción eventual del proceso.

3.1.2. **Carga orgánica diaria.** La carga orgánica diaria, o velocidad de carga orgánica, es el término con el que se designa a la cantidad de materia prima o biomasa que se ingresa diariamente al reactor por unidad de volumen. Se expresa generalmente en kilogramos de sólidos volátiles por metro cúbico por día ($\text{kg VS m}^{-3}\text{d}^{-1}$).

La materia orgánica está conformada por humedad y sólidos (*total solids* TS). Estos últimos comprenden a los sólidos volátiles (*volatile solids* VS) y los sólidos fijos (*fixed solids*) (**Figura 9**). Otros nombres para los sólidos totales es materia seca (*dry matter* - DM) y para los sólidos volátiles, materia orgánica seca (*organic dry matter* - oDM).

También es posible expresar la carga orgánica diaria en relación a la demanda química de oxígeno (DQO)(*chemical oxygen demand o COD*) en lugar de la masa de sólidos volátiles.



Figura 9. Composición de la biomasa por sólidos y humedad.

Fuente: Adaptado de “*Estimating calorific values of lignocellulosic biomass from volatile and fixed solids*” (Sahito & Siddiqui, 2013).

3.1.3. **Tiempo de retención hidráulica.** El tiempo de retención hidráulica (*hydraulic retention time – HRT*) es el tiempo que la biomasa permanece dentro del reactor.

En un digestor por lotes o *batch*, el tiempo de retención es el que transcurre entre la alimentación o carga del sistema y su descarga (Varnero, 2011).

En un digestor de carga diaria (semicontinuo), el tiempo de retención guarda relación con el volumen del reactor y el volumen de carga diaria siguiendo la relación dada a continuación:

$$V_{\text{carga diaria}} = \frac{V_{\text{efectivo}}}{\text{HRT}}$$

Por lo tanto, el HRT determina el volumen efectivo del reactor que se requiere para procesar una determinada cantidad de biomasa.

Al aumentar el HRT, aumenta el grado de degradación de la materia orgánica, así como la producción de metano. Por otro lado, mientras menor sea el HRT, el tamaño del biodigestor se reduce para una determinada carga orgánica diaria.

3.1.4. **Agitación.** La agitación de un biodigestor tiene como principales objetivos el mezclado del sustrato fresco con los microorganismos anaerobios, prevenir la formación de espuma o nata y la sedimentación de biomasa en el fondo del reactor, así como homogenizar el digestato y la temperatura en todo el volumen del reactor, con el objetivo de incrementar la producción de biogás (Pinho, Ratusznei, Rodrigues, Foresti, & Zaiat, 2004; Tian et al., 2015). Se pueden identificar tres tipos principales de agitación (Varnero, 2011):

- **Agitación mecánica:** Mediante la utilización de agitadores de paletas o similares, ya sea de manera manual o utilizando motores.
- **Agitación por recirculación de digestato:** La agitación se logra al introducir una bomba de recirculación que mantiene el digestato en movimiento, generando turbulencia en la parte líquida del reactor.
- **Agitación por recirculación de biogás:** La agitación se da por burbujeo al inyectar el biogás producido al fondo del reactor.

3.2. **Tipos de digestores.** Desde el surgimiento de la tecnología de biodigestión anaeróbica, se han realizado grandes esfuerzos para mejorar el diseño de los biodigestores, pues este es un factor influyente en la producción de metano obtenida (Barber & Stuckey, 1999; Ward et al., 2008). Producto de dichos esfuerzos se han obtenido distintas variedades o tipos de reactores, adecuados para distintas condiciones de operación, variadas cargas orgánicas, presupuestos, tamaños, etc.

Se considerarán cuatro tipos principales de biodigestores anaerobios: los digestores de laguna cubierta, los biodigestores de mezclado completo, los biodigestores tipo pistón o *plug flow* y los biodigestores de película fija.

3.2.1. **Biodigestores de laguna cubierta.** Un biodigestor tipo laguna cubierta consiste en una laguna con un terraplén o berma alrededor de su borde superior y una cubierta, generalmente de tejido sintético para la acumulación del biogás. Es recomendable, además, que posean una segunda laguna para el almacenamiento del efluente de la laguna principal (**Figura 10**).

Debido a que carecen generalmente de sistemas de calentamiento, posee la desventaja que su producción de metano varía con la temperatura, llegando incluso a detenerse por completo. Su funcionamiento es mejor cuando el porcentaje de sólidos es menor al 3%.

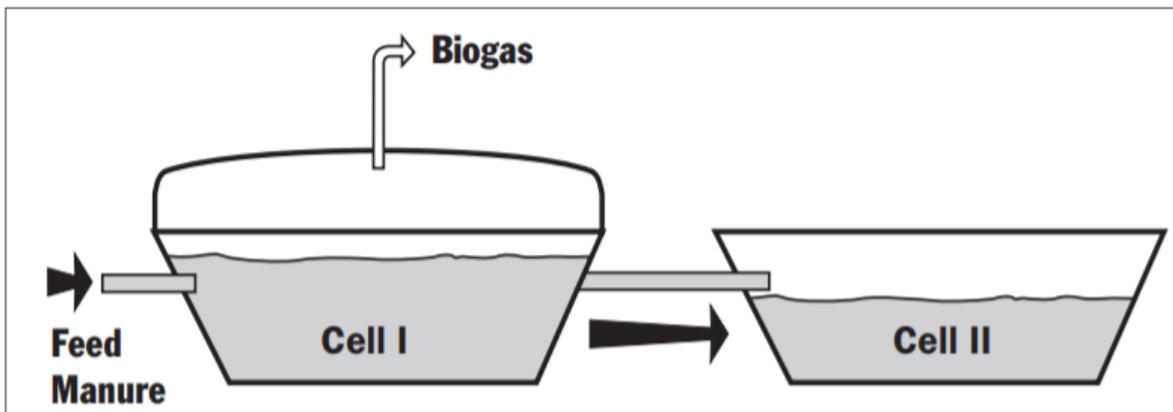


Figura 10. Biodigestor tipo laguna cubierta.

Fuente: Tomado de “*Biomethane technology*” (Ogejo et al., 2009).

3.2.2. **Digestores de tanque mezclado completo.** Es un reactor de volumen constante, generalmente con control de temperatura y mezclado mecánico, diseño para trabajar con un contenido de sólidos de 2 al 10% (**Figura 11**). Estos reactores requieren un mezclado, ya sea continuo o intermitente, para prevenir la separación por precipitación del digestato y la formación de nata. Su ubicación puede ser superficial o bajo tierra, dependiendo de la aplicación, y su forma también puede ser variada (rectangular, circular, etc.). Para prevenir pérdidas de calor, poseen un recubrimiento de material aislante térmico, el cual permite mantener una temperatura interna con menor variación y por lo tanto una mayor producción de biogás.

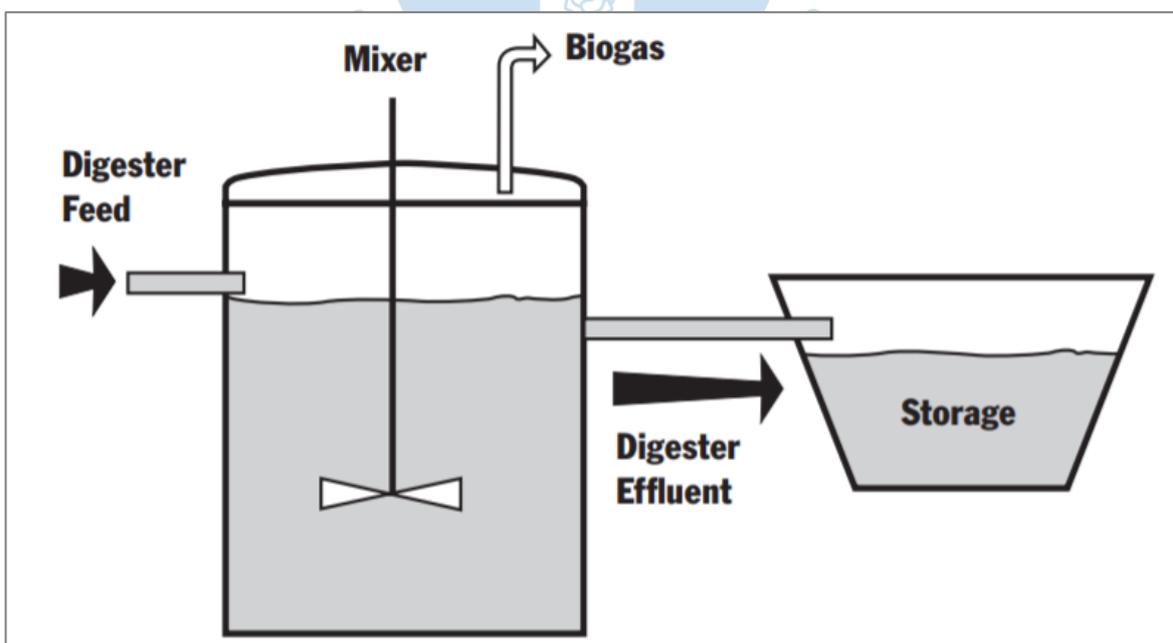


Figura 11. Biodigestor tipo CSTR o de tanque de mezclado completo.

Fuente: Tomado de “*Biomethane Technology*” (Ogejo et al., 2009).

3.2.3. **Digester plug flow.** Este tipo de reactor consiste en un contenedor recubierto en el cual el material a procesar entra por un extremo del reactor y un volumen igual es forzado a salir por el otro extremo (**Figura 12**). Trabajan mejor con contenidos de sólidos entre 11% y 14%. Los sistemas *plug flow* poseen la desventaja de estar sometidos a una pérdida de volumen efectivo producto de la estratificación y decantación de los sólidos más pesados al fondo del reactor, sin embargo, poseen las ventajas de ser de bajo costo y fácil instalación.

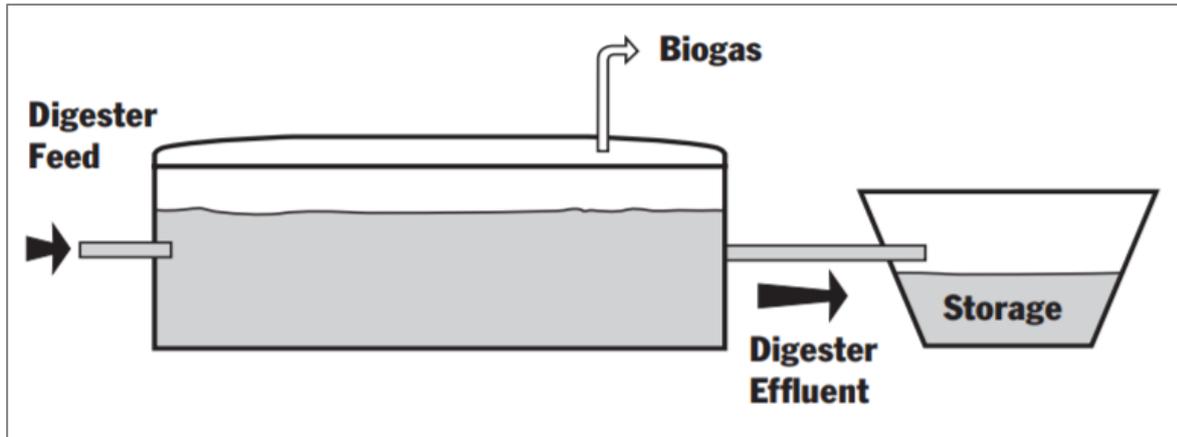


Figura 12. Biodigestor del tipo *plug flow* o pistón.

Fuente: Tomado de “*Biomethane technology*” (Ogejo et al., 2009).

3.2.4. **Reactor de película fija.** Este tipo de reactores (**Figura 13**) poseen una estructura a la cual las bacterias pueden sujetarse para prevenir el *lavado*, es decir, evitar que salgan del reactor.

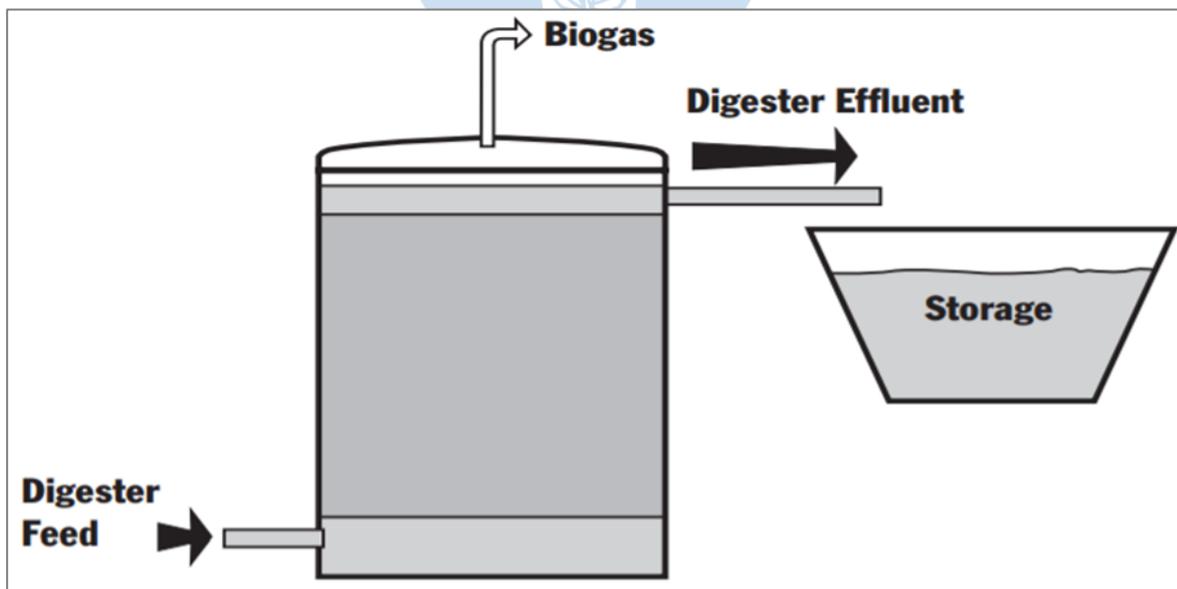


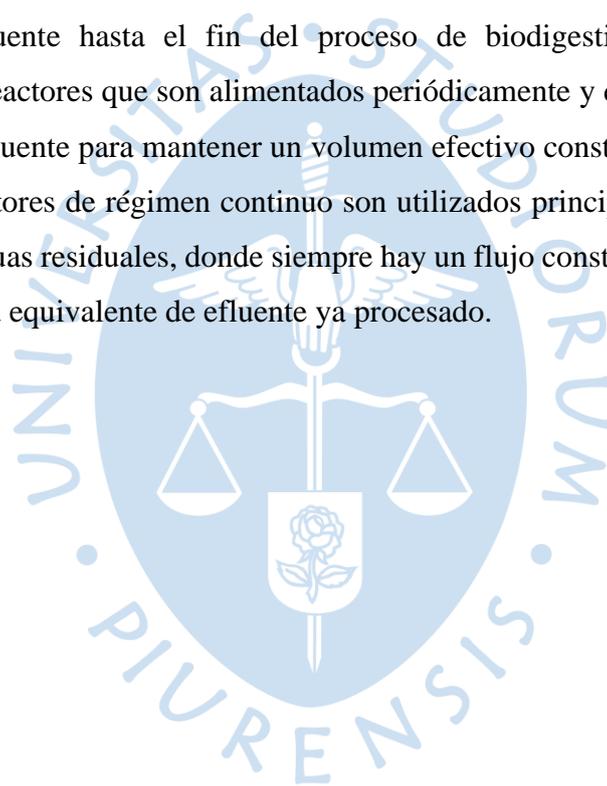
Figura 13. Reactor de película fija.

Fuente: Tomado de “*Biomethane technology*” (Ogejo et al., 2009).

Están diseñados para trabajar con un porcentaje de sólidos inferior al 3%, siendo usualmente la biomasa diluida en agua para poder ser procesada dentro de este tipo de reactores.

A diferencia de los tipos de reactores mencionados anteriormente, su tiempo de retención hidráulica es inferior, usualmente entre dos y cinco días, dependiendo de la biodegradabilidad de la biomasa procesada.

Por otro lado, dependiendo de su régimen de alimentación, los biodigestores pueden clasificarse en reactores batch o por lotes, semicontinuos y continuos. Los primeros tienen la particularidad de que la biomasa es cargada en su totalidad al reactor al inicio y no es retirado ningún efluente hasta el fin del proceso de biodigestión. Los biodigestores semicontinuos son reactores que son alimentados periódicamente y de los cuales es retirada cierta cantidad de efluente para mantener un volumen efectivo constante dentro del reactor. Finalmente, los reactores de régimen continuo son utilizados principalmente en las plantas de tratamiento de aguas residuales, donde siempre hay un flujo constante de nueva masa por procesar y una salida equivalente de efluente ya procesado.





Capítulo 2

Proceso productivo de cacao orgánico en el Perú

El cacao orgánico es un cultivo importante en el Perú y presenta un crecimiento sostenido en los últimos años, lo cual se ve reflejado en las cifras de exportaciones presentadas en los últimos años por el Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI).

El cacao peruano se caracteriza por ser un cacao fino y de aroma, siendo Perú el segundo productor de cacao orgánico a nivel mundial, después de República Dominicana, según cifras de la Asociación Internacional de Cacao (ICCO). Además, el cacao tiene un impacto social importante pues es un cultivo que ha ido reemplazando al cultivo ilegal de hoja de coca, llegando a erradicar 20 000 hectáreas de coca en el 2018, según reportes de *Fitch Solutions*.

Sin embargo, el cacao sigue siendo un cultivo sub aprovechado ya que por cada tonelada de grano seco de cacao se generan hasta 10 toneladas de residuos, principalmente orgánicos, entre los que destaca la cáscara de cacao.

En este segundo capítulo se realiza un breve estudio del cacao orgánico en el Perú, exponiendo algunas cifras indicadoras relacionadas a la producción y evolución de este cultivo en nuestro país en los últimos años. Luego, se estudia de manera general el proceso productivo del cacao orgánico, desde la cosecha hasta el secado, listando los residuos orgánicos generados en cada etapa. Finalmente, se analiza la problemática de las cáscaras de cacao y las distintas tecnologías estudiadas en la literatura para su aprovechamiento, entre ellas la biodigestión anaerobia, que es objeto del presente trabajo.

1. Cacao orgánico en el Perú

El cacao es un cultivo perteneciente a la familia de las esterculiáceas, especie *Theobroma cacao*, originario de los bosques tropicales de América del Sur. El árbol de cacao se cultiva principalmente en las regiones tropicales, entre 15° al norte y sur de la línea ecuatorial (**Figura 14**) y requiere una temperatura promedio anual entre 23 °C y 30 °C y una humedad promedio relativa anual entre 70% y 80% (MINAGRI, 2016).



Figura 14. Principales zonas de cultivo de cacao.

Fuente: Adaptado de “*Estudio del cacao en el Perú y en el mundo*” (MINAGRI, 2016).

El fruto del cacao (**Figura 15**) es una baya de forma ovoide y gruesa que contiene entre 20 y 40 semillas en su interior (Durán Ramírez, 2013).



Figura 15. Fruto o baya de cacao.

Fuente: Tomado de “*APPROCAP y su cacao fino de aroma de Piura-Perú para el mundo*” (Alternativas al Desarrollo, 2015).

Se pueden identificar tres partes principales de un fruto de cacao: la cáscara o vaina, la pulpa mucilaginosa o mucílago y los granos o semillas de cacao. La cáscara es la parte

externa del cacao y conforma lo que se conoce como vaina de cacao (*cocoa pod*). Esta posee tres partes: el exocarpo, el mesocarpo y el endocarpo (**Figura 16**).

- El exocarpo es la capa exterior de la vaina. Es una cáscara gruesa de la vaina de cacao que protege el fruto.
- El mesocarpo es la capa gruesa y dura que se encuentra por debajo del exocarpo y es de textura fibrosa.
- El endocarpo es la capa más interior de la vaina. Es de textura suave y fina y se encuentra en contacto con la pulpa mucilaginosa.

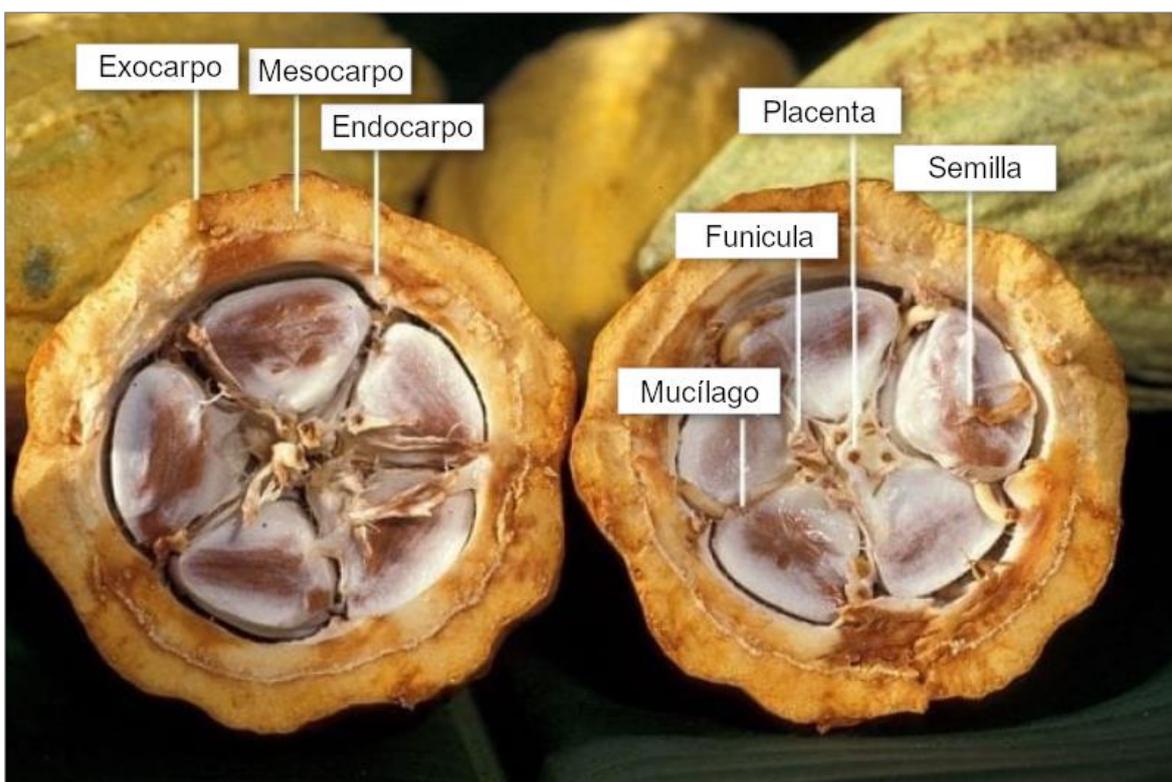


Figura 16. Partes del fruto del cacao.

Fuente: Adaptado de “*The Chocolate Fruit: Looking Inside a Cacao Pod*” (Guevara, 2018).

La pulpa mucilaginosa o mucilago envuelve las semillas de cacao. Es de color blanco, de sabor ácido azucarado y de textura pegajosa. La pulpa corresponde al 40% del peso del grano crudo y posee un contenido de entre 10% y 15% de azúcares, principalmente glucosa, fructosa y sacarosa (López, 2016).

Finalmente, el grano de cacao está formado por la semilla, que supone del 78 al 82% del peso del grano de cacao, la cáscara (10-16%) que la envuelve y la protege y un pequeño porcentaje de humedad (5-8%) (Torres, 2012).

1.1. Variedades de cacao orgánico. La especie *Theobroma cacao L.* se ha clasificado tradicionalmente en tres grupos: criollo, forastero y trinitario.

- **Criollo:** Nativo de América Central pre-colombina, actualmente es cultivado en México, Guatemala, Nicaragua, Venezuela, Colombia, Perú, islas del Caribe, Trinidad, Jamaica e Isla de Granada. Su árbol es débil, de crecimiento lento, bajo rendimiento y susceptible a enfermedades y plagas. Su fruto, por el contrario, se caracteriza por ser dulce y de menor amargo con una calidad mayor que otras variedades. Posee un sabor delicado, suave y complejo, además de un aroma intenso. Estas características lo vuelven un cacao exclusivo y con alta demanda en los mercados gourmet.
- **Forastero:** Oriundo de la Alta Amazonía, es de mayor producción en África y Asia. A diferencia del cacao criollo, su árbol es de mayor rendimiento, cosecha precoz, más resistente a plagas y enfermedades. Su fruto posee un sabor fuerte y amargo; ligeramente ácido con alto contenido de taninos. Por su mayor rendimiento y producción, se utiliza principalmente para la elaboración de chocolates corrientes y de mayor volumen de producción.
- **Trinitario:** Es originario de Isla Trinidad, siendo el cruce o híbrido entre las variedades criollo y forastero, por lo que no se encuentra en estado silvestre. Combina las propiedades de las variedades de cacao criollo y forastero pues posee mejor aroma que el cacao forastero y es más resistente a plagas y enfermedades en comparación con el cacao criollo. Una variedad importante es el cacao CCN-51, un cacao convencional desarrollado en Naranjal, provincia de Guayas en Ecuador. Este cacao ha adquirido gran popularidad entre los agricultores por tener características de alta productividad por hectárea. Es auto compatible al no necesitar de polinización cruzada para su fructificación; de cultivo temprano ya que inicia su producción a los dos años; resistente a plagas y enfermedades; fácilmente adaptable a diversas zonas tropicales; y posee un alto porcentaje de grasa (54%) haciéndolo muy cotizado por la industria. Por el lado contrario, no cuenta con las características del cacao fino de aroma al tener un sabor ácido y astringente (MINAGRI, 2016).

Sin embargo, esta clasificación no posee una base genética y fue fundamentada simplemente en términos utilizados por los productores de cacao. Esto motivó el desarrollo de estudios y expediciones de recolección de germoplasma, dando como resultado la

identificación de 10 nuevos grupos genéticos: Marañón, Curaray, Criollo, Iquitos, Nanay, Contamana, Amelonado, Purús, Nacional y Guyana (**Figura 17**). Esta nueva clasificación refleja con mayor precisión la diversidad genética del *T. cacao*, en oposición a las dos variedades tradicionales (criollo y forastero) y permite una mayor diferenciación entre el cacao producido en distintas partes del mundo (Motamayor et al., 2008).

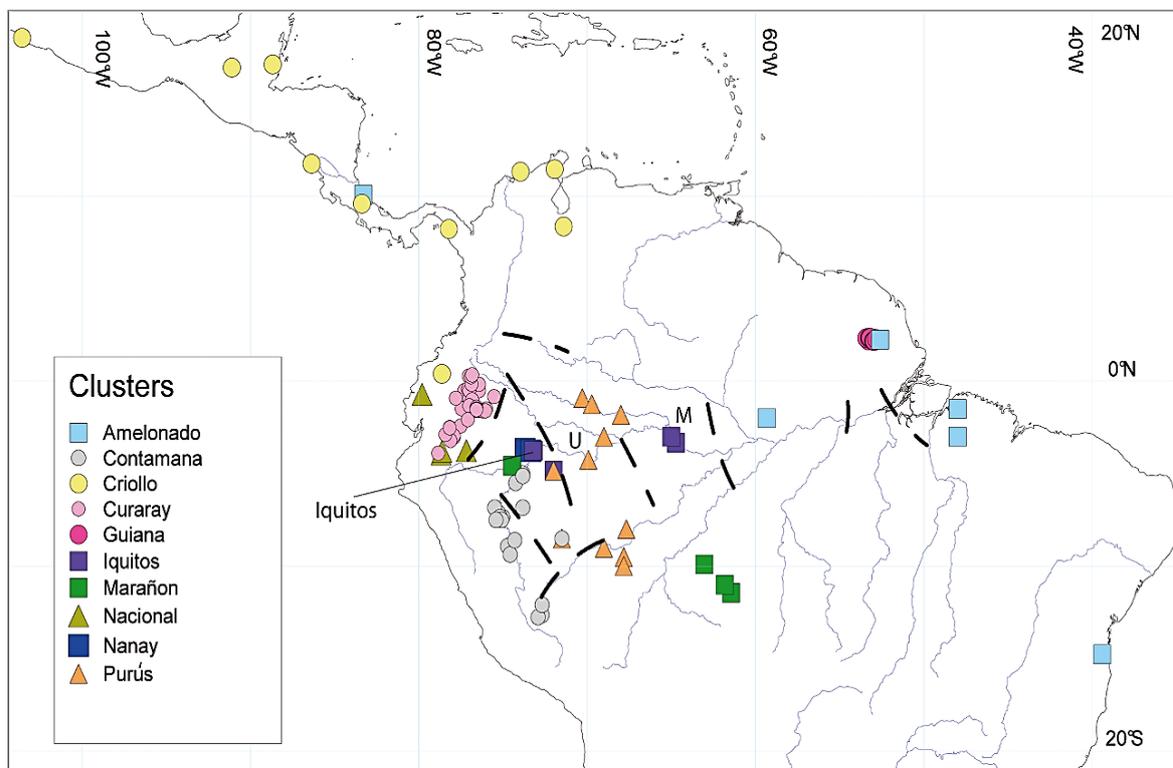


Figura 17. Distribución de variedades genéticas (*clústeres*) de cacao en América Latina.

Fuente: Tomado de “*Geographic and Genetic Population Differentiation of the Amazonian Chocolate Tree*” (Motamayor et al., 2008).

1.2. Producción de cacao orgánico. Perú es considerado el segundo productor a nivel mundial de cacao orgánico y es catalogado por la ICCO (*International Cocoa Organization* – Organización Internacional de Cacao) como país productor de cacao fino y de aroma (International Cocoa Organization, 2010), concentrando el 36% de la producción de cacao fino a nivel mundial (Perú 21, 2017).

Entre los años 2000 y 2008, la producción nacional de cacao presentó un crecimiento anual promedio de 4% y entre los años 2009 y 2015 el incremento fue de un 15.5%, como se puede apreciar en la **Figura 18**.

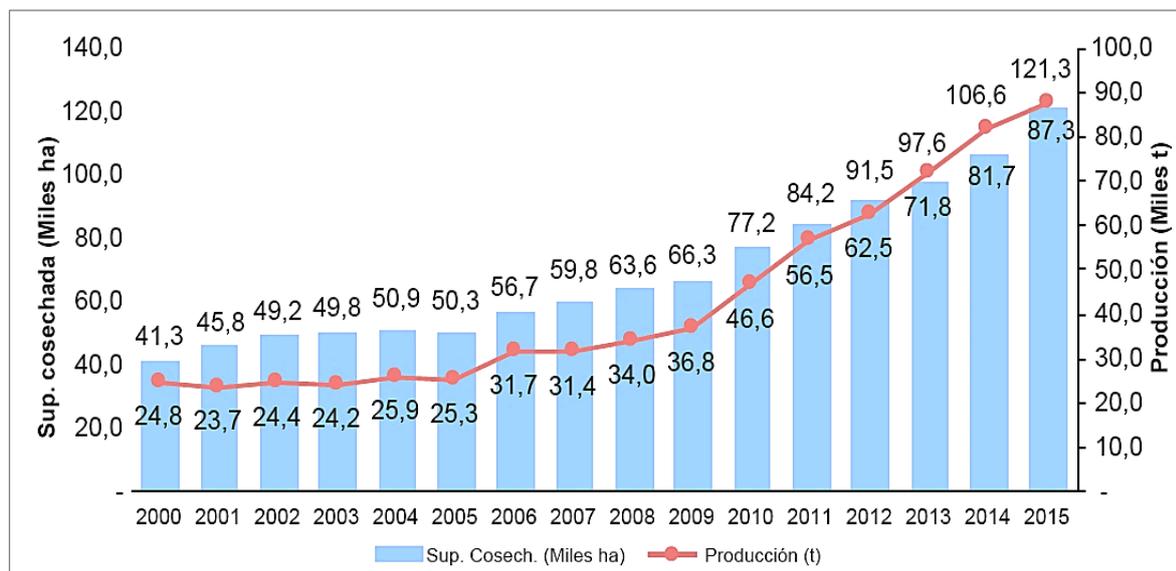


Figura 18. Perú, superficie cosechada y producción de cacao en grano, 2000-2015.

Fuente: Tomado de “*Estudio del CACAO en el Perú y en el Mundo*” (MINAGRI, 2016).

En el 2000, la producción de cacao en grano fue de 24.8 mil toneladas y para el 2008 ya se había alcanzado una producción de 34 mil toneladas, registrándose un crecimiento del 37%. Es a partir del 2009 en el que se observa un crecimiento de la producción nacional, desde 36.8 mil toneladas en el 2009, hasta las 87.3 mil toneladas producidas en el 2015 (MINAGRI, 2016).

Tabla 6. Perú, producción de cacao en grano y consumo de cacao. Cifras reales del 2014 al 2017 y predicciones del 2018 al 2022 por *Fitch Solutions*.

Indicador	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Producción de cacao en grano (miles de toneladas)	81.7	92.6	107.9	121.8	141.1	155.8	153.0	166.1	179.0
Crecimiento anual de la producción de cacao (%)	14.2	13.4	16.6	12.9	15.8	10.4	-1.8	8.6	7.8
Consumo de cacao en grano (miles de toneladas)	40.0	40.0	43.2	46.1	46.4	46.8	47.5	48.3	49.2
Crecimiento anual del consumo de cacao (%)	7.8	0.4	7.6	6.6	0.7	1.0	1.3	1.7	2.0

Fuente: Adaptado de “*Tougher Stance On Cocaine To Drive Cocoa Production In Peru*” (Fitch Solutions, 2018).

En los últimos años, la producción de cacao en grano ha conservado su crecimiento, llegándose a producir 107.9 y 121.8 mil toneladas, según cifras de *Fitch Solutions* y el Banco Central del Perú, estimándose una producción de 153.0 mil toneladas para el 2020 y 179.0 mil toneladas para el año 2022 (Fitch Solutions, 2018).

Según cifras de APPCacao para el año 2016, entre las regiones donde se produce cacao en grano (**Figura 19**) destacan las regiones de San Martín, Junín, Cusco, Ucayali, Huánuco, Ayacucho y Amazonas. Es en estas 7 regiones en donde se concentra el 93% de la producción nacional de cacao (León, 2018).

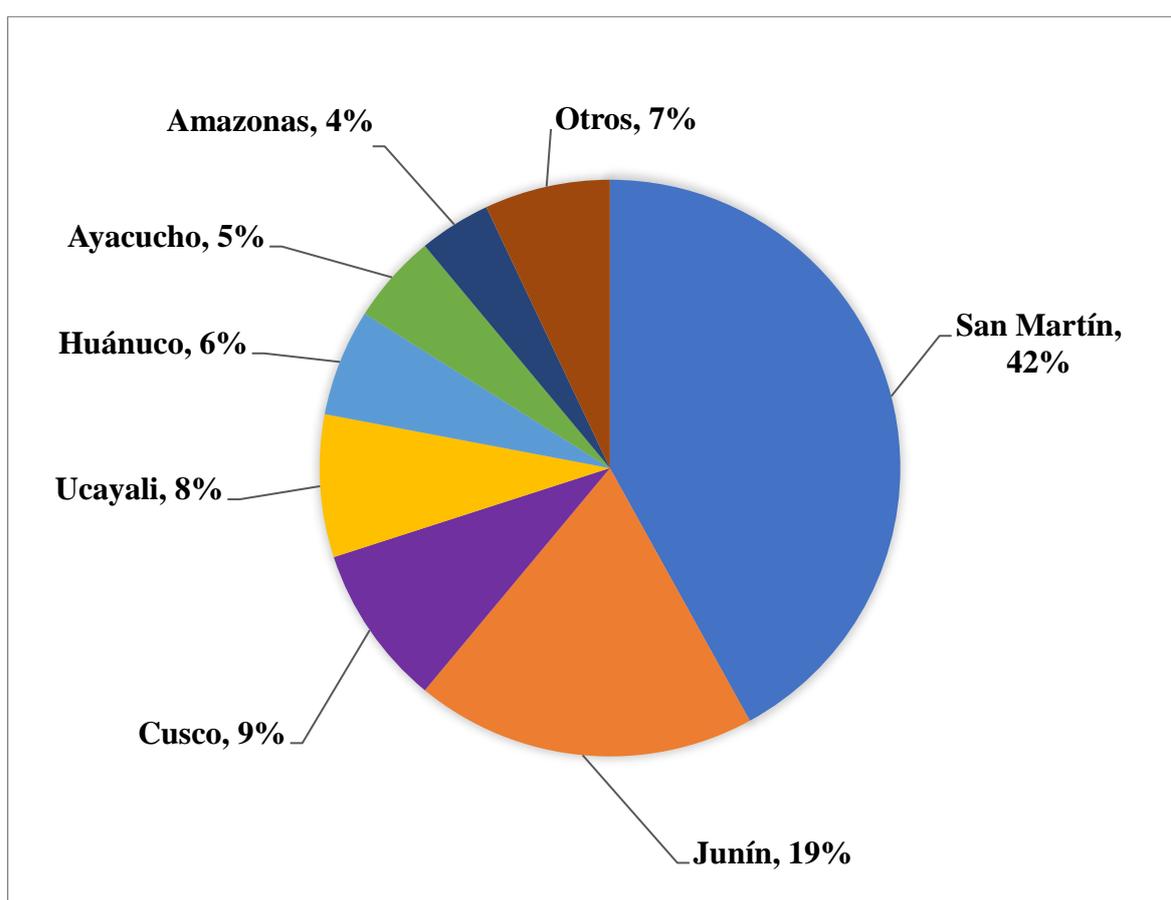


Figura 19. Perú, producción de cacao por región (2016).

Fuente: Elaboración propia, usando datos de APPCacao (León, 2018).

Aunque los frutos del árbol de cacao son cosechados durante todos los meses del año, los volúmenes más altos de producción se alcanzan durante la temporada de abril hasta agosto, con un pico de producción entre los meses de mayo y junio, como se puede observar en la **Figura 20**.



Figura 20. Producción mensual de cacao en Perú durante el periodo enero 2014 a agosto 2018.

Fuente: Tomado de “*Tougher Stance On Cocaine To Drive Cocoa Production In Peru*” (Fitch Solutions, 2018).

2. Proceso productivo del cacao orgánico

2.1. Etapas del proceso productivo del cacao orgánico. La obtención de granos de cacao implica una serie de etapas (**Figura 21**), por las que debe pasar el fruto del cacao, que inician con la cosecha y terminan en la clasificación de los granos secos de cacao, para la posterior fabricación de chocolate y otros productos del cacao.

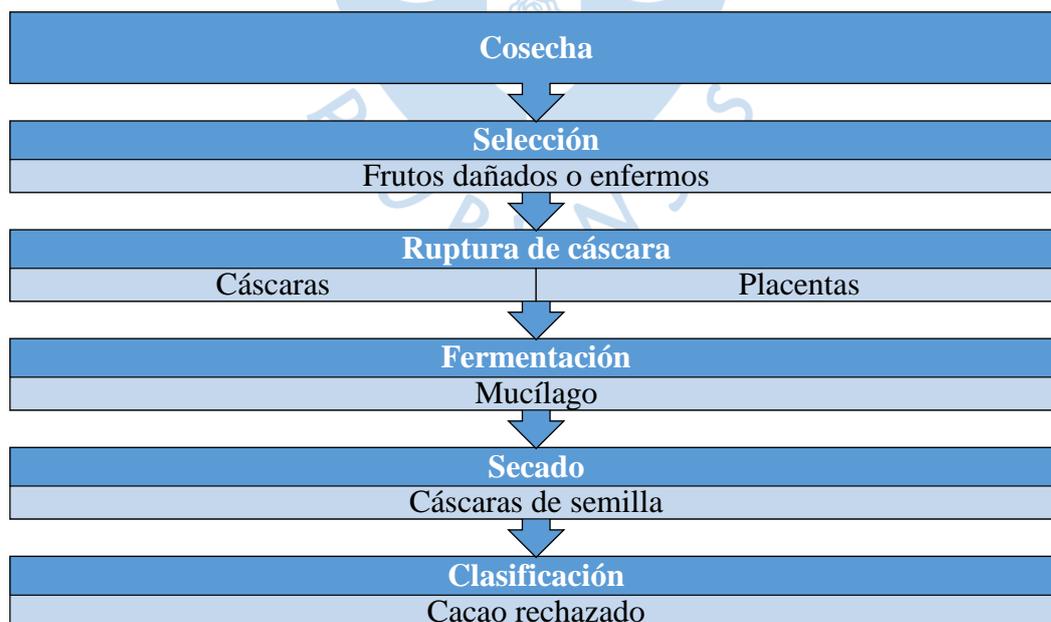


Figura 21. Etapas del proceso productivo del cacao y desechos generados en cada etapa.

Fuente: Elaboración propia, a partir de información del boletín técnico: “*Situação atual da utilização de subprodutos de cacau no Brasil*” (Lopes et al., 1985).

2.1.1. **Cosecha, selección y separación de cáscara.** El árbol de cacao empieza a producir flores a partir de los tres años y alcanza su máxima producción a los 8 u 9 años. Los árboles florecen, producen y maduran frutos de manera simultánea (Nigam & Singh, 2014).

Cuando los frutos se encuentran maduros, lo cual puede determinarse por un cambio de coloración a naranja o amarillo en la cáscara de la bellota, estos deben ser cosechados para evitar la germinación de las semillas. La cosecha debe realizarse de manera manual y con ayuda de un machete, para evitar dañar las flores o el fruto (Augstburger et al., 2000; INACAL, 2017; Lock, 2018; Nigam & Singh, 2014).

Posteriormente a la cosecha, se realiza la selección de las bellotas, separando aquellas que presenten signos de enfermedades, plagas o se encuentren dañadas (INACAL, 2017). Las bellotas que pasan el proceso de selección son abiertas manualmente para separar las semillas, las cuales se encuentran recubiertas en una pulpa blanca (mucílago), de la cáscara de la bellota. Las semillas junto con el mucílago son transportadas para su posterior fermentación y las cáscaras son descartadas y esparcidas en el suelo para su descomposición al aire libre, proceso denominado “reincorporación”.

2.1.2. **Fermentación.** La fermentación es un proceso bioquímico cuyo objetivo es la muerte del embrión de las semillas de cacao, la eliminación de la pulpa mucilaginosa y el desarrollo de los precursores de sabor y aroma característicos del chocolate (Augstburger et al., 2000; Nigam & Singh, 2014; Schwan & Wheals, 2004). Las semillas cosechadas se someten a una fermentación natural durante la cual, a partir de la pulpa mucilaginosa y por acción microbiana, se producen etanol y ácidos (principalmente láctico y acético) liberando calor en el proceso y tornando las semillas de un color violeta a un color chocolate.

En la **Figura 22**, se pueden apreciar los microorganismos más activos para distintos momentos de la fermentación del cacao. Los recuadros representan el grupo microbiológico más abundante durante cada etapa, las estrellas indican los picos de metabolitos y temperatura.

Existen dos métodos principales para realizar la fermentación:

- El primer método consiste en apilar los granos de cacao en montones sobre sacos y cubrirlos con hojas de plátano. El montón es mantenido por 6 días y son mezclados al segundo y cuarto día. Es un método más tradicional en comparación al método de la fermentación en cajas.

- El segundo método es la fermentación en cajas (**Figura 23**). Consiste en llenar cajas de madera con los granos de cacao y recubrirlos con hojas de plátano. Las cajas poseen ranuras o agujeros en la base que permiten el escurrimiento de los jugos originados por la degradación del mucílago y el acceso de aire (INACAL, 2017; Lock, 2018; López, 2016; Nigam & Singh, 2014).

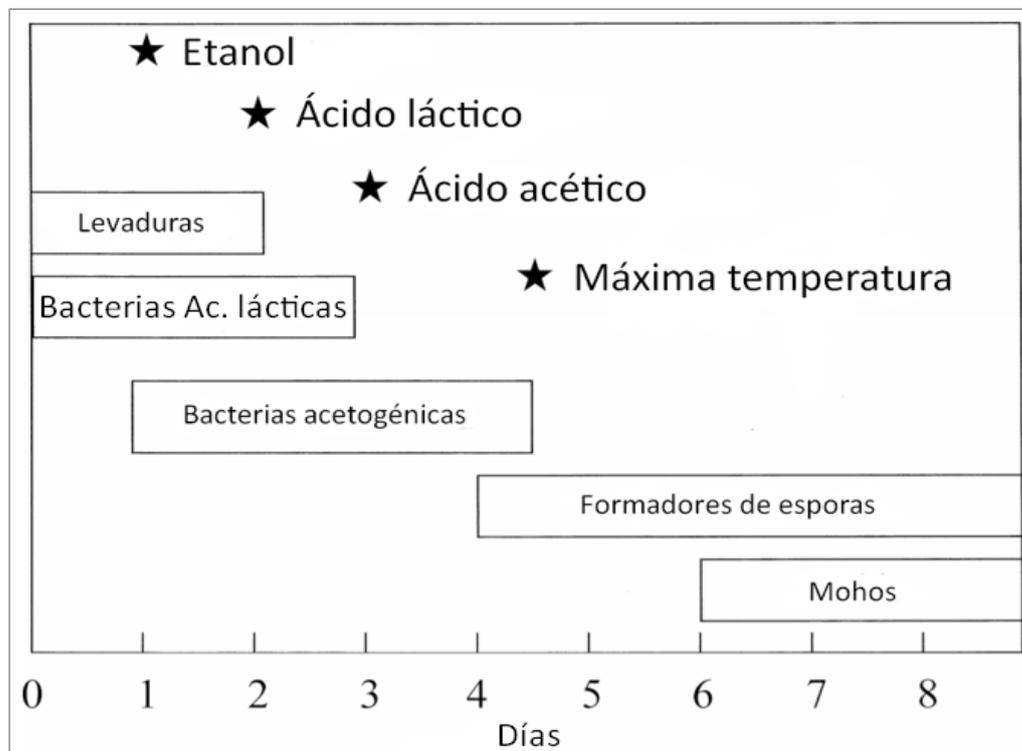


Figura 22. Fermentación de las semillas de cacao.

Fuente: Adaptado de “*The Microbiology of Cocoa Fermentation and its Role in Chocolate Quality*” (Schwan & Wheals, 2004).

El proceso de fermentación puede dividirse en tres fases superpuestas (Nigam & Singh, 2014):

- **Fase I – Levaduras anaerobias:** Durante las primeras 24 a 36 horas, los azúcares presentes en la pulpa mucilaginoso son degradados a etanol por acción enzimática de levaduras, en condiciones de bajo oxígeno y pH menor a 4. Este proceso causa el escurrimiento de la pulpa en la forma de jugo y la muerte del embrión de la semilla de cacao a causa de la penetración del ácido acético y etanol a la semilla.
- **Fase II – Bacterias ácido-lácticas:** Si bien es cierto las bacterias ácido-lácticas se encuentran presentes desde el inicio de la fermentación, las condiciones para el

inicio de la actividad bacteriana no son favorables hasta luego de 48 a 96 horas, momento en el cual la actividad de las levaduras se ve inhibida por un incremento en la concentración de alcohol, aumento de pH y una mayor aireación. Las bacterias ácido-lácticas degradan los azúcares en ácido láctico, ácido acético, etanol y dióxido de carbono.

- **Fase III – Bacterias ácido acéticas:** De manera similar a las bacterias ácido-lácticas, las bacterias ácido-acéticas se encuentran desde una etapa muy temprana de la fermentación y su papel se vuelve más importante a medida que aumenta la aireación en el proceso. Esta fase está marcada por la transformación del etanol en ácido acético en una reacción altamente exotérmica, causante del incremento de la temperatura en los fermentadores.

El fin de la fermentación se da cuando la temperatura de la masa fermentada baja. Para poder determinar cuándo interrumpir la fermentación, se toman muestras de semillas de cacao y se les realiza un corte longitudinal para verificar que el color sea violeta café. Cuando el 75% de las almendras haya logrado este color, se interrumpe la fermentación para evitar que inicie la putrefacción de la masa. La duración total de la fermentación viene determinada por las condiciones climáticas del lugar donde se realiza la fermentación y la variedad del cacao (Augstburger et al., 2000).



Figura 23. Mezclado o remoción de las semillas de cacao en un fermentador de caja de madera.

Fuente: Elaboración propia, Universidad de Piura.

2.1.3. **Secado.** Durante la fermentación se iniciaron una serie de procesos que permiten el desarrollo de los precursores de sabor y aroma característicos del chocolate, que continúan durante la etapa de secado. Este secado se realiza generalmente de manera natural, es decir al sol, colocando los granos en secadores de madera (**Figura 24**).

En este proceso, los granos de cacao, partiendo de una humedad mayor al 55%, son secados hasta alcanzar una humedad entre 5-7%, adecuado para ser almacenados (Augstburger et al., 2000; Nigam & Singh, 2014). Al mismo tiempo se llevan a cabo reacciones enzimáticas para desarrollar el aroma.



Figura 24. Secado de granos de cacao.

Fuente: Elaboración propia, Universidad de Piura.

2.2. Residuos del proceso productivo del cacao orgánico. En el caso del cacao orgánico, aproximadamente el 90% del peso total del producto cosechado es descartado como residuo, entre los que destacan las cáscaras, el jugo del mucílago (**Figura 25**) y los frutos de descarte (**Figura 26**) (Barazarte, Sangronis, & Unai, 2008; Lock, 2018).



Figura 25. Residuos orgánicos del proceso productivo del cacao: cáscara de cacao en mitades y mucílago exudado durante la fermentación.

Fuente: Elaboración propia, Universidad de Piura.



Figura 26. Granos de cacao descartados por no cumplir criterio de calidad.

Fuente: Elaboración propia, Universidad de Piura

Para el caso de la cáscara del cacao, esta se origina en la etapa inmediata a la cosecha. Al partirse las bellotas de cacao, las mitades de cáscara de bellota (**Figura 25**, izquierda) son descartadas y dejadas para su compostaje natural en los campos de cultivo.

En la etapa de fermentación, los azúcares presentes en la pulpa mucilaginosa que recubre los granos de cacao son degradados en alcoholes que son dejados escurrir de los recipientes de fermentación. Este licor de mucílago también es un residuo orgánico de la cadena productiva del cacao. En la parte derecha de la **Figura 25**, se puede apreciar una muestra del licor de mucílago, tomada en ASPROBO en Piura.

Los frutos y granos de descarte, los cuales son retirados al no superar los estándares de calidad en la etapa de selección, son el tercer principal residuo orgánico generado en la cadena productiva del cacao (**Figura 26**).

3. Problemática de la cáscara de cacao

Como se ha mencionado anteriormente, los restos de la bellota de cacao o cáscara de bellota (diferente de la cáscara de los granos, la cual es también llamada testa o cascarilla) representan entre el 70-90% del peso del fruto cosechado (Lock, 2018), esto quiere decir que por cada tonelada de granos secos de cacao se generan hasta 10 toneladas de cáscaras (Acosta et al., 2018). Toda esta cantidad de cáscaras son descartadas inmediatamente después de la cosecha, quedándose en las tierras de cultivo con el fin de retornar los nutrientes presentes en las cáscaras nuevamente al suelo (**Figura 27 y Figura 28**).



Figura 27. Descarte de las cáscaras en las tierras de cultivo.

Fuente: Elaboración propia, Universidad de Piura.



Figura 28. Descarte de cáscaras de cacao en tierras de cultivo.

Fuente: Elaboración propia, Universidad de Piura.

Las visitas realizadas permitieron comprobar que la falta de una técnica adecuada de compostaje tiene como consecuencia la proliferación de insectos y enfermedades en las plantas de cacao, además de la emisión de malos olores, producto de la putrefacción de las cáscaras al aire libre.

Distintos métodos y formas de aprovechamiento de la cáscara de cacao han sido investigadas y sus resultados expuestos en la literatura. En la **Tabla 7** se listan algunos de ellos.

Tabla 7. Aprovechamiento de la cáscara de cacao: Métodos y procesos en la literatura.

Producto	Descripción	Referencias
Pectinas	Extracción de pectinas presentes en la cáscara de cacao para su utilización como agente gelificante, espesante y estabilizante en alimentos. Además, las pectinas tienen aplicaciones en la medicina, para enfermedades gastrointestinales.	(Adomako, 1972; Barazarte et al., 2008; Faas et al., 2018; Vriesmann, Teófilo, & Lúcia de Oliveira Petkowicz, 2012; Yapo & Koffi, 2013)
Alimentación de aves de corral	Utilización como parte de la dieta de pollos <i>broiler</i> .	(Donkoh, Atuahene, Wilson, & Adomako, 1991; Sobamiwa & Longe, 1994)
Elaboración de papel	Utilización de la cáscara de cacao como fuente de fibras para la elaboración de pulpa para papel.	(Daud et al., 2013)

Tabla 7 (continuación)

Producto (cont.)	Descripción (cont.)	Referencias (cont.)
Compuestos bioactivos	Extracción de pectina, fibras, compuestos antioxidantes, minerales, entre otros, los cuales sirven de materia prima para la industria farmacéutica, alimenticia y cosmética.	(Campos-Vega, Nieto-Figueroa, & Oomah, 2018)
Compostaje y fertilizante	Obtención de compost directamente a partir de los residuos de cacao.	(Praveena, Karthikeyan, Kannan, Jegadeeswari, & Suresh, 2018)
Bioplásticos	Obtención de celulosa microcristalina a partir de la cáscara de cacao para su utilización como reforzamiento a bioplástico producido a partir del almidón de las semillas de sandía.	(Lubis, Gana, Maysarah, Ginting, & Harahap, 2018)
Obtención de energía	Aprovechamiento de la cáscara de cacao como biomasa para la obtención de energía mediante procesos de conversión termoquímicos.	(Lock, 2018; Syamsiro, Saptoadi, Tambunan, & Pambudi, 2012)
Biogás	Aprovechamiento de la cáscara de cacao para la obtención de biogás mediante procesos de digestión anaerobia.	(Acosta et al., 2018; Ward-Doria, Arzuaga-Garrido, Ojeda, & Sánchez, 2016)

Fuente: Elaboración propia.

De todos los procesos listados, solo tres son de implementación relativamente sencilla y cuya adopción puede ser extendida entre los pequeños productores de cacao: la utilización de la cáscara de cacao como parte de la dieta de aves de corral; la obtención de compost y la aplicación del proceso de biodigestión anaerobia para la obtención de biogás y biofertilizante.

Capítulo 3

Generación de biogás a partir de la cáscara de cacao

El proceso de biodigestión anaerobia es una alternativa para el aprovechamiento del potencial energético y fertilizador de los residuos orgánicos procedentes de las distintas etapas de las cadenas productivas de la región, como lo es la del cacao. Los productos de la biodigestión anaerobia son básicamente dos: biogás y biofertilizante. El biogás es un combustible gaseoso y por tanto una fuente de energía, mientras que el biofertilizante, compuesto por biol y biosol, es una alternativa a los fertilizantes no orgánicos (e.g. urea) y que adicionalmente posee la ventaja de contener metabolitos que promueven el crecimiento, desarrollo y florecimiento de las plantas.

Para la generación de biogás y biofertilizante a partir de la cáscara de cacao, es necesario el planteamiento de una metodología clara que permita el estudio del proceso de biodigestión anaerobia de manera integral, para así determinar tanto la biodegradabilidad de la cáscara de cacao, como la calidad y cantidad de biogás que puede recuperarse de ella. Un enfoque para el desarrollo de esta metodología es el enfoque basado en los estudios o ensayos experimentales de biodigestión anaerobia de residuos orgánicos bajo condiciones controladas.

En este capítulo, se desarrolla una metodología experimental para la caracterización y el estudio de la digestión anaerobia de residuos orgánicos y los procedimientos necesarios para llevarla a cabo. Y, finalmente, se presentan los resultados obtenidos de aplicar dicha metodología al estudio de la biodigestión de la cáscara de cacao.

1. Planteamiento

Con el objetivo de realizar un estudio experimental de la degradabilidad de la cáscara de cacao y el posterior diseño de un biodigestor semicontinuo para el procesamiento de la cáscara de cacao, se planteó la siguiente metodología (**Figura 29**).



Figura 29. Planteamiento de desarrollo de investigación.

Fuente: Elaboración propia.

- **Caracterización de biomasa:** Esta primera etapa de la investigación experimental tuvo como objetivo determinar la composición y características relevantes, desde el punto de vista de la biodigestión, de la cáscara de cacao.
- **Ensayo de Potencial Bioquímico de Metano:** La segunda etapa tuvo como objetivo determinar la cantidad de metano que puede obtenerse por unidad de masa de cáscara de cacao por medio del proceso de biodigestión anaerobia por lotes y en condiciones mesofílicas.
- **Ensayo de biodigestión semicontinua:** En el ensayo de biodigestión semicontinua, se determinaron, de manera experimental, los parámetros de operación adecuados para la biodigestión semicontinua.

2. Metodología y procedimientos

Para garantizar la validez de los resultados obtenidos, se siguieron determinados métodos y procedimientos estándar de análisis listados a continuación.

2.1. Caracterización de la biomasa. Uno de los requerimientos para realizar el estudio experimental de la producción de biogás a partir de materia orgánica es la caracterización de la materia orgánica o biomasa que se utilizará como sustrato. La normativa alemana VDI 4630 (VDI, 2006) para la fermentación de materia orgánica sugiere la caracterización de los sustratos en términos de su consistencia, composición y presencia de impurezas y contaminantes, además de su fermentabilidad, producción de biogás, calidad de biogás y su clasificación legal.

2.1.1. Consistencia. Dependiendo de su consistencia, los sustratos pueden ser clasificados en tres grupos:

- Líquidos o verticales: aguas servidas, purines
- Pastosos y semisólidos: estiércol y lodos
- Sólidos: cultivos energéticos, residuos domésticos

Además, pueden ser homogéneos o heterogéneos.

La **consistencia** determina la dificultad para el muestreo, preparación y almacenamiento del sustrato.

2.1.2. Composición. Se refiere a la composición química del sustrato y los parámetros básicos descriptivos son:

- Demanda química de oxígeno (DQO o *COD* de *chemical oxygen demand*)
- Contenido de humedad (%)
- Sólidos totales o materia seca (ST o *TS* de *total solids – DM* de *dry matter*)
- Sólidos volátiles o materia orgánica seca (SV o *VS* de *volatile solids – oDM* de *organic dry matter*).

Un análisis de composición química más detallado puede incluir la determinación del contenido de grasas, proteínas, carbohidratos y lignina. Otro enfoque para la caracterización del sustrato es mediante la determinación del contenido de carbono, nitrógeno, azufre, fósforo, magnesio y potasio.

2.1.3. **Impurezas y contaminantes.** Las impurezas son sustancias presentes en el sustrato que interfieren con el proceso de fermentación. Ejemplos de impurezas son materiales pesados como arena, piedras, vidrios, etc. y materiales ligeros como plásticos, maderas y cuero.

Por otro lado, los contaminantes son sustancias biotóxicas que inhiben el proceso de fermentación, como los desinfectantes, biocidas y antibióticos.

2.1.4. **Fermentabilidad.** Permite clasificar una biomasa de acuerdo con su fermentabilidad en distintos grupos:

- No fermentables: como los alcoholes o glicerina.
- Fermentables luego de tratamientos mecánicos y de homogenización.
- Fermentables luego de tratamientos fisicoquímicos.
- Fermentables luego de dilución (en agua) o mezclado (co-digestión).

2.1.5. **Producción y calidad de biogás.** Clasifica los sustratos de acuerdo con la cantidad de biogás producido por unidad de masa y por la composición del biogás producido, principalmente en porcentaje de metano y dióxido de carbono, pero pueden considerarse también la presencia de otros gases en menor proporción, como hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, amoníaco entre otros.

2.1.6. **Clasificación legal.** Los sustratos pueden ser clasificados también en base a consideraciones legales en:

- Residuos
- Aguas residuales

- Estiércoles de granja
- Materias primas renovables

Esto es importante ya que los desechos y residuos orgánicos están sujetos a distintas legislaciones. Según información recogida en la normativa VDI 4360, para el caso de Alemania, los residuos agrícolas están sujetos a los instrumentos regulatorios *EC ordinance EGC 1774/02, biowaste ordinance, sewage sludge ordinance y fertilizer ordinance*; mientras que las aguas residuales están sujetos a las legislaciones respecto al tratamiento de aguas y procesamiento de residuos. Por otro lado, la producción de biogás a partir de cultivos energéticos y materia prima renovable en general está sujeta al acta de energías renovables (REA). Para el caso de Perú, se aplica lo establecido en el Decreto Legislativo N° 1278, Ley de gestión integral de residuos sólidos.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, para la caracterización de la cáscara de cacao se realizaron ensayos de determinación del contenido de sólidos totales y sólidos volátiles (*TS* y *VS*). Para la realización de dichos ensayos, se siguió un procedimiento basado en métodos estandarizados para el análisis de agua y aguas residuales publicados por la Asociación Americana de Salud Pública (*American Public Health Association – APHA*). El procedimiento es detallado en el apéndice A.

Para la determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) se realizaron análisis en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura. El método reportado para la ejecución de dichos análisis fue el método de refluo abierto para la determinación de la demanda química de oxígeno, publicados por la APHA en sus métodos estándares para el análisis de agua y aguas residuales (E.W. Rice, R.B. Baird, 2012). Los resultados de los ensayos de DQO son acreditados por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL).

2.2. Ensayo de potencial bioquímico de metano. Para la determinación de la fermentabilidad o degradabilidad de la cáscara de cacao, así como la producción y calidad de biogás obtenido a partir de dicha biomasa, se llevó a cabo un ensayo de potencial bioquímico de metano o ensayo BMP. Este ensayo consiste en la realización de la fermentación o biodigestión de una cantidad determinada de biomasa dentro de mini-reactores bajo condiciones anaerobias y a temperatura controlada, registrando la producción diaria de biogás y biometano. El procedimiento para la realización de esta prueba se basó en

la normativa alemana VDI 4630 y los trabajos de (Angelidaki et al., 2009) y (Guwy, 2004) y puede encontrarse en el apéndice B.

2.2.1. **Tanque de ensayos BMP.** Para la realización del ensayo BMP de las cáscaras de cacao, se utilizó un tanque diseñado específicamente para este tipo de ensayo (**Figura 30**). Este tanque de ensayos BMP, consiste en un depósito con agua temperada a 37 °C con capacidad de hasta 10 líneas de reactores.

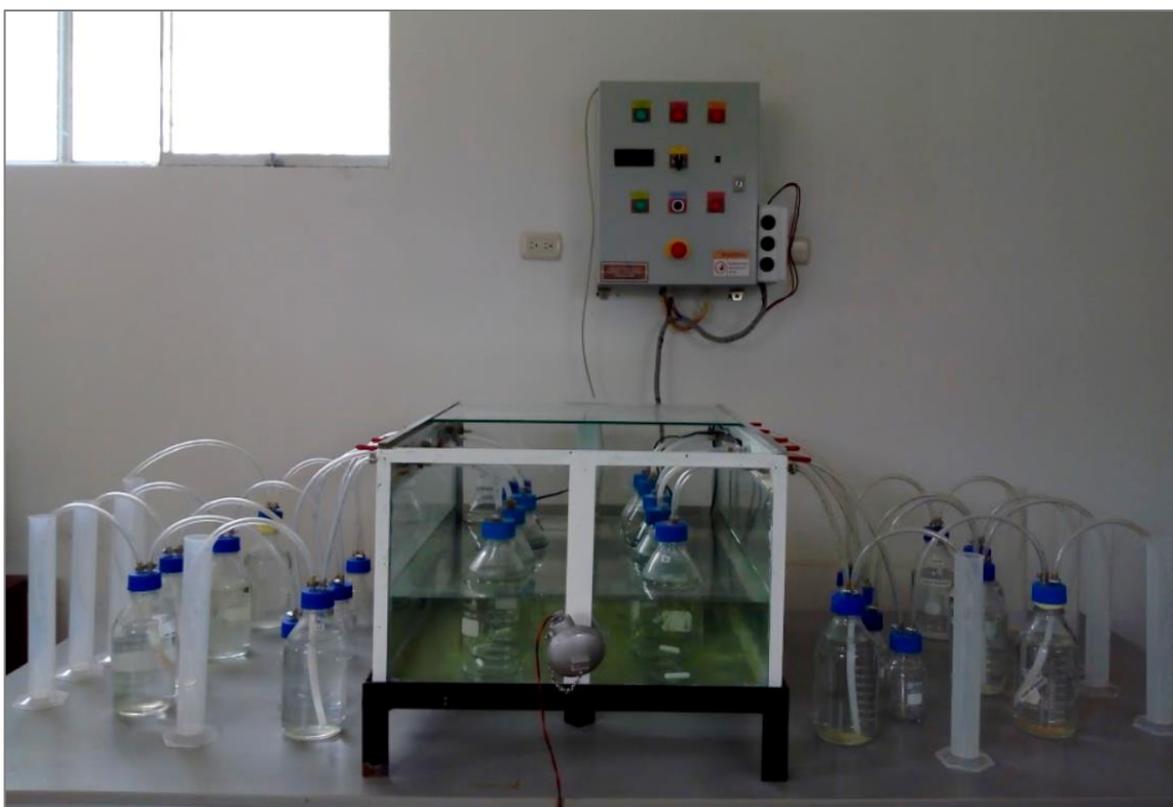


Figura 30. Tanque para la elaboración de ensayos BMP.

Fuente: Elaboración propia,

2.2.1.1. **Estructura del tanque de ensayos.** Para la estructura del tanque (**Figura 31**) se construyó un armazón de acero de 81x60x37 cm y con unas platinas laterales con 6 agujeros por lado para las líneas de biogás. Además, se colocaron otras dos platinas en las caras frontal y lateral en las que se realizó un agujero en cada una para ubicar el calentador eléctrico (*heater*) y el sensor RTD de temperatura.

Las paredes del tanque de ensayos BMP están hechas de vidrio de 6 mm de espesor, así como las tapas deslizables de la parte superior del tanque (**Figura 32**).



Figura 31. Estructura del tanque de ensayos BMP
Fuente: Elaboración propia.



Figura 32. Estructura del tanque BMP con paredes de vidrio colocadas.
Fuente: Elaboración propia.

2.2.1.2. *Líneas de reactores.* Cada línea de reactores se compone por una botella Schott de un litro en donde ocurre la biodigestión de la materia orgánica, otra botella Schott de un litro para el almacenamiento de la solución barrera o solución de desplazamiento y, para el

caso de las líneas de medición de metano, un matraz Erlenmeyer de 250 mL para la solución depuradora o solución de filtrado de dióxido de carbono (**Figura 33**).



Figura 33. Matrazes Erlenmeyer de 250 mL y botellas Schott de 1 L usadas en el ensayo BMP.

Fuente: Elaboración propia.

Para la medición de la producción de biogás se utilizaron líneas similares a la mostrada en la **Figura 34**. La producción de biogás es equivalente a la cantidad desplazada de solución barrera, la cual era recogida en una probeta graduada para determinar su volumen con precisión.

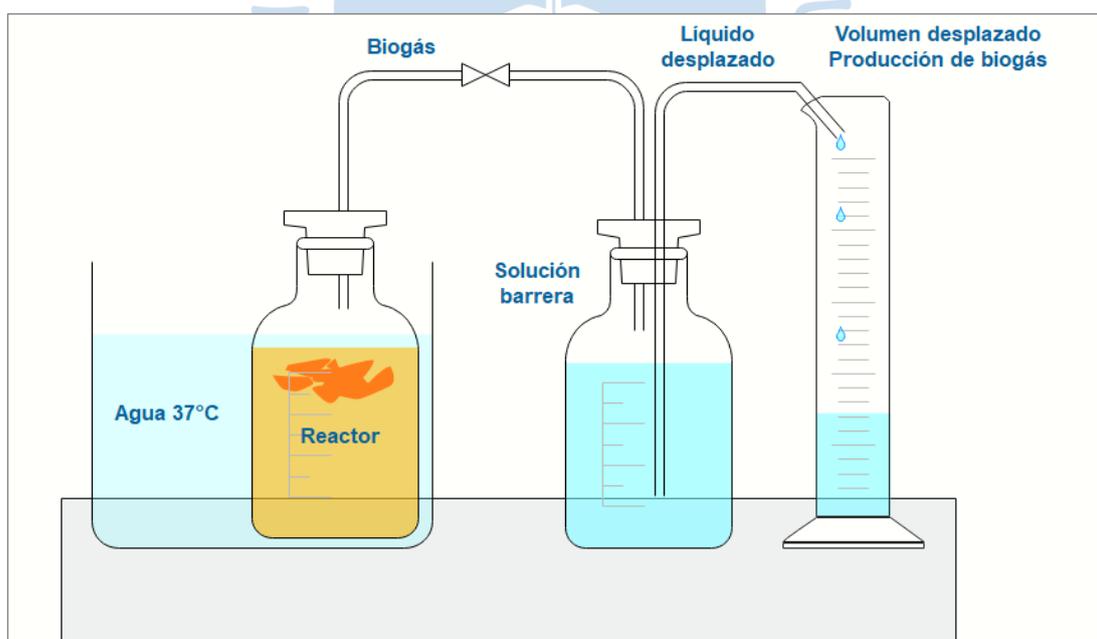


Figura 34. Esquema de línea de medición de biogás para ensayo BMP.

Fuente: Elaboración propia.

De manera similar, para la medición de la producción de metano se utilizaron líneas similares a la mostrada en la **Figura 35**. Poseen como elemento adicional un recipiente de

solución depuradora, en la que el dióxido de carbono era capturado y precipitado. La producción de metano es equivalente a la cantidad de solución barrera desplazadas, la cual era recogida en una probeta graduada para determinar su volumen de manera precisa.

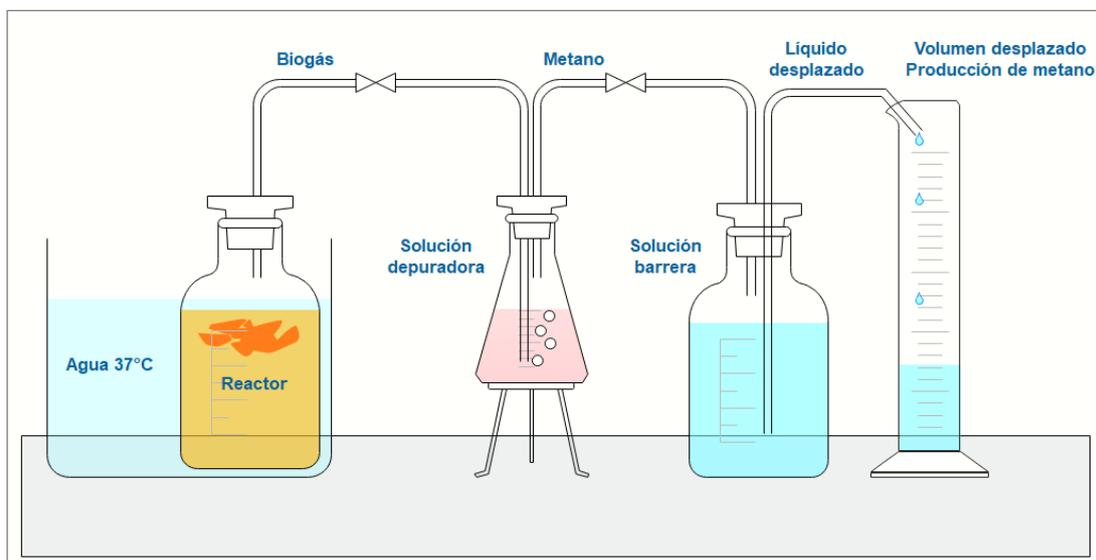


Figura 35. Esquema de línea de medición de metano para ensayo BMP.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.1.3. *Soluciones barrera y depuradora.* La solución barrera o solución de desplazamiento fue preparada de acuerdo con los reactivos y cantidades indicadas en la **Tabla 8**. Por otro lado, la solución depuradora encargada de separar el metano del biogás fue preparada con los reactivos y cantidades indicadas en la **Tabla 9**.

Tabla 8. Preparación de 1 L de solución barrera.

Preparación de 1 L de solución barrera	
Cloruro de sodio	200 g.
Ácido cítrico	5 g.
Agua desionizada	1 L.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Preparación de 1 L de solución depuradora.

Preparación de 1 L de solución depuradora	
Dióxido de sodio	80 g.
Fenolftaleína	2 gotas
Agua desionizada	1 L.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.1.4. *Control de temperatura.* El calentamiento de los reactores se realizó por medio de un baño maría y para mantener una distribución uniforme de temperatura se utilizaron dos bombas de recirculación sumergidas en el tanque de ensayos.

Para el calentamiento del baño maría se utilizó un calentador eléctrico *heater* de 2 kW. La tarjeta de control de potencia puede encontrarse detallada más adelante, en el apartado 3.2.3.1.

Para la medición de la temperatura se utilizó un RTD del tipo PT100.

El controlador utilizado en el tanque de ensayos BMP fue un controlador PI, implementado en un PLC CLIC Koyo de la marca Direct Automation (**Figura 36**).

Los parámetros de sintonización del PI utilizados fueron:

$$K_p = 15.2$$

$$T_i = 5035 \text{ segundos}$$

Los cuales fueron determinados utilizando la función de transferencia presentada a continuación:

$$T(s) = \frac{0.0851}{330s + 1}$$

Esta función de transferencia fue obtenida mediante la aproximación de la respuesta del sistema ante una entrada escalón, a un sistema de primer orden.



Figura 36. PLC Koyo utilizado en el tanque BMP

Fuente: Direct Automation

2.2.1.5. *Tapas herméticas.* Las tapas de las botellas Schott fueron modificadas (**Figura 37**) para lograr un sellado hermético al interior de las botellas y al mismo tiempo permitir la conexión de las mangueras de biogás de manera segura.

Para ello, se realizaron perforaciones a las tapas y se instalaron a presión unas uniones espigadas de bronce. Adicionalmente, se instalaron dos sellos para el cierre hermético.

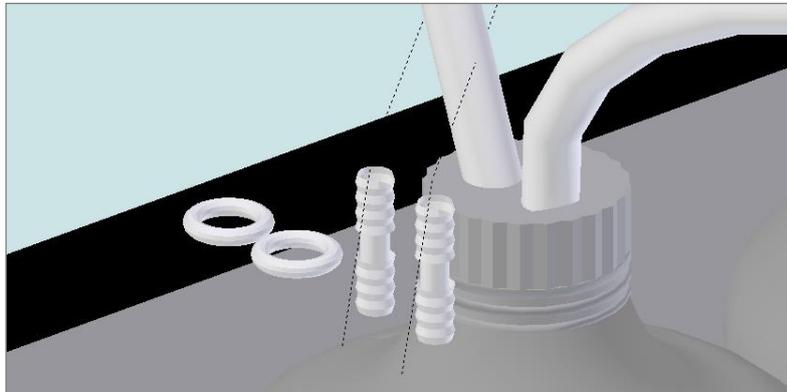


Figura 37. Modificación de tapas herméticas para botellas Schott

Fuente: Elaboración propia.

2.2.2. *Lodos anaerobios.* Los lodos anaerobios (**Figura 38**) utilizados para todas las pruebas experimentales realizadas en el presente trabajo se obtuvieron de un biodigestor operado desde hace un año y medio por el Instituto Superior Tecnológico CEFOP en Cajamarca. Se obtuvieron 32 L de lodos anaerobios.



Figura 38. Obtención de lodos anaerobios del biodigestor del Instituto Superior Tecnológico CEFOP, Cajamarca.

Fuente: Universidad de Piura.

Después del transporte de los lodos anaerobios desde Cajamarca hasta la Universidad de Piura, se detectó una inhibición en los microorganismos anaerobios, a pesar del cuidado en

mantener las condiciones anaerobias mínimas durante el traslado (temperatura mesofílica y hermeticidad). Debido a esto y con el objetivo de reactivar a los lodos anaerobios se realizó una alimentación en base a aceite vegetal y estiércol equino. Al cabo de unos días se detectó producción de biogás por lo que la reactivación de los microorganismos anaerobios fue realizada con éxito.

Para el almacenamiento de los lodos anaerobios y su conservación se utilizó un reactor acondicionado para garantizar la hermeticidad, temperatura mesofílica y facilidad para alimentación y extracción de lodos (**Figura 39**). Los lodos anaerobios se almacenaron en este reactor anaerobio hasta su posterior utilización en el ensayo BMP y ensayo semicontinuo.



Figura 39. Reactor de almacenamiento de lodos anaerobios.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.3. *Cáscaras de cacao.* Las cáscaras de cacao utilizadas para todas las pruebas experimentales realizadas en el presente trabajo se obtuvieron de diferentes granjas de

productores de cacao en Morropón, Piura. Luego de su recolección, las cáscaras de cacao fueron picadas en partículas menores a 5 mm (**Figura 40**) y conservadas en refrigeración a 3°C dentro de bolsas de sellado hermético (**Figura 41**) para prevenir su oxidación por contacto con el aire. El tiempo máximo de conservación fue de 3 semanas.

Para la carga o alimentación inicial de los reactores, la cáscara de cacao almacenada fue licuada hasta obtener una masa homogénea y con partículas de tamaño menor a 1 mm para facilitar la hidrólisis de los sustratos.



Figura 40. Muestras de cacao utilizadas en el presente trabajo.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 41. Cáscaras de cacao picadas y dentro de bolsa hermética para su almacenamiento.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.4. **Preparación de reactores.** Para la preparación de los reactores para el ensayo BMP, la normativa alemana VDI 4630 recomienda que la relación de sólidos orgánicos del sustrato y el inóculo sea menor a 0.5.

$$\frac{oTS_{\text{sustrato}}}{oTS_{\text{inóculo}}} \leq 0.5$$

Siguiendo dicha recomendación, y de acuerdo con los resultados de sólidos totales y volátiles efectuados y cuyos resultados se presentan en la **Tabla 10**, la mezcla de inóculo y cáscara de cacao a ser utilizada para la carga inicial del ensayo BMP debía tener las proporciones y cantidades descritas en la **Tabla 11**.

Se prepararon 3 reactores para el ensayo BMP de las cáscaras de cacao, siguiendo el procedimiento de preparación de ensayo BMP descrito en el apéndice B.

Tabla 10. Resultados de análisis de sólidos totales y sólidos volátiles realizados a la cáscara de cacao y al inóculo.

	Sólidos totales %	Sólidos volátiles %TS	Sólidos volátiles %
Cáscaras de cacao	13.09 %	85.03 %TS	11.13 %
Inóculo	02.20 %	70.08 %TS	1.54 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Cantidades para la preparación de reactores BMP. Fuente: Elaboración propia.

	Sólidos totales (g)	Sólidos volátiles (g)	Masa (g)
Inóculo	19.80 g	13.86 g	900.00 g
Cáscaras de cacao	8.15 g	6.93 g	62.26 g

Fuente: Elaboración propia.

De los tres reactores preparados, dos fueron utilizados para determinar la producción de metano y uno para determinar la producción de biogás. Adicionalmente se prepararon 2 reactores con sólo inóculo que sirvieron como *blancos analíticos* del ensayo BMP y dos reactores con celulosa microcristalina como sustrato de referencia.

2.2.5. **Análisis y ensayos.** Se realizaron análisis de sólidos totales y sólidos volátiles a muestras de cada reactor BMP preparado, al inicio y al final del ensayo BMP. Para la realización de dichos análisis se siguieron los procedimientos descritos en el apéndice A. También se hicieron ensayos de determinación de demanda química de oxígeno (COD) a cada reactor.

2.3. Ensayo semicontinuo de digestión anaerobia. Con el objetivo de realizar un estudio del potencial de generación de biogás y biofertilizante a partir de la cáscara de cacao, se realizó una prueba de digestión anaeróbica semicontinua en un reactor de parámetros controlados. A continuación, se describen los procedimientos, métodos y material utilizado.

2.3.1. Reactor semicontinuo. Para la prueba de digestión anaeróbica semicontinua se utilizó un reactor de laboratorio, diseñado e implementado en la Universidad de Piura. En la **Tabla 12** se mencionan sus características principales.

Tabla 12. Características principales del reactor utilizado.

	Valor	Notas adicionales
Volumen total	70 litros	60 Litros efectivos.
Material	Polietileno de alta densidad - HDPE	
Temperatura	Controlada.	Se trabajó en el rango mesofílico: 37 ± 0.1 °C,
Agitación	Mecánica mediante paletas. Velocidad regulable	
Presión	Manómetro y por sensor de presión.	
pH	En línea utilizando un electrodo HANNAH HI-1006-3205.	Mediciones fuera de línea usando un equipo de medición de pH modelo OAKTON ION 700
Composición de biogás	Medición de CH_4 , CO_2 y H_2S .	
Monitoreo	Sistema SCADA Local y Web	

Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.1. Control de temperatura. Para mantener la temperatura del digestato del interior del reactor en el valor deseado (37°C), se utilizó un sistema de calentamiento del tipo enchaquetado, que consiste en el flujo de un líquido caliente (agua) a través de un ducto que envuelve en las paredes del reactor. Ese líquido es calentado en un tanque externo por medio de un calentador de resistencia (*heater*) de potencia regulable y una bomba se encarga de mantenerlo en circulación continua. En la **Figura 42** se puede apreciar un esquema del sistema de calentamiento.

Para la medición de temperatura, se utilizaron sensores RTD (*resistance temperature detectors*) del tipo Pt100 (**Figura 43**). Para proteger los sensores de la corrosión y acumulación de sedimentos que impidan una correcta medición, se instaló un termopozo de acero inoxidable en el reactor.

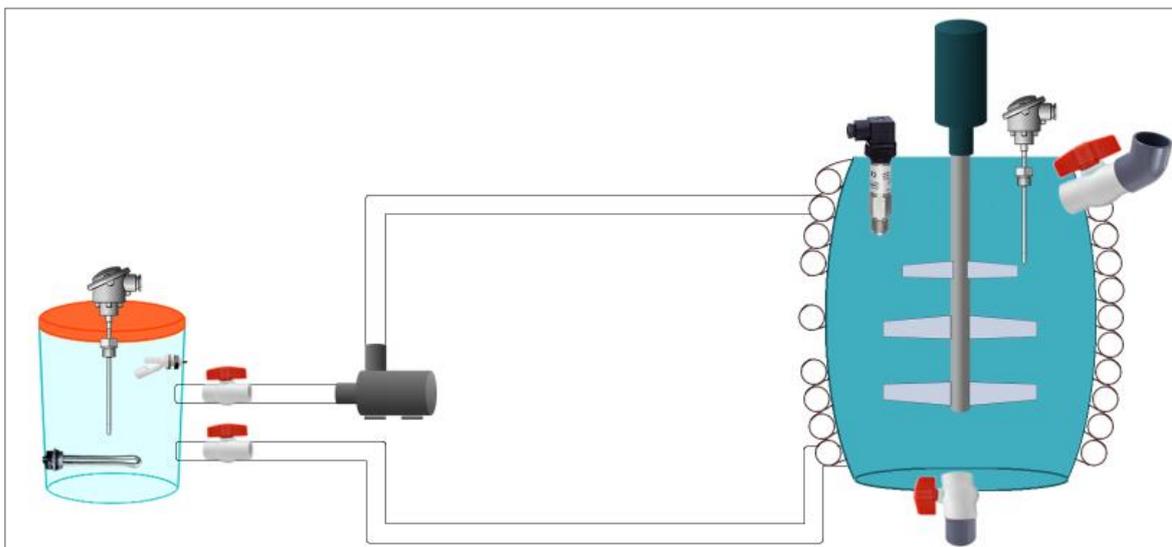


Figura 42. Esquema de sistema de calentamiento de reactor anaerobio semicontinuo.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 43. Sensor RTD - Pt100 utilizado.

Fuente: *RS Components LTD.*

El calor requerido por el sistema puede determinarse a partir de la masa a calentar, el calor específico y la variación de temperatura deseada.

$$Q = m \cdot c_e \cdot (T_f - T_i)$$

Asumiendo una masa de 60 kg de agua, una variación de temperatura de 20 °C (desde 25 °C hasta 45 °C) y conociendo que el calor específico del agua es 4.186 kJ/kg.K, se determina que el calor requerido es de aproximadamente 5 kJ.

Para lograr dicho calentamiento en una hora, se requiere una potencia de 1.39 kW. A partir de este cálculo se decidió utilizar una resistencia de 2 kW.

Para el control de potencia del calentador de resistencia se diseñó e implementó un regulador de voltaje por ángulo de disparo de un TRIAC. El funcionamiento de este regulador se basa en el control del inicio de conducción eléctrica (disparo) de un TRIAC en serie con la carga cuya potencia va a ser controlada. Mientras más se retarda el inicio de la conducción, el valor eficaz de la tensión de salida (V_{rms}) es menor. En la **Figura 44** se muestra la salida normalizada (voltaje eficaz) del regulador en relación con el ángulo de disparo.

La potencia disipada en una resistencia es:

$$P_{Resist} = V_{rms}^2 * R = 2 \text{ kW}$$

Mediante ensayos experimentales, se determinó que se requería regular dicha potencia entre el 10% y el 60% del valor total. Para ello se requiere un V_{rms} normalizado entre 0.31 y 0.78 respectivamente, a los que les corresponde, aproximadamente, un valor de ángulo de disparo entre 130° y 80°.

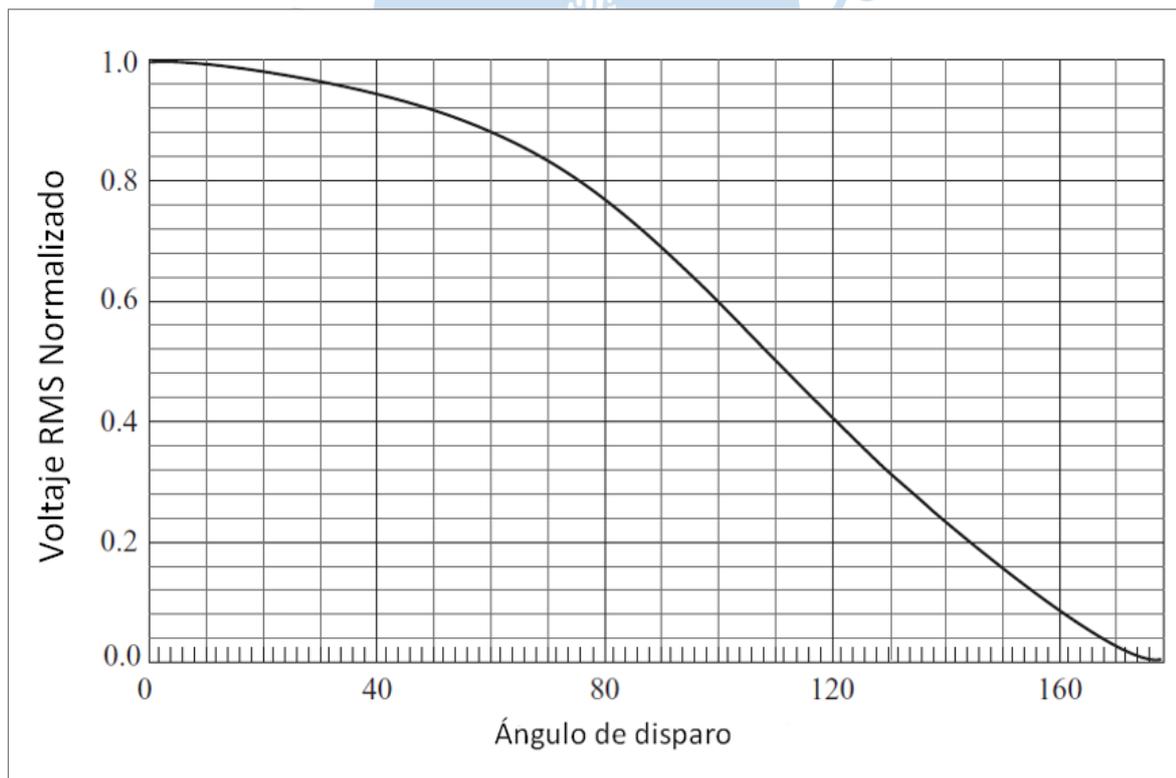


Figura 44. Salida normalizada de un regulador por ángulo de disparo - monofásico.

Fuente. Adaptado del libro "Power Electronics" (Hart, 2011).

En la **Figura 45** y la **Figura 46** se muestran los esquemas eléctricos de tanto la etapa de detección de paso por cero y la etapa de disparo del TRIAC del regulador de voltaje por ángulo de disparo. El circuito completo se aprecia en la **Figura 47**, donde se puede apreciar el microcontrolador utilizado (Arduino Nano) y el TRIAC acoplado a un disipador para evitar sobrecalentamientos.

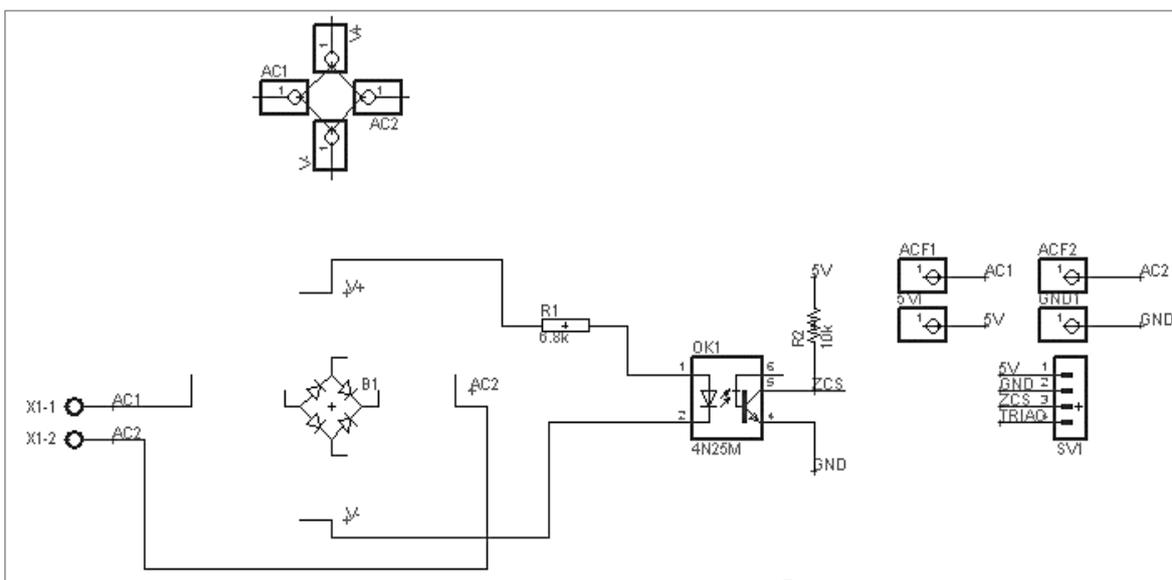


Figura 45. Circuito de detección de paso por cero (*zero crossing detector*) para el regulador de voltaje por ángulo de disparo.

Fuente: Universidad de Piura.

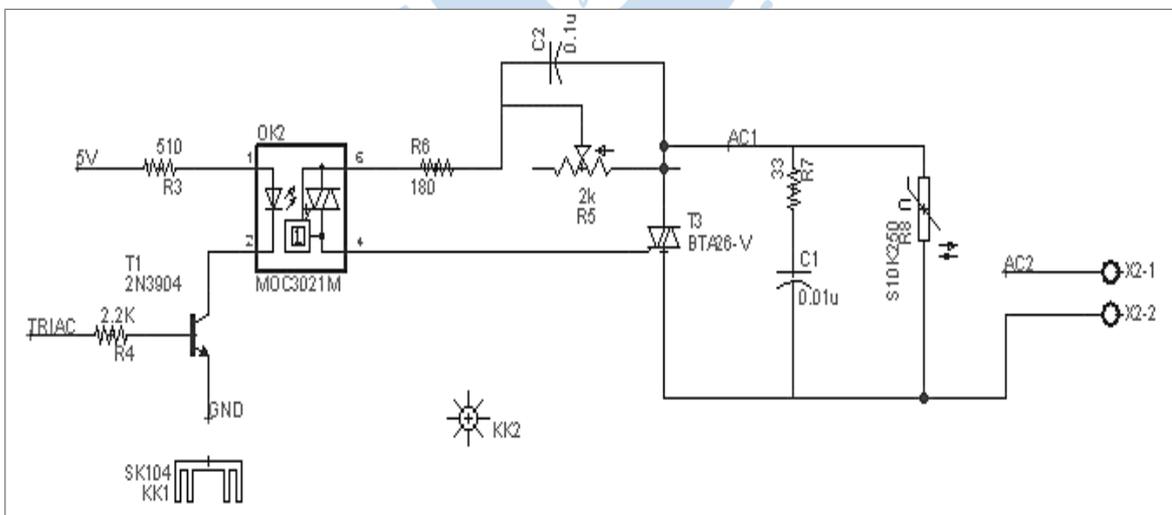


Figura 46. Etapa de potencia del regulador de voltaje por ángulo de disparo.

Fuente: Universidad de Piura.

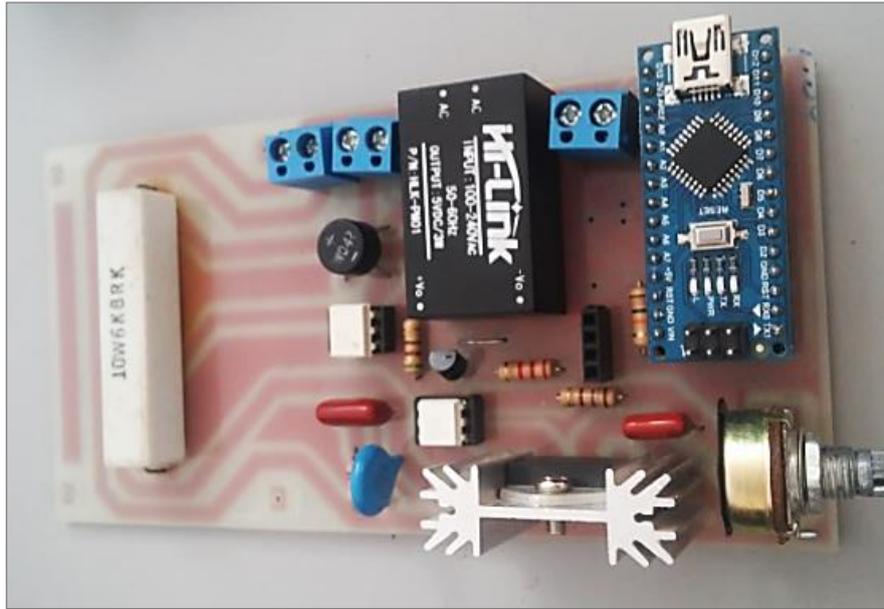


Figura 47. Regulador de voltaje por ángulo de disparo para *heater*.

Fuente: Universidad de Piura.

Para el sistema de control, se evaluaron dos estrategias de control. La primera consistía en la utilización de un controlador PI que se encargara de regular la potencia del calentador de resistencia para mantener la temperatura del reactor en 37 °C. El esquema de control se muestra en la **Figura 48**.

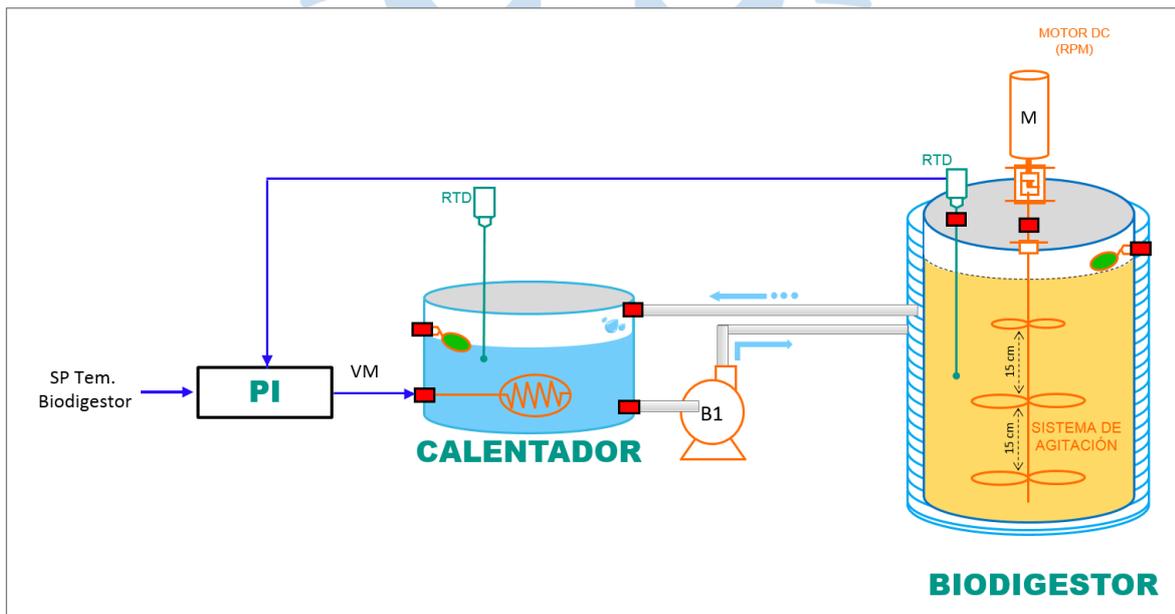


Figura 48. Esquema de estrategia de control de temperatura usando controlador PI.

Fuente: Universidad de Piura.

Sin embargo, debido a la lenta respuesta dinámica del sistema, i.e. constante de tiempo relativamente alta, el comportamiento del controlador ante rechazo de disturbios era muy lento y presentaba una sobreoscilación (*overshoot*) en la salida (temperatura del reactor). Esto no es deseable en el sistema debido a la sensibilidad de los microorganismos a los cambios de temperatura, en especial al inicio del experimento cuando aún no se han adaptado totalmente a las condiciones de operación del reactor.

Con el objetivo de mejorar la respuesta dinámica del sistema, se utilizó un control PI en cascada. El control en cascada emplea dos controladores, uno en serie con el otro, donde el lazo externo monitorea la temperatura del biodigestor y calcula una temperatura deseada para el lazo interno (temperatura del tanque de agua). El lazo interno recibe el valor de temperatura deseado en el agua del tanque que fue calculado por el controlador externo y regula la potencia del calentador de resistencia con el objetivo de alcanzar la temperatura deseada. Este sistema de control, si bien es cierto es más complejo de implementar en comparación al control PI anteriormente explicado, posee la ventaja de tener una respuesta mucho más rápida y con menor sobreoscilación en la temperatura del reactor. El esquema de control PI cascada utilizado se muestra en la **Figura 49**.

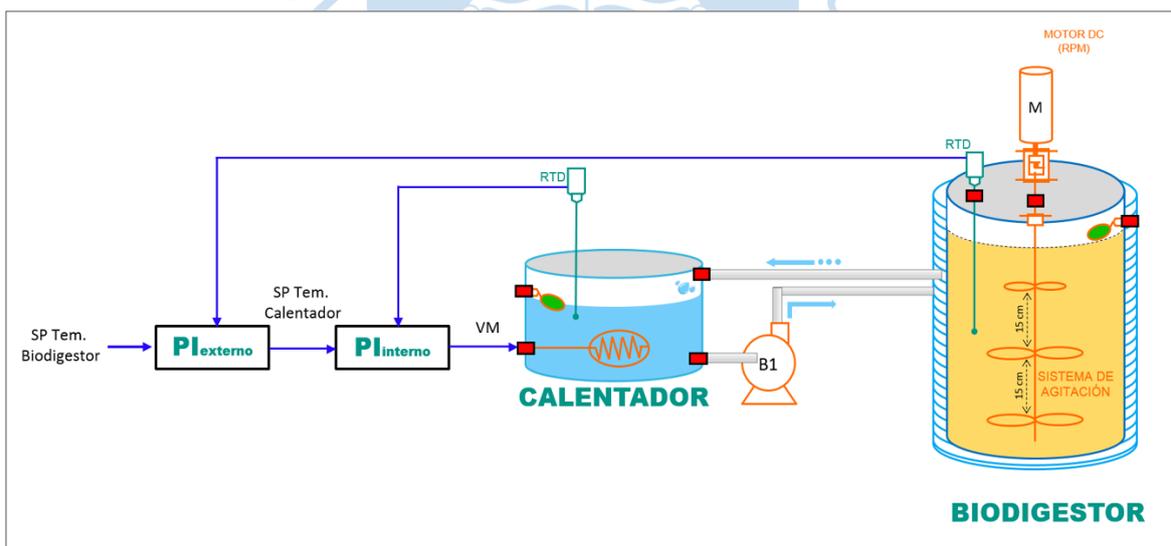


Figura 49. Esquema de estrategia de control de temperatura usando controlador PI en cascada.

Fuente: Universidad de Piura.

Para la sintonización del PI Cascada, se realizó una aproximación a función de transferencia de primer orden para ambos sistemas. Para ello se registró la respuesta a entrada escalón del sistema *heater-tanque* y *tanque-reactor* (**Figura 50** y **Figura 51**).

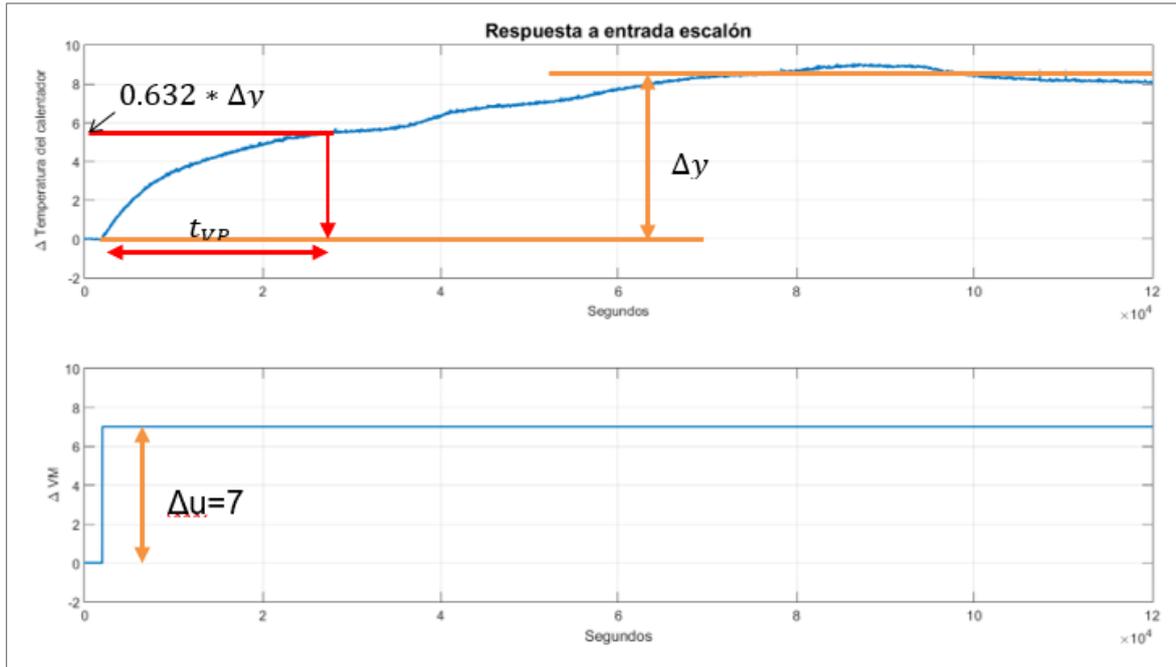


Figura 50. Respuesta del sistema *heater - tanque de agua* a entrada escalón.

Fuente: Universidad de Piura

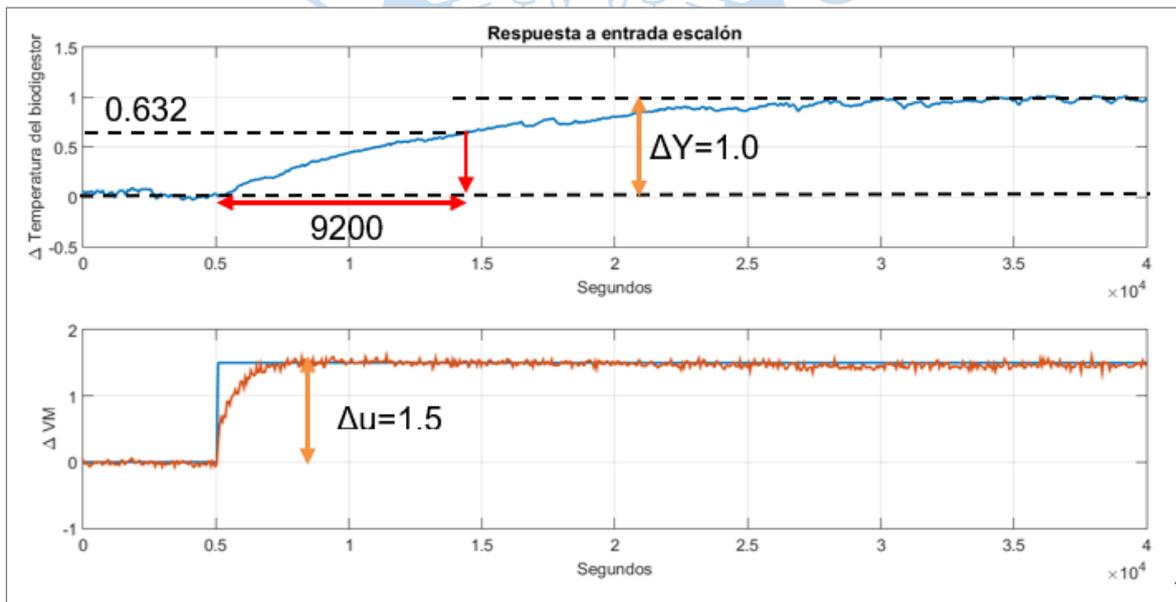


Figura 51. Respuesta del sistema de calentamiento a entrada escalón.

Fuente: Universidad de Piura

Obteniéndose las siguientes funciones de transferencia.

$$T(s) = \frac{1.25}{26500s + 1}$$

$$P(s) = \frac{0.67}{9200s + 1}$$

Finalmente, los valores de K_p y T_i utilizados en el lazo interno fueron:

$$K_p = 15.2$$

$$T_i = 5035 \text{ segundos}$$

Y para el lazo externo:

$$K_p = 7.5$$

$$T_i = 5111 \text{ segundos}$$

Para la validación de la sintonización se realizó una prueba experimental cuyos resultados pueden apreciarse en la **Figura 52**. Se puede comprobar que la temperatura se mantuvo próxima al valor de referencia o *setpoint* tanto para el reactor como para el tanque de agua del sistema de calentamiento.

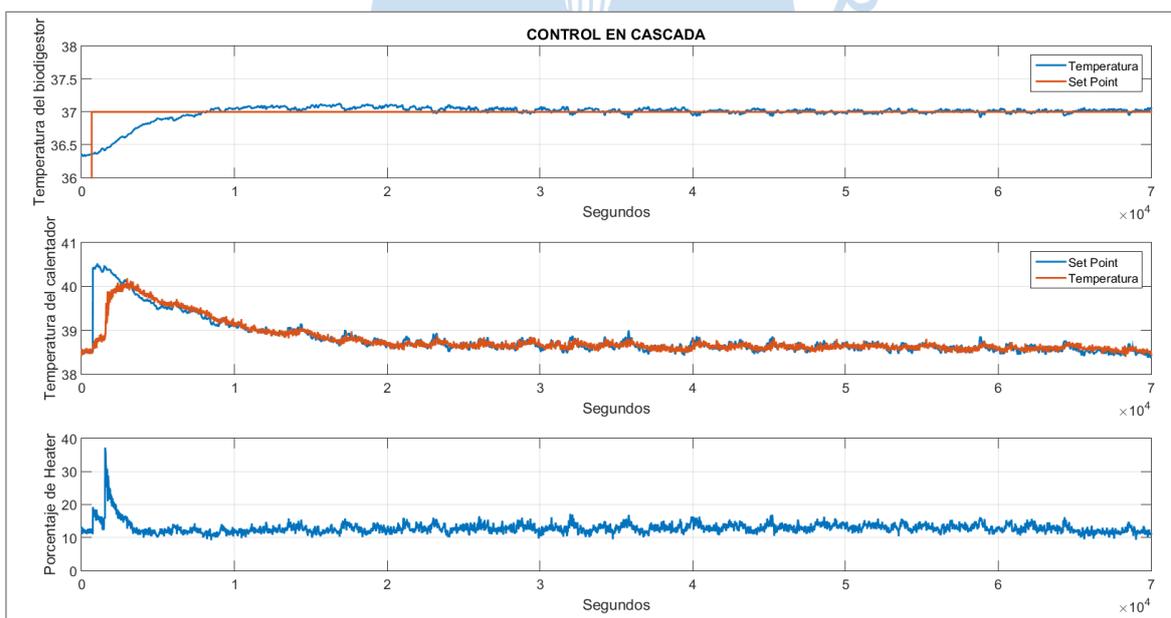


Figura 52. Prueba experimental de validación de sintonización PI Cascada

Fuente: Universidad de Piura.

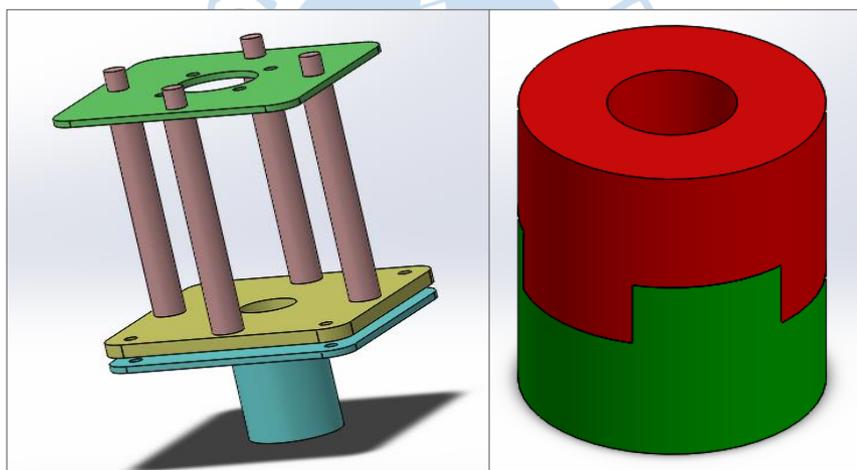
2.3.1.2. Sistema de agitación. Para garantizar una mezcla homogénea al interior del reactor anaerobio, se utilizó un agitador con tres paletas. Este agitador era movido por medio de un motor DC de 30 W cuyos datos se pueden encontrar en **Tabla 13**.

Tabla 13. Datos del motor del agitador mecánico.

Característica	Valor
Potencia mecánica de salida	30 W
Velocidad nominal	33 rpm
Torque nominal	82.6 kg.cm
Torque a rotor bloqueado	558 kg.cm
Voltaje nominal	24 V _{DC}
Corriente nominal	2.2 A _{DC}
Corriente a rotor bloqueado	10.8 A _{DC}

Fuente: Elaboración propia.

Para acoplar dicho motor con el agitador y poder sostener la estructura, se diseñó un mecanismo de acople y soporte, mostrados en la **Figura 53**. El soporte fue fabricado de acero inoxidable y el acople en plástico ABS, utilizando la impresora 3D de la Universidad de Piura. El motor puede apreciarse en la **Figura 54**.

**Figura 53.** Modelado en SolidWorks de soporte y acople para agitador.

Fuente: Universidad de Piura.

**Figura 54.** Motor de 30 W utilizado.

Fuente: Universidad de Piura.

2.3.1.3. *Presión.* La presión es un parámetro importante desde el punto de vista de seguridad del biodigestor y fue medida por medio de un manómetro analógico (**Figura 55**) y un sensor de presión digital (**Figura 56**).

La máxima presión registrada durante el experimento fue de 6 kPa (60 mbar) y la presión media fue de 2.5 kPa (25 mbar). Debido a esto se utilizó un manómetro de 0 a 32 pulgadas de agua, equivalentes a 0-8 kPa (0-80 mbar), para tener una buena resolución en las mediciones, importantes para la determinación de la producción de biogás y metano en condiciones estándar de presión y temperatura.



Figura 55. Manómetro analógico utilizado para la medición de presión al interior del reactor.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 56. Manómetro digital para monitoreo remoto de presión del reactor.

Fuente: Indiamart

2.3.1.4. *Monitoreo de pH.* Para la medición de pH en línea se utilizó un electrodo HANNA HI 1006-32 (**Figura 57**) y se implementó un sistema auxiliar de recirculación de digestato (**Figura 58**). Este sistema consiste en una línea de recirculación de digestato, el cual era impulsado por una bomba y con dos válvulas para poder aislarlo del reactor. En esta línea se instaló el electrodo de pH mediante un acople en Y fabricado en teflón. Al estar en constante recirculación, el pH medido por el electrodo era de digestato fresco y representativo del interior del reactor anaerobio. Además, la recirculación permitía un mezclado adicional del digestato.



Figura 57. Electrodo HI 1006-32 para medición de pH en línea.

Fuente: HANNA Instruments

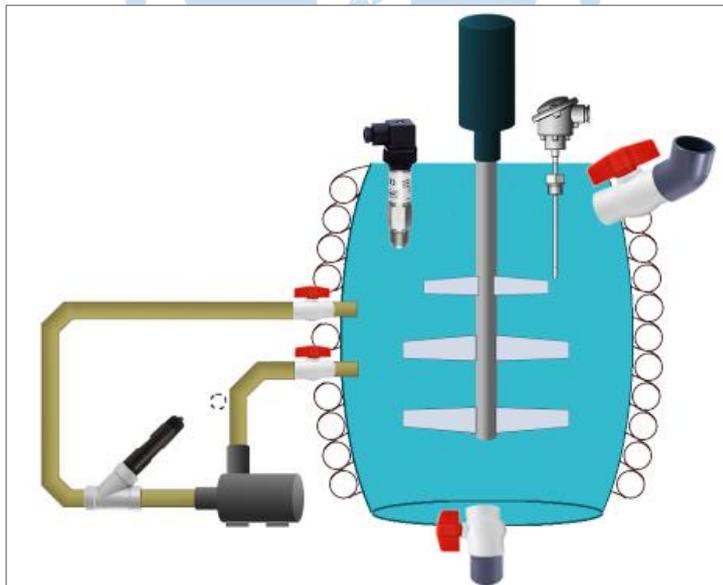


Figura 58. Esquema del circuito de recirculación y medición de pH en línea.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.5. *Monitoreo de composición de biogás.* Para el monitoreo de la calidad de biogás en línea se utilizaron los sensores IR15TT-R y EC4-1000-H2S.

- El IR15TT-R es un sensor infrarrojo, especial para aplicaciones de biogás, capaz de detectar porcentajes de metano y dióxido de carbono en simultáneo mediante el sistema de medición de doble canal.
- El EC4-1000-H2S es un sensor electroquímico para la detección de 0 a 1000 ppm de H₂S.

Ambos sensores poseen una tarjeta de evaluación (*evaluation kit*) que sirve como interfaz entre el sensor y una PC.



Figura 59. Sensores IR15TT-R y EC4-1000-H2S para medición de contenido de metano y dióxido de carbono; y H₂S respectivamente.

Fuente: SGX Sensortech

2.3.1.6. *Sistema SCADA.* Todos los parámetros medidos y controlados podían ser monitoreados de forma remota mediante el uso de una interfaz SCADA (**Figura 60**) desarrollada para el reactor anaerobio. Esta interfaz fue desarrollada por el laboratorio de Sistemas Automáticos y de Control de la Universidad de Piura.

Adicionalmente, para verificar la hermeticidad del reactor, se realizó una prueba previa cargándolo con aire comprimido y verificando la ausencia de fugas en el reactor. Un esquema completo, en donde se aprecia el reactor anaerobio y los sistemas adicionales utilizados para el control y monitoreo de parámetros puede apreciarse en la **Figura 61**.

expuesto a una mezcla de gases de composición conocida. Los gases de calibración utilizados se pueden apreciar en la **Tabla 14**.

Tabla 14. Mezcla de gases de calibración utilizados.

	Canal 1: Metano	Canal 2: Dióxido de carbono
Cero (referencia)	Nitrógeno N ₂	
Rango (<i>span</i>)	CH ₄ 50% - N ₂ 50%	CO ₂ 40% - N ₂ 60%

Fuente: Elaboración propia.

Para la calibración del sensor de pH en línea se utilizó el método de calibración por sustancias *buffer* de dos puntos. Se utilizaron las soluciones *buffer* de 4.01 y 7.01 pH de HANNA. Para la medición de pH fuera de línea se utilizó el equipo OAKTON ION 700 (**Figura 62**), el cual fue calibrado mediante calibración de 3 puntos con sustancias *buffer* 4.01, 7.01 y 10.01 de HANNA (**Figura 63**).

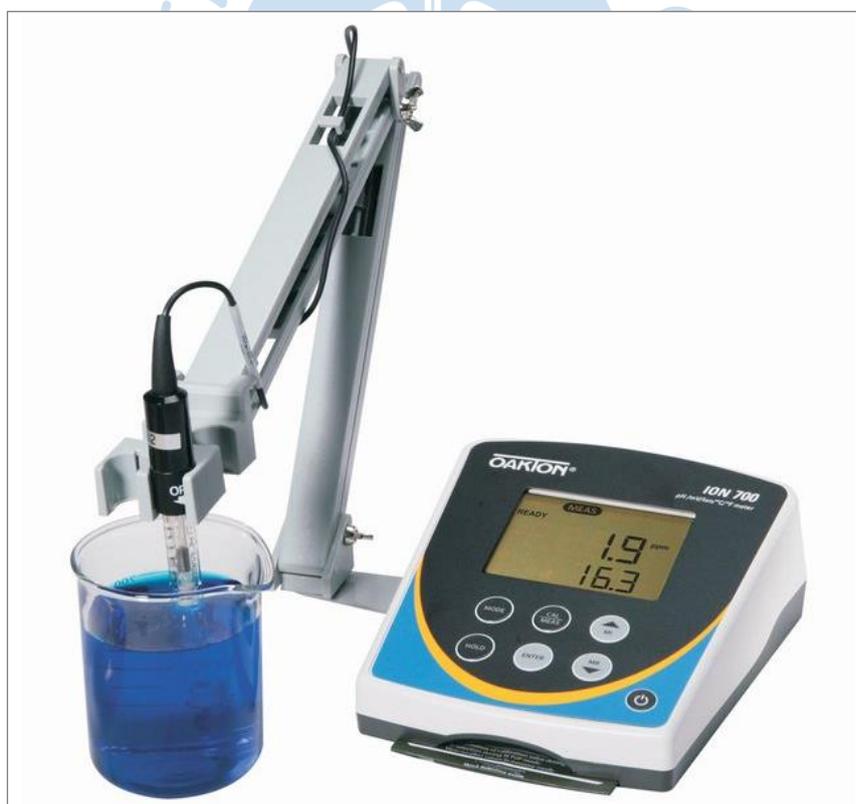


Figura 62. Equipo OAKTON ION 700 utilizado para medición de pH fuera de línea.

Fuente: OAKTON.



Figura 63. Soluciones *buffer* para calibración de electrodos de pH.

Fuente HANNA.

2.3.3. *Inóculo e inoculación.* El inóculo utilizado en la prueba de biodigestión semicontinua fue tomado del reactor de almacenamiento de lodos anaerobios descrito en el apartado 3.2.2.2.

Para la inoculación se preparó una mezcla de 60 litros de inóculo, agua y estiércol vacuno de acuerdo a las proporciones indicadas en la **Tabla 15**.

Tabla 15. Proporciones de mezcla preparada para inoculación.

	Volumen	Porcentaje
Inóculo	12 L	20%
Agua	38.1 L	63.5%
Estiércol vacuno	9.9 L	16.5%

Fuente: Elaboración propia.

La mezcla fue cargada al interior del reactor semicontinuo donde se tomaron mediciones de pH diarias hasta obtener una medición de pH estable.

La etapa de inoculación tuvo una duración de dos semanas, luego de las cuales la producción de biogás fue nula y el valor de pH fue de 6.85.

2.3.4. **Biomasa.** De manera similar a la cáscara de cacao utilizada en el ensayo BMP, la cáscara de cacao a utilizar en el ensayo semicontinuo (**Figura 64**) fue obtenida de diferentes granjas de productores de cacao en Morropón, Piura. Luego de su recolección, las cáscaras de cacao fueron picadas en partículas menores a 5 mm y conservadas en refrigeración a 3°C dentro de bolsas de sellado hermético para prevenir su oxidación por contacto con el aire (**Figura 65**). El tiempo máximo de conservación fue de 3 semanas.

La caracterización de la biomasa fue realizada por medio de su contenido de sólidos totales y sólidos volátiles (TS y VS). Para hallar estos valores se realizaron análisis de DM y oDM (TS y VS respectivamente) a la cáscara de cacao.

Para la alimentación, se utilizó la cáscara previamente picada, la cual fue pesada de acuerdo con la carga orgánica diaria requerida y licuada con digestato tomado del mismo reactor semicontinuo hasta obtener una masa semi homogénea (**Figura 66**).



Figura 64. Cacao recolectado en Morropón, Piura.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 65. Cáscara de cacao picada y dentro de bolsa hermética.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 66. Pesado y licuado de la mezcla para alimentación de biodigestor semicontinuo.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.5. Carga orgánica diaria. La cantidad de biomasa cargada diariamente al reactor fue determinada siguiendo las recomendaciones de la normativa alemana para fermentación anaeróbica VDI 4630. Esta normativa sugiere iniciar la carga con 0.5 gramos de sólidos volátiles por litro de volumen efectivo del reactor por día, incrementando en pasos de 0.5

cuando la carga anterior alcance la estabilidad, hasta llegar a la carga orgánica final deseada o hasta que el proceso empiece a mostrar signos de inestabilidad (**Figura 67**).

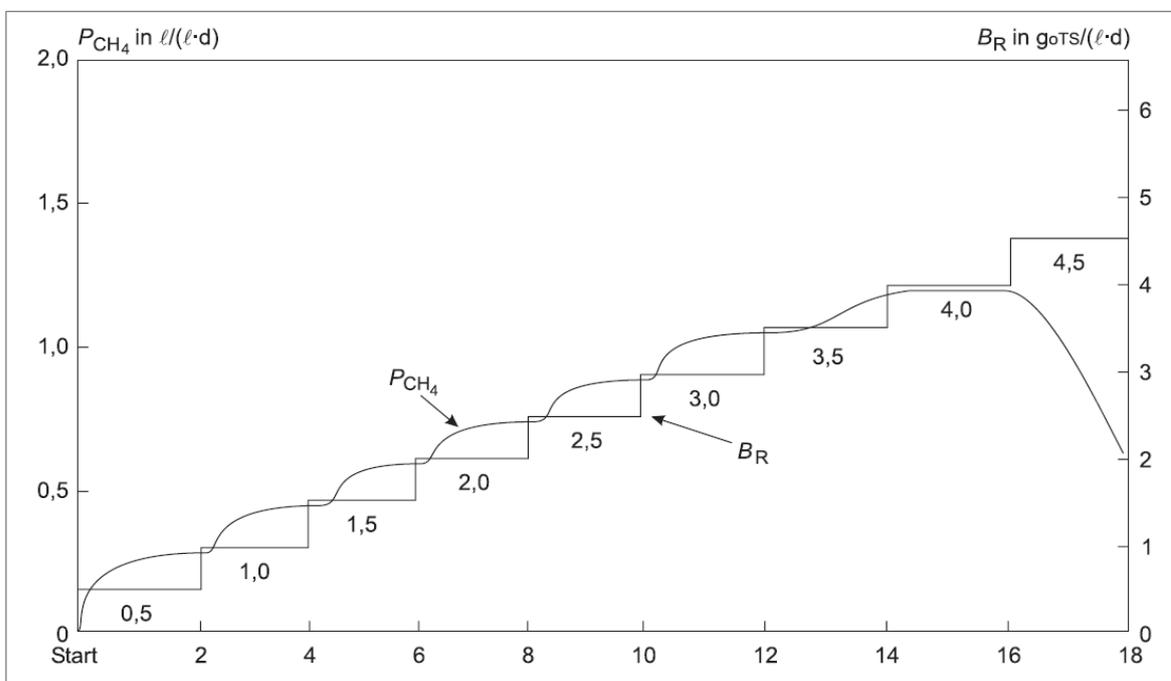


Figura 67. Gráfica de carga orgánica diaria para un experimento continuo o semicontinuo.

Fuente: Tomado de normativa VDI 4630 (VDI, 2006).

El contenido promedio de sólidos volátiles de la cáscara de cacao analizada fue de $11.11 \pm 0.2 \%$. Se calculó el equivalente de 0.5 gramos de OLR en kilogramos de cacao siguiendo la fórmula que se muestra a continuación:

$$M_{\text{cacao}} = \frac{\text{OLR} * V_{\text{efectivo}}}{\text{SV}_{\text{cacao}}}$$

$$M_{\text{cacao}} = \frac{0.5 \frac{\text{g}_{\text{vs}}}{\text{L} * \text{día}} * 60 \text{ L}}{0.111 \frac{\text{kg}_{\text{vs}}}{\text{kg}_{\text{cacao}}}}$$

$$M_{\text{cacao}} = 272 \text{ g}_{\text{cacao}}$$

En la **Tabla 16** se muestra la equivalencia en gramos de cáscara de cacao para distintos valores de carga orgánica diaria (OLR), calculados usando un contenido de sólidos volátiles de 11.1%.

Tabla 16. Equivalencias en gramos de cáscara de cacao para distintos valores de carga orgánica diaria.

Carga orgánica (OLR)	Masa de cáscara de cacao
0.5 g VS L ⁻¹	270 gramos
1.0 g VS L ⁻¹	540 gramos
1.5 g VS L ⁻¹	810 gramos
2.0 g VS L ⁻¹	1080 gramos
2.5 g VS L ⁻¹	1350 gramos
3.0 g VS L ⁻¹	1620 gramos

Fuente: Elaboración propia.

2.3.6. **Muestreo y análisis.** Durante la fase de alimentación y con el objetivo de estudiar la evolución y estado del proceso de digestión anaeróbica semicontinua, se tomaron muestras diarias para realizar análisis y medición de pH, ORP (potencial redox), temperatura, TS-VS (sólidos totales y sólidos volátiles), NH₃-N (nitrógeno amoniacal) y COD (demanda química de oxígeno). Para la toma de muestras se siguió el cronograma que se describe en la **Tabla 17**. Antes del muestreo, se agitó por al menos 10 minutos el reactor para garantizar una mezcla homogénea.

Tabla 17. Cronograma de muestreo y análisis de digestato de reactor semicontinuo

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo	Cantidad
pH	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	300 ml
ORP	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Temp	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
TS / VS		✓		✓		✓		2x50 ml
NH ₃ -N	✓		✓		✓			500 ml
COD						✓		500 ml

Fuente: Elaboración propia.

En el caso del nivel de pH, temperatura y ORP, la medición fue realizada inmediatamente después de haber tomado la muestra. En la **Figura 68** se puede apreciar el electrodo del equipo OAKTON ION 700 sumergido en la muestra de digestato.

Para las muestras de NH₃-N, TS-VS y COD se realizó un mezclado usando un agitador magnético para homogenizar aún más la muestra, tal como se puede apreciar en la **Figura 69**. Esto debido a que se observó que los sólidos en suspensión de la muestra mostraban una tendencia a precipitar rápidamente, afectando los resultados de los análisis de sólidos totales y sólidos volátiles. En la **Figura 70** se pueden observar dos muestras de aproximadamente 60 mL para el análisis de TS-VS.



Figura 68. Medición (fuera de línea) de pH, ORP y temperatura usando electrodo ION 700.

Fuente: Elaboración propia.

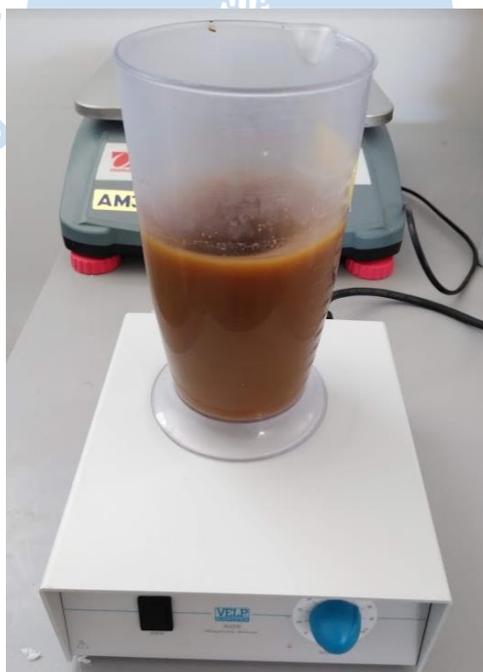


Figura 69. Agitación para homogenización de la muestra utilizando un agitador magnético de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

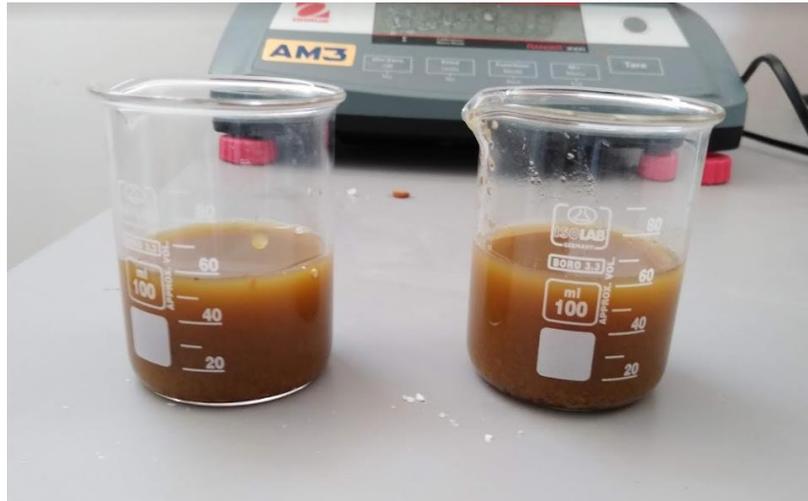


Figura 70. Muestras para análisis de sólidos totales y sólidos volátiles.
Fuente: Elaboración propia.

Para los análisis de nitrógeno amoniacal y demanda química de oxígeno, las muestras fueron conservadas a 3°C luego de ser acidificadas utilizando ácido sulfúrico, de acuerdo con procedimientos estándares. Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura.

2.3.7. Biofertilizante. Finalizado el ensayo de biodigestión semicontinua, la alimentación fue suspendida y se hizo reposar al biodigestor hasta que se obtuvo una producción despreciable de biogás. Se tomaron muestras del efluente del reactor con el objetivo de realizar análisis para determinar su composición y potencial como fertilizante. Los análisis fueron realizados por la Universidad Agraria La Molina, Lima – Perú.

3. Resultados obtenidos

3.1. Degradabilidad de la cáscara de cacao. Del ensayo BMP se obtuvieron las curvas de producción acumulada de biogás y metano mostradas en la **Figura 71**. Durante los primeros 8 días es donde se produce el 87% de la producción final de biogás, hasta alcanzar los 554.6 L kg⁻¹ VS. La forma de la curva indica que no hubo inhibición durante la biodigestión del ensayo BMP. Como valor final de producción de biogás se obtuvieron 638.2 L kg⁻¹ VS con 370.42 kg⁻¹ VS de metano, lo que corresponde a un 58% de contenido de metano.

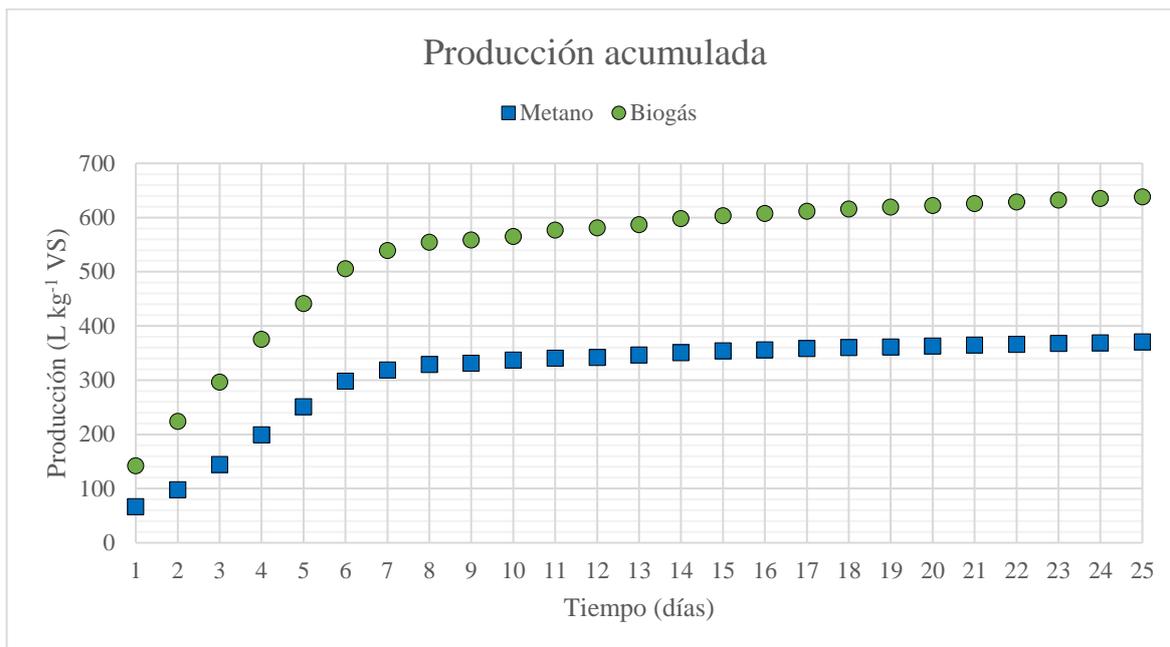


Figura 71. Producción acumulada de biogás y metano. Ensayo BMP Cáscaras de cacao.

Fuente: Elaboración propia, Universidad de Piura.

De los resultados obtenidos se puede concluir que la cáscara de cacao es degradable por medio de biodigestión anaerobia en condiciones de temperatura mesofílica (37°C) y cuando la cáscara de cacao es licuada hasta obtener partículas menores a 1 mm, por lo que se puede clasificar como “Fermentable luego de tratamiento mecánico y homogenización” de acuerdo con normativa VDI 4630. En la **Tabla 18**, se resumen las características de la cáscara de cacao respecto a su consistencia, composición (contenido de TS y VS), fermentabilidad, producción de biogás y metano y clasificación legal.

Tabla 18. Caracterización de la cáscara de cacao como material fermentable según VDI 4630.

Característica	Resultado
Consistencia	Sólido
Sólidos totales	13.1%
Sólidos volátiles	11.13%
Fermentabilidad	Fermentable luego de tratamiento mecánico y homogenización.
Producción de biogás y calidad	638 litros por kilogramo de sólidos volátiles. 58% de contenido de metano.
Clasificación legal ^a	B3060 Residuos resultantes de las industrias agroalimentarias siempre que no sean infecciosos.

^a Decreto Legislativo N° 1278, Ley de gestión integral de residuos sólidos – Perú.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Producción de metano y carga orgánica. La fase de alimentación del ensayo de digestión semicontinua tuvo una duración de 71 días (sin contar las dos semanas de inoculación). En la **Figura 72** se aprecia la carga orgánica diaria al reactor, que se realizó de acuerdo con los criterios y metodología explicada anteriormente. En el día 41 se realizó una suspensión momentánea de la alimentación mientras se preparaba la muestra para análisis de composición química del biol obtenido. La alimentación fue reiniciada el día 50, realizando los cambios de carga orgánica de manera más seguida.

La evolución de la producción diaria de biogás se puede apreciar en la **Figura 73**. Se observa, como es de esperarse, una correlación entre la carga orgánica diaria y la producción de biogás y metano. Una fotografía del volumen de biogás producido durante las últimas fases del ensayo semicontinuo puede apreciarse en la **Figura 74**.

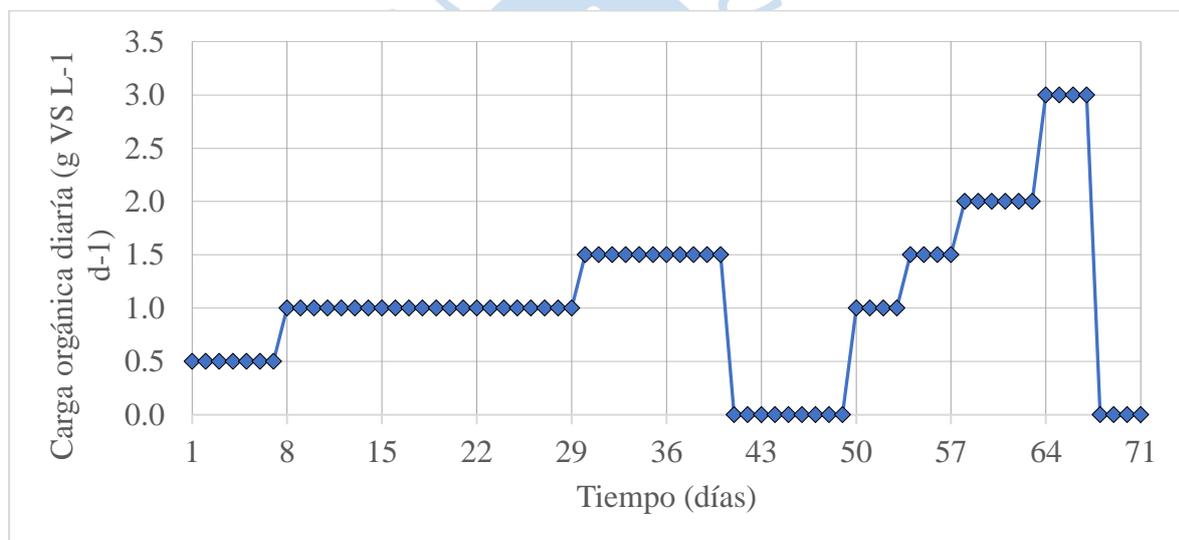


Figura 72. Carga orgánica diaria del biodigestor durante el ensayo semicontinuo.

Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 75** y **Tabla 19**, se muestra la producción de metano y biogás para distintos valores de carga orgánica diaria de alimentación. Se puede apreciar que para cargas orgánicas de 1.5 y $2 \frac{gVS}{Ld}$ la producción de metano es similar, por lo que una carga orgánica ideal para un reactor anaeróbico tipo CSTR de cáscaras de cacao se encuentre alrededor de $2.0 \frac{gVS}{Ld}$.

Un mayor incremento en la carga orgánica incrementa la producción diaria de metano, pero disminuye la producción específica de metano y además puede disminuir la estabilidad del sistema, dificultando la operación del biodigestor.

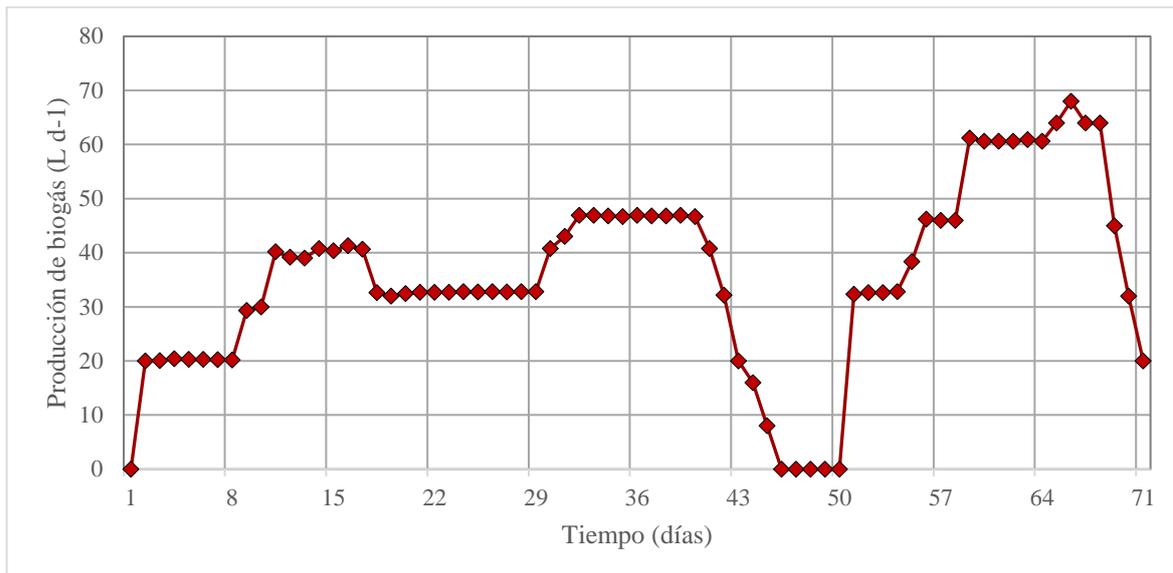


Figura 73. Producción diaria de biogás durante el ensayo semicontinuo.

Fuente: Elaboración propia.



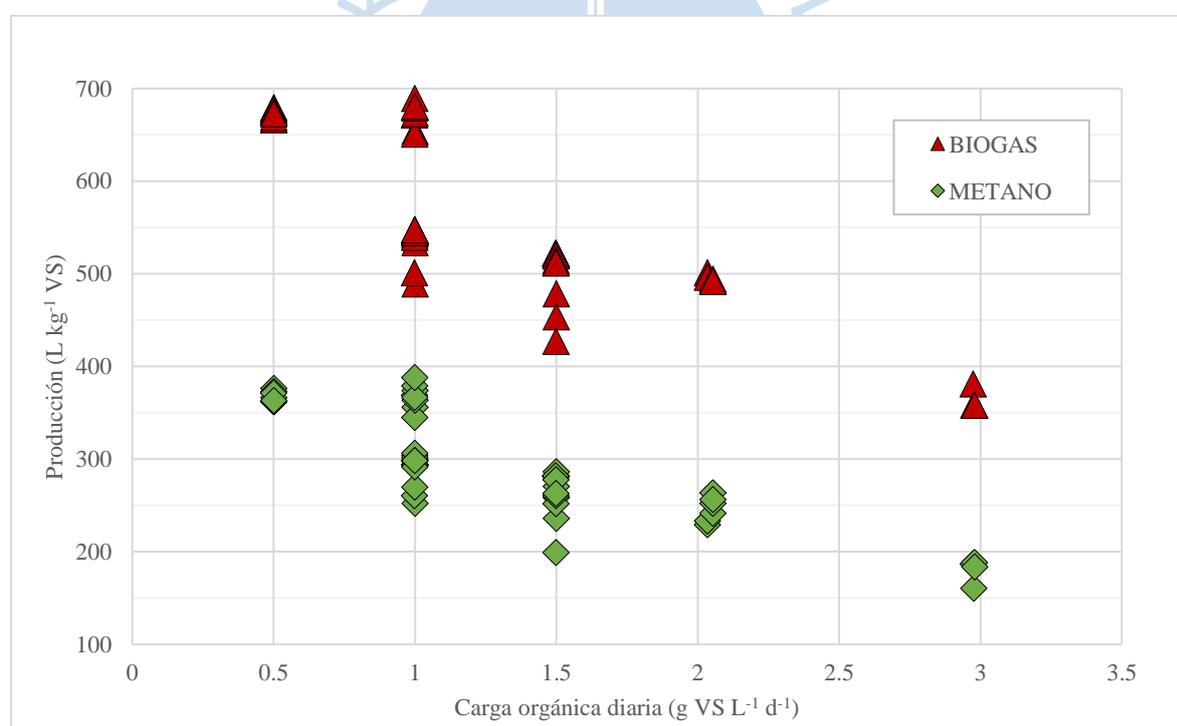
Figura 74. Producción diaria en fase final del ensayo semicontinuo.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Producción de biogás y metano obtenida en distintas fases de alimentación.

Carga Orgánica (OLR)	Producción de Biogás	Producción de Metano
0.5 g VS L ⁻¹ d ⁻¹	673.4 ± 1.8 L kg ⁻¹ VS	367.6 ± 2.2 L kg ⁻¹ VS
1.0 g VS L ⁻¹ d ⁻¹	579.9 ± 12.7 L kg ⁻¹ VS	314.6 ± 7.6 L kg ⁻¹ VS
1.5 g VS L ⁻¹ d ⁻¹	511.1 ± 5.4 L kg ⁻¹ VS	270.9 ± 4 L kg ⁻¹ VS
2.0 g VS L ⁻¹ d ⁻¹	494.5 ± 1.5 L kg ⁻¹ VS	245.9 ± 5.5 L kg ⁻¹ VS
3.0 g VS L ⁻¹ d ⁻¹	363.8 ± 5.7 L kg ⁻¹ VS	179.8 ± 6.5 L kg ⁻¹ VS

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 75.** Relación entre la carga orgánica diaria y la producción de biogás y metano.

Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 20**, se recogen algunos resultados disponibles en la literatura relacionados a la producción de biogás a partir de la cáscara de cacao obtenidos de manera teórica o por medio de ensayos BMP y su comparación con los resultados obtenidos en el presente estudio.

Tabla 20. Comparación entre resultados obtenidos de producción específica de biogás y contenido de metano respecto a otros resultados teóricos y experimentales disponibles en la literatura.

Fuente	Producción de biogás (L kg ⁻¹ VS)	Contenido de metano (%CH ₄)	Aumento producción CH ₄ %
Resultados propios, OLR 2.0 kg VS L ⁻¹ d ⁻¹ OLR	494.5	55	Referencia (0%)
ARCHEA Service GmbH	412	55	+20.02%
Möglichkeiten energetischer Nutzung von Kakaorestmassen in Kleinbetrieben am Beispiel einer peruanischen Kakaopflanzung BMP results	331.5	-	-
Möglichkeiten energetischer Nutzung von Kakaorestmassen in Kleinbetrieben am Beispiel einer peruanischen Kakaopflanzung Theoretical results.	492	50.2	+10.11%
Cocoa residues as viable biomass for renewable energy production through anaerobic digestion (Acosta et al., 2018).	289	60	+56.8%

Fuente: Elaboración propia.

El incremento en la producción de biogás puede explicarse en una mayor estabilidad del reactor, un nivel de pH óptimo respecto a los reportados en la literatura y al control de temperatura implementado, que favoreció el desarrollo de una cultura mixta y adecuada de microorganismos anaerobios adaptados a la degradación de la cáscara de cacao.

3.3. Composición del biogás y biofertilizante. Del ensayo BMP de la cáscara de cacao se determinó que el 58 por ciento de la producción acumulada de biogás era metano y 42 por ciento restante, dióxido de carbono.

En el ensayo semicontinuo, el contenido de metano fue medido de manera diaria y los resultados pueden apreciarse en la **Figura 76**. De estos resultados se puede observar que el contenido de metano del biogás producido no presentó variaciones significativas durante las primeras fases del ensayo, manteniéndose en un rango de 53 a 56 por ciento.

El incremento de la producción de biogás cuando se suspendió la alimentación (día 41) se debe a la existencia aun presente de sustratos para los microorganismos metanogénicos, los cuales siguen produciendo metano aun cuando no entra biomasa fresca al sistema. De los días 46 a 50 no se realizaron mediciones de producción de biogás en tanto era despreciable.

Durante la fase de alimentación rápida, que inició en el día 51, se puede observar un comportamiento oscilatorio en el contenido de metano: Existen caídas en el porcentaje de metano medido que coinciden con los cambios de alimentación, sin embargo, tienden a subir en los días siguientes. A partir del día 68 se termina la alimentación del reactor y el contenido de metano vuelve a crecer debido a la actividad aun presente de los microorganismos metanogénicos.

Se puede concluir que el contenido de metano de la biodigestión del cacao es mayor al 55% para biodigestores estables bajo condiciones mesofílicas de temperatura controlada (37°C) y cuando se somete a la cáscara de cacao a un pre-tratamiento de picado y trituration.

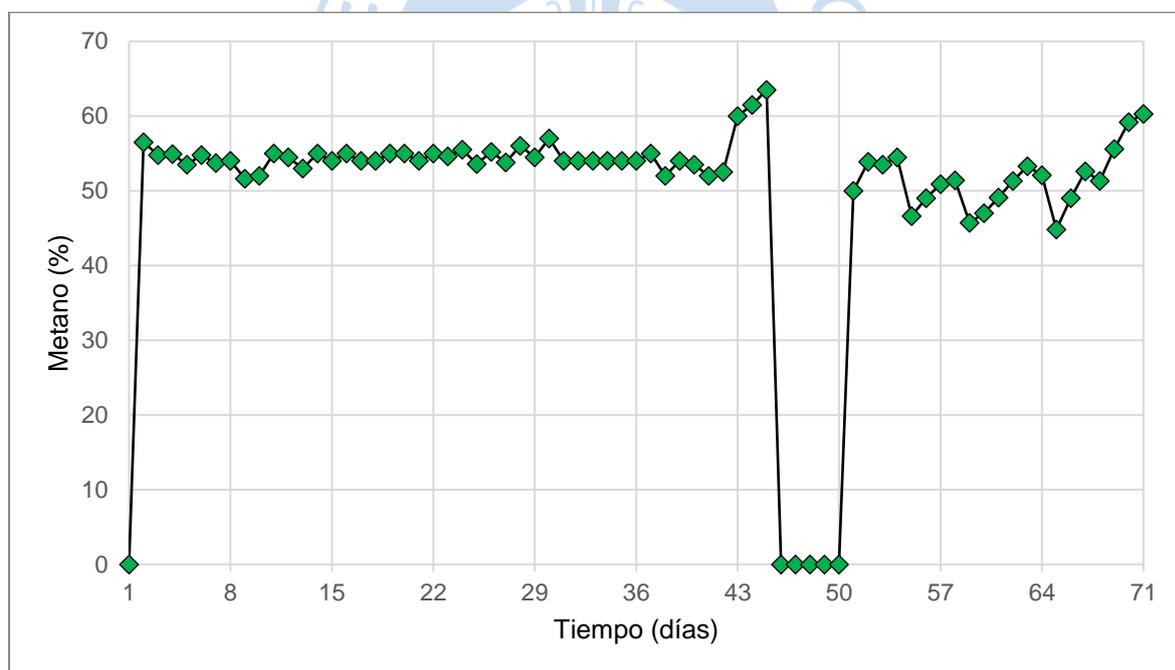


Figura 76. Contenido de metano en volumen obtenido durante el ensayo semicontinuo.

Fuente: Elaboración propia.

El biol obtenido a partir de las cáscaras de cacao fue analizado para la determinación de su composición química. Los resultados obtenidos, así como la composición química de otros bioles de distintos orígenes es mostrada en la **Tabla 21**: El biol obtenido en el presente estudio es el biol 1 y se compara con el biol 2, obtenido de estiércol de vaca; biol 3, obtenido

de estiércol de vaca y desperdicios domésticos; biol 4, obtenido de los desechos del plátano, incluida la fruta, cáscara y hojas y el biol 5, obtenido también de estiércol vacuno. De acuerdo con su composición, se puede ver que la composición de los bioles es muy variable y está fuertemente ligada al origen de la biomasa utilizada para su producción y a los parámetros de funcionamiento del reactor donde se han obtenido. Sin embargo, es posible ver que sus nutrientes son comparables a los bioles de referencia mostrados en la **Tabla 21**. Además, como subproducto del metabolismo de las bacterias partícipes en la biodigestión se obtienen enzimas que promueven el crecimiento de las raíces, hojas y tallo (Aparcana & Jansen, 2008), lo cual vuelve atractiva su aplicación en los cultivos, en reemplazo del proceso de “reincorporación” que actualmente se viene empleando, el cual promueve la proliferación de insectos, malos olores y enfermedades en las plantas y las personas. Se sabe que la utilidad de los fertilizantes depende de la aplicación, para lo cual se tiene en cuenta el contenido de N (nitrógeno), P (fósforo) o K (potasio).

Tabla 21. Comparación de la composición química entre biol obtenido a partir de la cáscara de cacao (Biol 1) y otros cuatro bioles obtenidos de distintas fuentes de biomasa.

	Biol 1	Biol 2	Biol 3	Biol 4	Biol 5
pH	7.3	7.96	8.1	--	6.7-7.9
C.E dS/m	9.6	--	--	--	--
Sólidos totales	14.74 mg/kg	41.8 mg/kg	42 mg/kg	--	14 mg/kg
Sólidos volátiles	5.26 mg/kg	---	--	--	--
Nitrógeno	980 mg/kg	2630 mg/kg	2400 mg/kg	200 mg/kg	900 mg/kg
Fósforo	206.22 mg/kg	430 mg/kg	1010 mg/kg	76 mg/kg	-
Potasio	1332.50 mg/kg	2660 mg/kg	2940 mg/kg	4200 mg/kg	290 mg/kg
Calcio	352.50 mg/kg	1050 mg/kg	500 mg/kg	56 mg/kg	2100 mg/kg
Magnesio	329.50 mg/kg	380 mg/kg	--	131 mg/kg	0.135%
Sodio	237.50 mg/kg	404 mg/kg	--	2100 mg/kg	--
Cadmio	0.16 mg/kg	--	--	--	--

Fuente: Elaboración propia, en base a resultados obtenidos en el presente estudio y datos recopilados por (Aparcana & Jansen, 2008) en “*Estudio sobre el valor fertilizante de los productos del proceso ‘Fermentación Anaeróbica’ para producción de biogás*”.

3.4. Estabilidad del biodigestor.

Para las condiciones de operación definidas para el ensayo semicontinuo, se pudo determinar que el proceso de biodigestión fue un proceso estable y robusto, sin problemas de inhibición. A continuación, se revisarán los parámetros relacionados a la estabilidad del reactor anaerobio y se interpretarán los resultados obtenidos a lo largo de la duración del ensayo de digestión semicontinua.

Primero, se había establecido anteriormente que para un biodigestor del tipo CSTR, como es el que se ha empleado para el ensayo semicontinuo, una de sus condiciones de operación era un porcentaje de sólidos totales entre el 2 y el 10 por ciento, condición que se mantuvo durante toda la duración del ensayo semicontinuo realizado, tal como se puede observar en la **Figura 77** que muestra los valores de sólidos totales y volátiles del ensayo semicontinuo.

La evolución del valor de pH del biodigestor semicontinuo de cáscaras de cacao puede verse en la **Figura 78**. Luego de la fase de inoculación, el pH inició en 7, un valor aceptable respecto a los niveles óptimos para la biodigestión anaerobia. Iniciando la fase de alimentación (Día 1 en el gráfico), se puede observar una pequeña caída en la medición del pH, relacionada al nuevo régimen de alimentación impuesto al sistema.

El valor mínimo del pH fue de 6.9, alcanzado en el día 3 de la etapa de alimentación del ensayo semicontinuo. A partir de ese día, el pH exhibió una tendencia de crecimiento hasta mantenerse ente 7.2 y 7.3 de pH.

A pesar de que se esperaba una acidificación producto de la rápida descomposición de los sustratos en ácidos grasos volátiles (Acosta et al., 2018), los valores de pH en el experimento se mantuvieron estables alrededor de 7.2, dentro del rango óptimo de pH.

Se consideran tres factores como causa de una mayor estabilidad del biodigestor de cáscaras de cacao en comparación a lo esperado:

En primer lugar, la estrategia de control de temperatura implementada en el reactor semicontinuo, un control PI en cascada, el cual garantizó una temperatura constante. La **Figura 79** muestra la evolución de la temperatura al interior del reactor durante el día. La temperatura interna del reactor (negro) se mantuvo dentro del rango de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (morado) respecto a la referencia (rojo). Las curvas en verde y celeste son la temperatura del tanque externo de agua y su referencia, respectivamente. El control de temperatura favoreció el metabolismo de los microorganismos presentes en el reactor, en especial el de las arqueas

metanogénicas, lo cual facilitó el desarrollo de una cultura bacteriana balanceada y que pudo adaptarse fácilmente a la degradación de la cáscara de cacao.

En segundo lugar, la alcalinidad propia de la cáscara de cacao. Mediciones de pH realizadas a la mezcla de alimentación muestran valores entre 7.4 y 7.6. Esto provocaría una compensación del nivel de pH al momento de realizar la alimentación, aumentando la capacidad *buffer* del reactor y en consecuencia aumentando la estabilidad del proceso.

Y, finalmente, el efecto combinado del metabolismo activo de las arqueas metanogénicas y un pH favorable, permitió que los ácidos grasos volátiles no se acumularan al interior del reactor y fueran degradados rápidamente en metano y dióxido de carbono, lo cual es deseable en la operatividad de biodigestores anaeróbicos.

Se concluye entonces que, para las condiciones de operación evaluadas en el presente trabajo, el biodigestor de cáscaras de cacao es un sistema bastante estable y robusto, incluso para incrementos en la carga orgánica más rápidos que los indicados por la normativa VDI 4630. Se puede apreciar también que durante la etapa de alimentación rápida existe una variación oscilante del pH, similar a la observada en la gráfica de contenido de metano. Esto valida la utilización del contenido porcentual de metano como un indicador de estabilidad del proceso de biodigestión anaerobia.

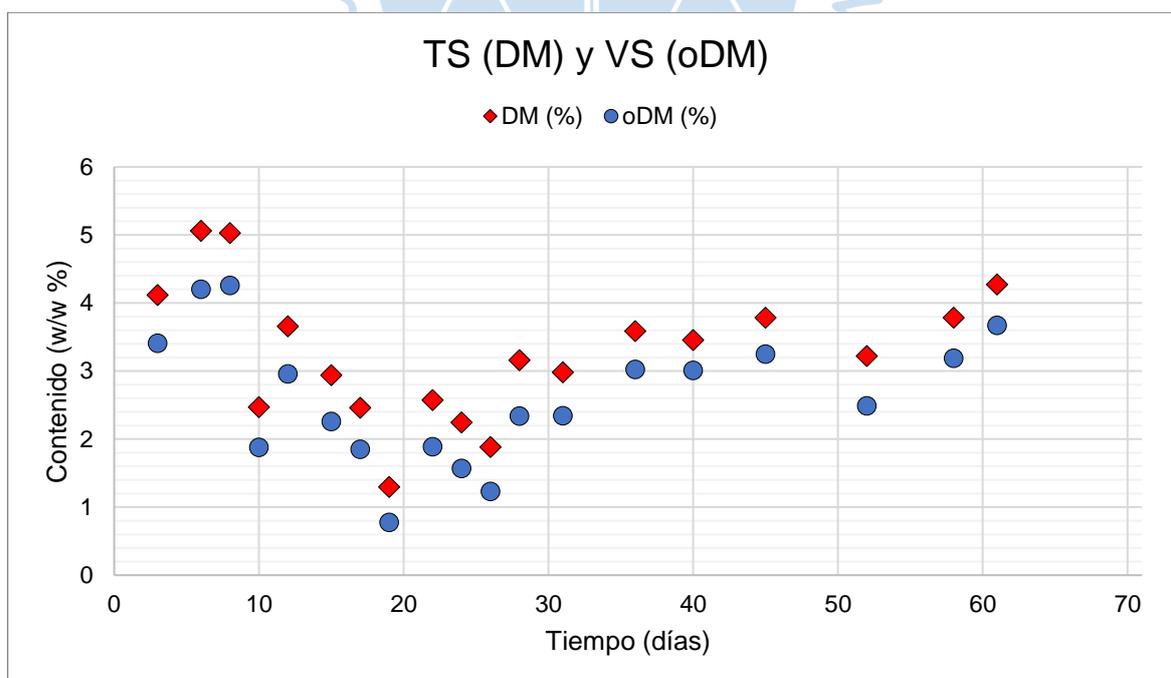


Figura 77. Porcentaje de sólidos totales y sólidos volátiles durante el experimento semicontinuo.

Fuente: Elaboración propia.

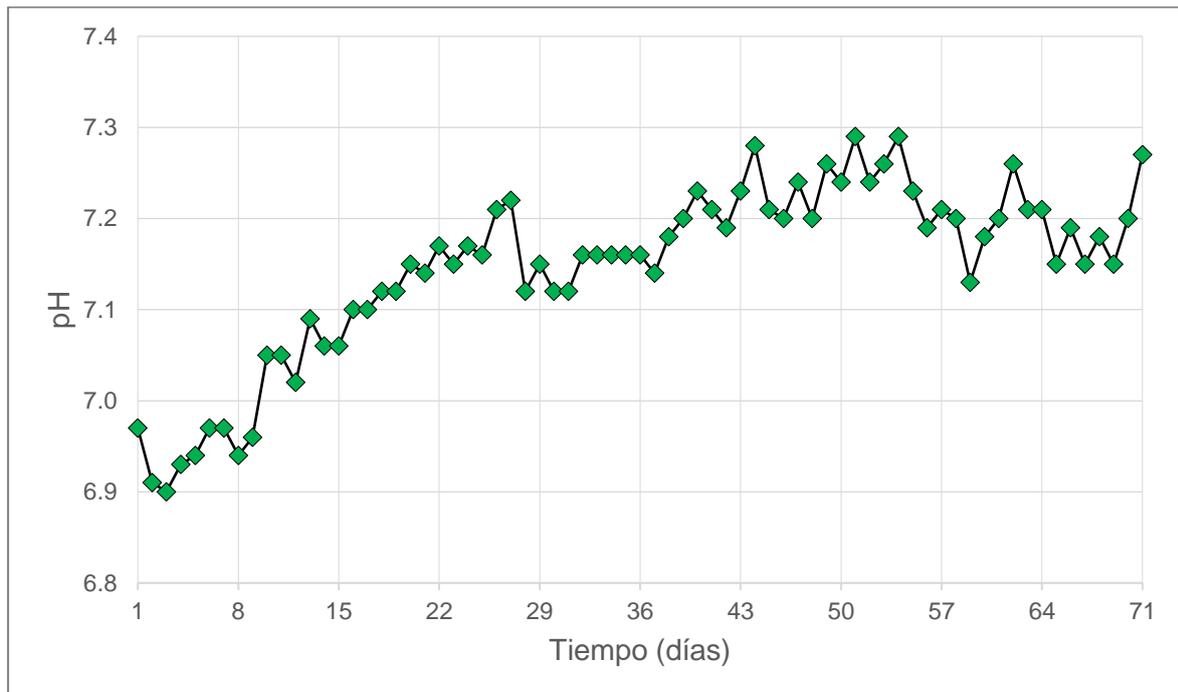


Figura 78. Evolución de nivel de pH durante el ensayo semicontinuo.

Fuente: Elaboración propia.

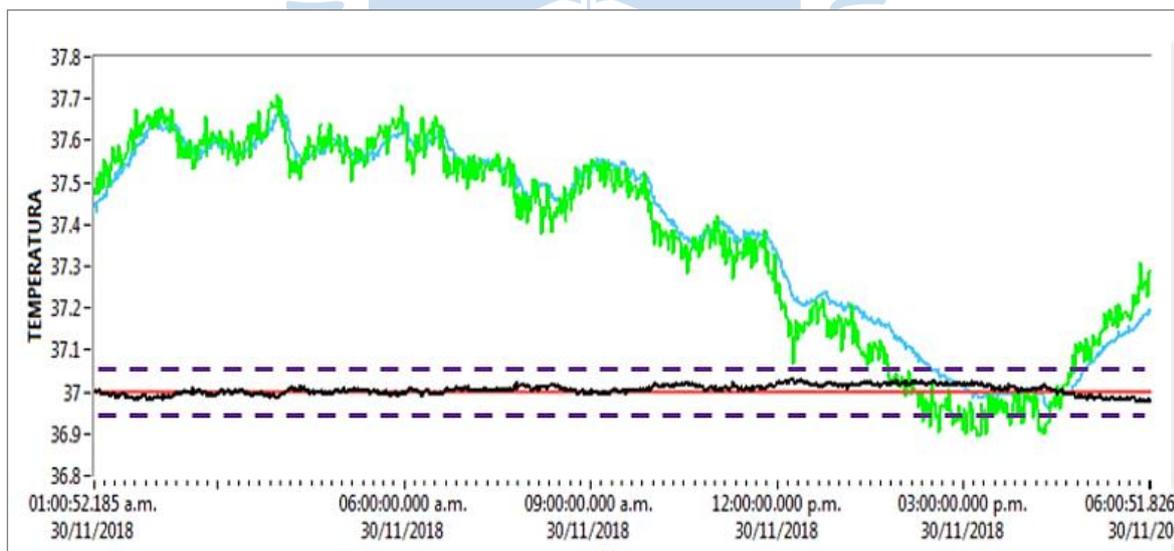


Figura 79. Evolución de la temperatura al interior del reactor durante el día.

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 4

Diseño y operatividad de biodigestor de cáscaras de cacao

En el capítulo anterior se realizó el planteamiento de una metodología para el estudio experimental de la biodigestión anaerobia de residuos orgánicos basada principalmente en los ensayos BMP y de digestión semicontinua. Esta metodología fue aplicada para el estudio de degradabilidad anaerobia de la cáscara de cacao y los resultados obtenidos fueron presentados al final del capítulo.

En este capítulo, basándose en los resultados obtenidos en los ensayos BMP y semicontinuo con cáscaras de cacao, se plantea una metodología para el dimensionamiento y operatividad de un sistema de biodigestión anaerobia de cáscaras de cacao.

Primero se plantea la metodología de diseño, explicando los criterios de selección de los parámetros de operación basándose en las ecuaciones de diseño y las curvas de producción acumulada del ensayo BMP y producción por carga orgánica del ensayo semicontinuo.

Después, se establecen los procedimientos para la puesta en marcha y operación del biodigestor de cáscaras de cacao, en especial sobre la fase de inoculación, alimentación, el análisis e interpretación de parámetros y posible inhibición del reactor anaerobio.

Finalmente, se realiza el caso de estudio del dimensionamiento de un biodigestor casero para una pequeña familia de productores de cacao orgánico de la región Piura.

1. Diseño del biodigestor

1.1. Metodología del diseño. Para el dimensionamiento y diseño operacional de un biodigestor de cáscaras de cacao, o de residuos orgánicos en general, se propone la metodología mostrada en la **Figura 80**, en la que se pueden apreciar cuatro etapas.

La primera etapa consiste en la identificación y caracterización de la biomasa disponible, que para el caso del presente trabajo de investigación fue la cáscara de cacao. Esta primera etapa, trata de detallar de manera cualitativa (caracterización) y cuantitativa (disponibilidad) a la biomasa que se utiliza como sustrato para el sistema de biodigestión anaerobia.

La segunda y tercera etapa corresponden con el estudio experimental de la degradabilidad de la biomasa, explicado y presentado en el capítulo anterior; y la interpretación de los resultados obtenidos. Del ensayo BMP se obtienen datos como producción específica de

biogás y metano esperada a partir de la curva de producción acumulada de biogás y metano respectivamente. También se puede utilizar la curva de producción acumulada para determinar o seleccionar el tiempo de retención hidráulica. Mayores tiempos de retención hidráulica aumentan la producción específica y el rendimiento del biodigestor, pero también aumentan el volumen de este.

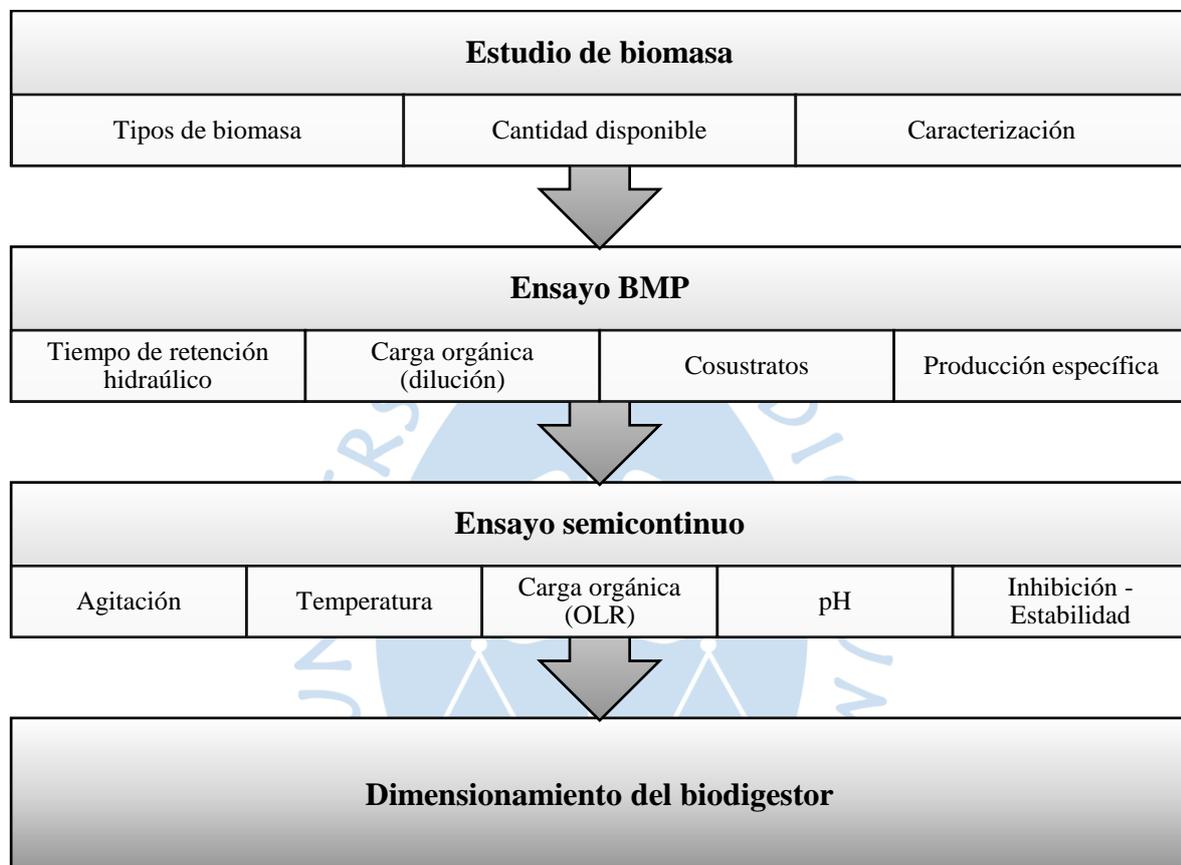


Figura 80. Esquema de metodología de diseño experimental de un biodigestor anaerobio de residuos orgánicos.

Fuente: Elaboración propia

El ensayo BMP también permite obtener información relacionada a la dilución requerida. En el caso de la cáscara de cacao, no hubo necesidad de diluciones, y el limitante de su degradabilidad es su contenido de lignina. En esta etapa también se puede estudiar la co-digestión de dos o más sustratos. Este análisis no fue parte del presente estudio y queda como tema de investigación para trabajos futuros.

Para la tercera etapa, consistente en el ensayo semicontinuo, se terminan de definir condiciones operacionales y parámetros de funcionamiento del reactor bajo régimen de alimentación semicontinua, como la temperatura de digestión, frecuencia de agitación

requerida, análisis de la estabilidad del proceso, así como la evolución del valor de pH, que permite elegir si es necesaria alguna estrategia de control correctiva, que puede ser la implementación de un control de pH por medio de adición de soluciones ácido y/o base.

Finalmente, definida una estrategia operativa funcional, se puede realizar el dimensionamiento del biodigestor. Para determinar el volumen del reactor, la literatura generalmente contempla dos enfoques:

- El primero se basa en obtener la máxima producción específica de metano (máxima cantidad de metano recuperado por cantidad de biomasa).
- El segundo enfoque consiste en obtener la máxima producción diaria de metano (máxima cantidad de metano por día) y está relacionado con obtener la mayor cantidad de biomasa procesada por día.

Sin embargo, la selección de los parámetros de operación y el dimensionamiento de un sistema de biodigestión anaerobia no necesariamente sigue alguno de los dos enfoques mencionados y puede adaptarse de acuerdo con la estabilidad, producción esperada y eficiencia que se desea lograr.

1.2. Ecuaciones de diseño. En el dimensionamiento y operación de un biodigestor existen una serie de parámetros relacionados entre sí. Las relaciones entre los distintos parámetros de un biodigestor están especificadas por las ecuaciones que se introducen a continuación.

1.2.1. Ecuaciones de sólidos totales y sólidos volátiles. Estas ecuaciones parten de los resultados de los ensayos de determinación de sólidos totales, sólidos volátiles y cenizas de una muestra de materia orgánica (Apéndice A)

Una muestra de materia orgánica está compuesta principalmente por sólidos y agua (humedad). Los sólidos totales son la fracción de materia restante que queda luego de someter la muestra de materia orgánica a una temperatura de 105°C hasta alcanzar peso constante.

$$\text{Masa Total} = \text{Agua} + \text{TS}$$

Los sólidos totales (TS) a su vez pueden subdividirse en sólidos volátiles y cenizas. Las cenizas son la fracción de los sólidos totales que quedan luego de someter a la materia

orgánica a una temperatura de 550 °C hasta alcanzar peso constante. A la fracción de materia orgánica volatilizada a esta temperatura se le llama sólidos volátiles.

$$TS = VS + \text{Cenizas}$$

Tanto los sólidos volátiles como los totales son una forma de caracterizar la biomasa y pueden expresarse en valores porcentuales.

$$TS\% = \frac{TS}{\text{Masa Total}} * 100\%$$

$$VS\% = \frac{VS}{\text{Masa total}} * 100\%$$

Usualmente también se presentan los valores porcentuales de sólidos volátiles en relación con los sólidos totales en lugar de la masa total de la muestra. Debe tenerse cuidado en este aspecto.

$$VS\% \text{ de } TS = \frac{VS}{TS} * 100\%$$

1.2.2. **Ecuaciones de volumen de biodigestor.** Un reactor anaerobio posee un volumen total (V_{reactor}) del cual, el correspondiente al ocupado por el digestato es el volumen efectivo (V_{efectivo}) y el espacio libre para el biogás (fase gaseosa) es llamado volumen libre (V_{libre}) (**Figura 81**).

$$V_{\text{reactor}} = V_{\text{efectivo}} + V_{\text{libre}}$$

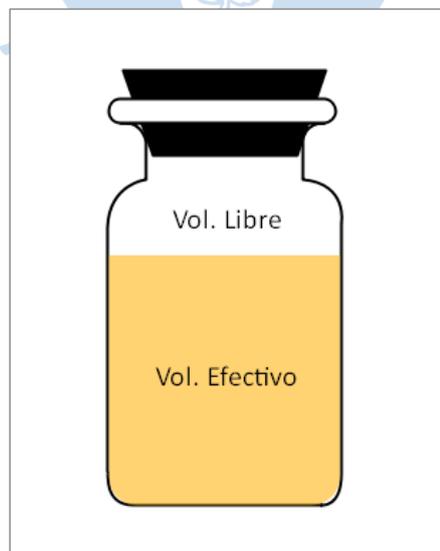


Figura 81. Esquema de la división de volúmenes de un reactor anaerobio.

Fuente: Elaboración propia.

Se recomienda que el volumen libre sea entre el 10% y 20% del volumen total del reactor. Si se asume un 15%, el volumen libre y efectivo pueden calcularse a partir del volumen total del reactor:

$$V_{\text{libre}} = 0.15 * V_{\text{reactor}}$$

$$V_{\text{efectivo}} = 0.85 * V_{\text{reactor}}$$

La relación entre el volumen efectivo y el tiempo de retención hidráulica y la carga orgánica volumétrica diaria es:

$$V_{\text{efectivo}} = \text{HRT} * V_{\text{carga diaria}}$$

Además, la carga orgánica volumétrica diaria es proporcional al tamaño del reactor y a la tasa de carga orgánica (OLR) que es un parámetro de funcionamiento del biodigestor y del porcentaje de sólidos volátiles de la carga.

$$m_{\text{carga diaria}} = \text{OLR} * \frac{V_{\text{efectivo}}}{\frac{\text{VS}\%}{100}} = 100 * \text{OLR} * \frac{V_{\text{efectivo}}}{\text{VS}\%}$$

Asimismo:

$$m_{\text{carga diaria}} = V_{\text{carga diaria}} * \rho_{\text{mezcla}}$$

Donde ρ_{mezcla} es la densidad de la mezcla utilizada para la alimentación.

Por lo tanto, el volumen de la mezcla para alimentación del biodigestor o carga diaria volumétrica puede expresarse también como:

$$V_{\text{carga diaria}} = \frac{100 * \text{OLR} * V_{\text{efectivo}}}{\text{VS}\% * \rho_{\text{mezcla}}}$$

De ambas relaciones, se obtiene la ecuación:

$$V_{\text{efectivo}} = \frac{100 * \text{HRT} * \text{OLR}}{\text{VS}\% * \rho_{\text{mezcla}}}$$

1.2.3. **Ecuaciones de producción de biogás.** Para una determinada dilución de sustrato o porcentaje de sólidos volátiles (VS%), de los resultados del ensayo BMP se obtiene una curva que muestra la producción acumulada de metano respecto al tiempo (**Figura 82**). Se define entonces la producción última de metano (B_u) como la máxima producción

acumulada de metano para un tiempo infinito y un sustrato de dilución y composición determinadas.

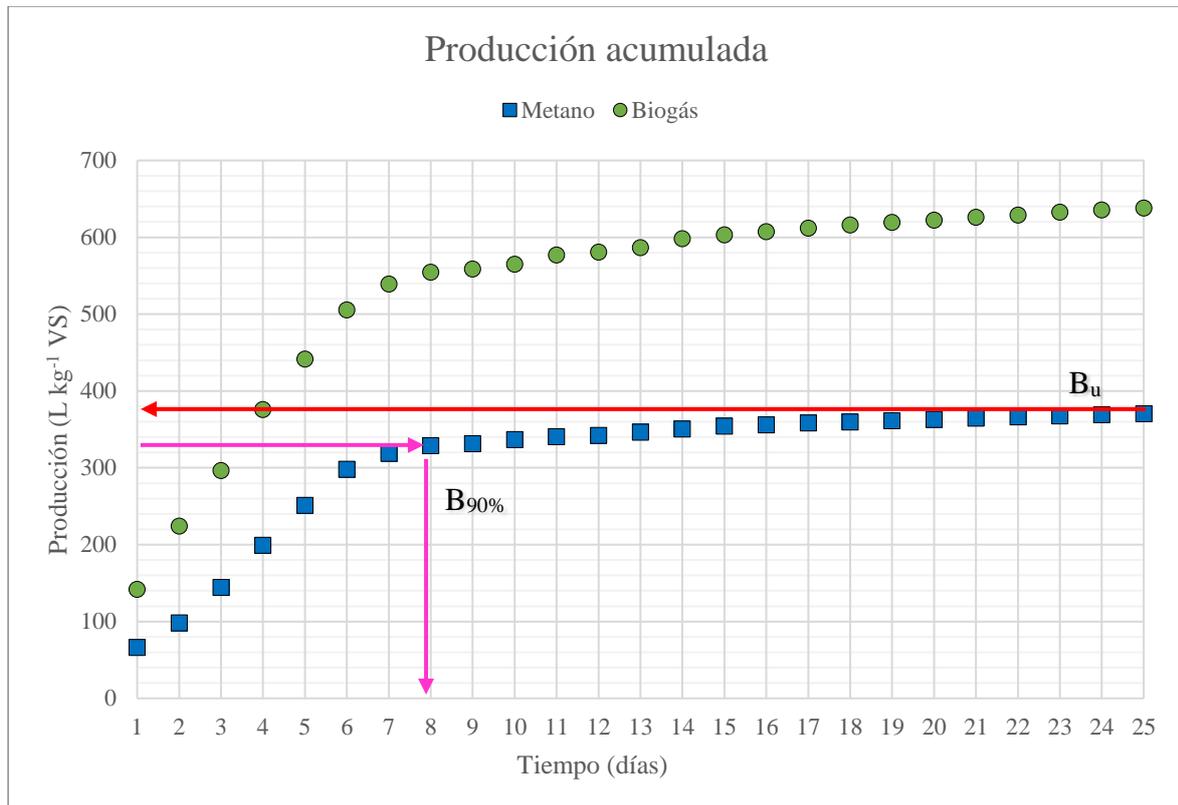


Figura 82. Curva de producción acumulada de biogás obtenida de un ensayo BMP.

Fuente: Elaboración propia.

Conociendo que un tiempo de retención hidráulica mayor se traduce en un volumen de biodigestor mayor, el HRT debería elegirse de manera tal que se pueda recuperar la mayor cantidad de metano sin requerir un gran volumen efectivo en el reactor.

Para obtener la producción de metano esperada se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$\gamma_{\text{metano}} = B_{\text{metano}} * V_{\text{carga diaria}}$$

$$\gamma_{\text{metano}} = B_{\text{metano}} * \frac{100 * \text{OLR} * V_{\text{efectivo}}}{\text{VS}\%}$$

En donde los valores de OLR y B_{metano} corresponden a un determinado punto de operación semicontinua y pueden obtenerse de la gráfica de producción específica de biogás respecto a una determinada carga orgánica (OLR) (**Figura 83**).

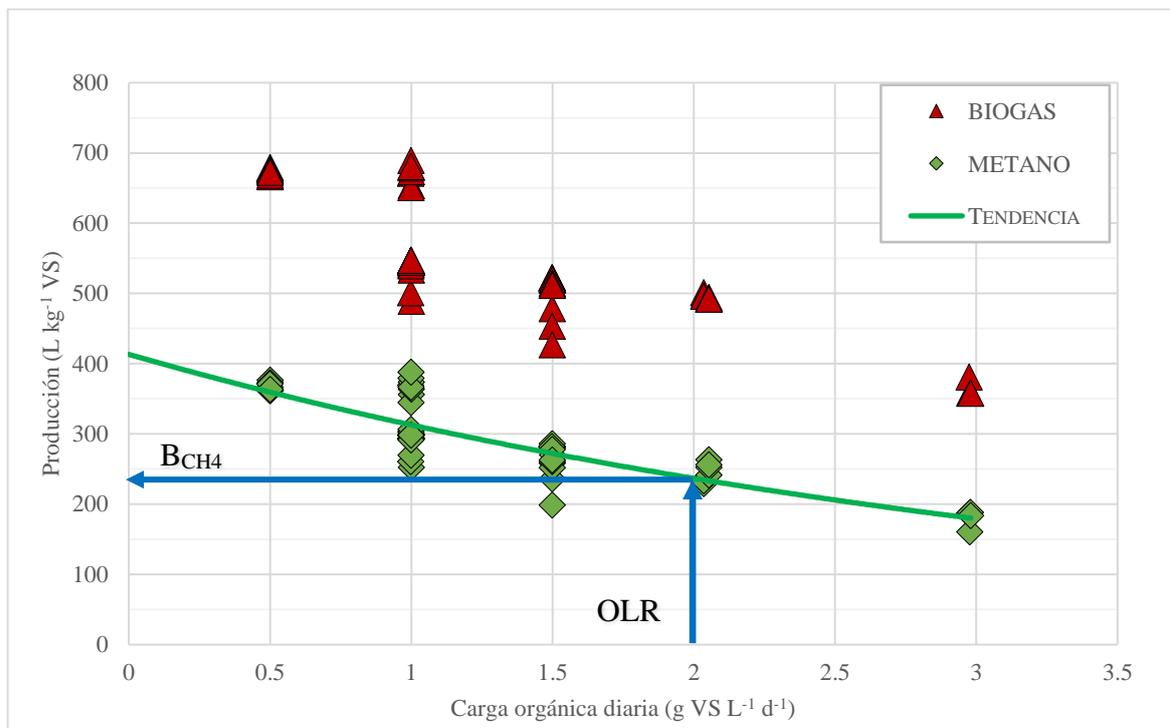


Figura 83. Relación entre carga orgánica diaria y producción específica de metano.

Fuente: Elaboración propia.

Para un determinado valor de VS%, el HRT se elige de acuerdo con los resultados obtenidos en el ensayo BMP y se debe recordar que mientras más alto sea, mayor cantidad de biogás/metano podrá ser recuperada para una misma cantidad de biomasa.

Por otro lado, el OLR es el régimen de carga diaria al que se opera el biodigestor y puede elegirse de acuerdo con los resultados obtenidos en el ensayo semicontinuo. Valores más altos de OLR permiten una mayor cantidad de carga orgánica volumétrica diaria, pero el rendimiento de metano cambia y aumenta el riesgo de una sobrecarga orgánica en el reactor, es decir, disminuye su estabilidad.

2. Operatividad del biodigestor

2.1. Inoculación

2.1.1. Obtención y preparación del inóculo. El inóculo debe ser lo más fresco posible y debe obtenerse de un reactor anaeróbico que se encuentre operando en el rango de temperatura adecuado, i.e. mesofílico o termofílico, dependiendo del rango de temperatura al que se llevará a cabo el ensayo. Se prefiere reactores que se encuentren procesando una mezcla variada de sustratos para asegurar la presencia de distintos tipos de microorganismos anaeróbicos y garantizar que los sustratos a ensayar no presenten limitaciones por

inexistencia de microorganismos adecuados para su degradación. La muestra de lodo anaerobio obtenida debe ser homogénea y libre de componentes extraños (e.g. piedras, ramas, madera) antes de ser utilizada. Durante el traslado y conservación de los lodos anaerobios hasta su utilización, se debe asegurar que las condiciones anaerobias se mantengan, en especial hermeticidad, pH y temperatura adecuada.

Antes de su utilización como inóculo, los lodos anaerobios deben ser desgasificados, esto es, sometidos a un periodo de incubación con el objetivo de terminar de procesar el material orgánico degradable residual que pueda encontrarse presente. La desgasificación debe ser llevada a cabo a la misma temperatura de operación que el reactor anaerobio de origen de los lodos anaerobios y hasta alcanzar una producción insignificante de biogás, usualmente lograda después de 3 a 7 días, dependiendo de la degradabilidad de los sustratos residuales presentes en los lodos anaerobios.

Finalizado el periodo de desgasificación, un análisis de determinación de sólidos totales y sólidos volátiles debe ser efectuado en el inóculo. El inóculo debe tener un porcentaje de sólidos volátiles mayor al 50% de su porcentaje de sólidos totales.

$$\frac{VS\%_{\text{inóculo}}}{TS\%_{\text{inóculo}}} \geq 0.5$$

2.1.2. **Preparación de carga inicial.** Para preparar la mezcla de inoculación o carga inicial del reactor anaerobio se sugieren las siguientes proporciones

- El 20% del volumen de la mezcla debería ser inóculo y el 80% restante debe ser una mezcla de biomasa y agua.

$$V_{\text{inóculo}} = 0.2 * V_{\text{mezcla}}$$

$$V_{\text{biomasa}} + V_{\text{agua}} = 0.8 * V_{\text{mezcla}}$$

- Para determinar la proporción entre biomasa y agua se tiene como criterio que el porcentaje de sólidos volátiles debe ser entre 1.5% y 3% en peso. Por ello, es necesario realizar un ensayo de determinación de sólidos volátiles y sólidos totales a la biomasa a utilizar.

2.2. Alimentación. La alimentación debe ser secuencial hasta alcanzar la carga orgánica diaria deseada (OLR deseado). Para ello, conociendo el porcentaje de sólidos volátiles de la biomasa (VS%) y el volumen efectivo del reactor se puede calcular utilizando la masa de carga diaria:

$$m_{\text{carga diaria}} = 100 * \text{OLR} * \frac{V_{\text{efectivo}}}{\text{VS}\%}$$

Iniciando con un OLR de $0.5 \frac{\text{kg VS}}{\text{m}^3 \text{d}}$, se debe incrementar en pasos de $0.5 \frac{\text{kg VS}}{\text{m}^3 \text{d}}$ hasta alcanzar el OLR deseado. Esto tiene como objetivo permitir la adecuación de los microorganismos anaerobios a las condiciones nominales de operación. Este cambio de régimen de alimentación puede realizarse de manera semanal, aunque para biodigestores muy estables con control de temperatura como el utilizado para el ensayo semicontinuo se pudo lograr incrementos de OLR en menos de 3 días sin problemas de estabilidad.

2.3. Análisis de parámetros. Un monitoreo de la temperatura, presión, sólidos totales y volátiles, pH y composición de biogás son recomendados (**Tabla 22**).

Para el caso de la digestión de cáscaras de cacao, los resultados experimentales indican que una temperatura de 37 °C con una variación menor a 1°C durante el día incrementa notablemente la estabilidad del sistema y permite cargas orgánicas más elevadas sin indicios de inhibición.

El pH es un indicador de inhibición correctivo y no debe utilizarse como predictor de futuros problemas de sobrecarga o inhibición en el sistema. La digestión semicontinua de cáscaras de cacao en el ensayo experimental realizado en este trabajo de investigación ocurrió con un pH neutro, entre 7.2 y 7.4.

Un parámetro importante como indicador temprano de inhibición es el porcentaje de metano ($\%_{\text{CH}_4}$) en el biogás. Para condiciones normales de operación debe permanecer constante y cercano a 55% para un reactor anaerobio de cáscaras de cacao. Si durante un régimen estacionario de operación (mismas condiciones de carga orgánica, temperatura) existe una disminución en dicho porcentaje, se debe realizar un análisis para determinar la posible causa de inhibición. Cabe resaltar que es posible que el porcentaje disminuya y alcanza un nuevo valor estable cuando existe un cambio en la composición de la biomasa utilizada para la alimentación.

Tabla 22. Medición de parámetros de un reactor anaerobio.

Parámetro	Valor nominal	Frecuencia de medición
Temperatura	Valor óptimo de 37°C con variaciones menores a 1°C. Pueden permitirse variaciones de hasta 3 °C para condiciones mesofílicas (aumentan los tiempos de inoculación y disminuye la eficiencia del reactor).	Medición diaria como mínimo o en línea (deseado).
Presión	Depende del reactor. Se determina una vez iniciada la operación. Resultados experimentales: 25-50 milibares.	En línea.
pH	Mayor a 7.0 Ideal entre 7.2 y 7.4	Medición semanas (mínimo) Medición diaria (deseado). En línea (ideal)
TS y VS (reactor)	Depende de la operación. Es relativo. Debe ser menor a 10%. Resultados experimentales (3-5%)	Dos ensayos por mes como mínimo. Se puede sugerir la utilización de una termobalanza para el caso de una medición aproximada de los sólidos totales (solo TS)
TS y VS (cacao)	Estables.	Una vez al mes.
Metano	Depende del OLR. Resultados experimentales: 55% de metano.	Diaria (deseado). En línea (ideal).
Hidrógeno	Menor a 100 ppm (Literatura)	En línea (ideal)

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente se sugiere la medición de H₂ en el volumen libre del reactor. Valores mayores a 100 ppm pueden indicar inhibición (Drosg, 2013). La medición en línea de hidrógeno puede ser complicada, pero es el mejor indicador temprano de inhibición del sistema.

Finalmente, los valores de TS y VS del reactor permiten determinar la viscosidad del digestato. Valores mayores de TS aumentan el esfuerzo requerido para la agitación y disminuyen el volumen efectivo del reactor debido a la formación de sedimentos. Por norma

general, los biodigestores del tipo tanque mezclado (CSTR) pueden trabajar con valores de sólidos totales de hasta 10%. Debido al equipamiento y tiempo necesario para efectuar un ensayo de determinación de sólidos totales, generalmente este parámetro puede ser medido dos veces al mes. Una alternativa es el uso de termobalanzas para la determinación aproximada del contenido de humedad, y por tanto el contenido de sólidos totales.

2.4. Inhibición. La inhibición del proceso de biodigestión anaerobia puede detectarse antes de ocurrir si es que existe un monitoreo de parámetros, en especial de aquellos que son considerados indicadores tempranos de inhibición (e.g. porcentaje de metano e hidrógeno).

Ante la presencia de una tendencia hacia la inestabilidad del sistema, acciones correctivas pueden tomarse para evitar el fallo total del biodigestor (e.g. inhibición total del proceso de digestión anaerobia) (**Tabla 23**). Es importante resaltar la importancia de una operación estable del reactor: una inhibición total del reactor requiere el reinicio del proceso y la pérdida de los microorganismos anaerobios residentes en el reactor.

Otras posibles causas de inhibición no han sido consideradas en la **Tabla 23** debido a que son detectables durante la etapa de estudio experimental de la digestión anaerobia de la materia orgánica ensayada. Para el caso de la cáscara de cacao se determinó que la producción H_2S no era un problema debido a que las cantidades generadas, para las condiciones del ensayo de digestión semicontinua, fueron indetectables.

Tabla 23. Posibles causas de inhibición y acciones correctivas sugeridas.

Causa	Detalle	Acción correctiva
Sobrecarga hidráulica	El tiempo de retención hidráulica es muy bajo y no permite mantener una población bacteria estable al interior del reactor (e.g. las bacterias están siendo <i>lavadas</i> del reactor). Puede detectarse por una producción baja de biogás a pesar de mantener condiciones estables de operación. Eventualmente ocurrirá la acidificación del reactor debido a que las bacterias acidogénicas poseen tiempos de reproducción más rápidos que las metanogénicas.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumentar el tiempo de retención hidráulica del reactor (HRT). • Recalcular parámetros para nuevo HRT. • Agregar inóculo al reactor (población bacteriana al reactor) junto a la alimentación.

Tabla 23. (continuación)

Causa (cont.)	Detalle (cont.)	Acción correctiva (cont.)
Sobrecarga orgánica	El biodigestor se encuentra trabajando en un régimen de carga orgánica superior al máximo que puede procesar. La acumulación de ácidos grasos volátiles lleva a una acidificación del reactor, que puede ser detectada como una disminución en el nivel de pH.	<ul style="list-style-type: none"> • Regresar al régimen anterior de alimentación. • Aumentar agitación para prevenir la acumulación local de ácidos grasos volátiles.
Cambio en VS% del sustrato.	La biomasa utilizada para la alimentación del reactor anaerobio ha cambiado su composición en relación con los valores usados en el diseño.	<ul style="list-style-type: none"> • Disminuir la alimentación al régimen anterior (reducir OLR en $0.5 \frac{\text{kg VS}}{\text{m}^3}$). • Realizar un ensayo de determinación de sólidos volátiles y recalcular los valores de $m_{\text{carga diaria}}$. • Volver al régimen (OLR) original de operación.

Fuente: Elaboración propia.

3. Caso de estudio: Biodigestor para una familia productora de cacao

El siguiente caso de estudio representa el potencial del proceso de digestión anaerobio para cubrir las necesidades básicas de una pequeña familia productora de cacao que posee 2 hectáreas de cultivo de cacao.

3.1. Suposiciones. Para el desarrollo de este caso de estudio se trabajará en base a las siguientes suposiciones:

- El rendimiento específico de metano de la cáscara de cacao es de $275 \frac{\text{litros de metano}}{\text{kg sólidos volátiles}}$, según resultados obtenidos en el presente trabajo. El biogás obtenido es 55% metano y 45% dióxido de carbono. El H_2S , en caso estuviera presente, es despreciable.
- El biogás generado será utilizado en las mismas condiciones en las que ha sido producido, es decir no será mejorado o purificado a biometano por los costos y requerimientos técnicos adicionales relacionados con las tecnologías de purificación a biometano.

- Las necesidades básicas por cubrir son principalmente iluminación y combustible para cocción de alimentos.
- La producción promedio de cacao por hectárea es de 700 kg al año. Esta suposición entra en el rango de las cifras reportadas (Inclusive & Systems, 2016; Kozicka, Tacconi, Horna, & Gotor, 2018; Seeking Alpha, 2015).
- Cada tonelada de grano de cacao produce hasta 15 kilogramos de cáscara de cacao.

3.2. Demanda de biogás. En la **Tabla 24** se muestra un detalle de la demanda de biogás de la familia productora. Se asume que las únicas cargas son 3 lámparas de biogás y un quemador de biogás para cocinar.

Tabla 24. Demanda anual de metano de una familia productora de cacao.

Equipos	N° de equipos	Consumo de metano por hora ($\frac{m^3}{h}$)	Horas de uso al año ($\frac{h}{anual}$)	Demanda anual de metano ($\frac{m^3}{anual}$)
Lámparas	3	0.13	1000	390
Cocina	1	2.16	180	389
Total				779

Fuente: Elaboración propia, a partir de datos obtenidos por (Korres, Kiely, Jonathan, & Benzie, 2013)

3.3. Producción de metano. Para calcular la cantidad de metano que puede producirse anualmente por medio del proceso de biodigestión anaerobia de cáscaras de cacao primero es necesario calcular la cantidad de materia prima disponible al año.

$$700 \frac{\text{kg grano de cacao}}{\text{año} * \text{ha}} * 15 \frac{\text{kg de cáscaras de cacao}}{\text{kg grano de cacao}} = 10500 \frac{\text{kg de cáscaras de cacao}}{\text{año} * \text{ha}}$$

Luego debe calcularse la cantidad de VS disponibles. Para ello se utiliza el porcentaje de VS por kg fresco de cáscara de cacao, determinado en el presente estudio.

$$10500 \frac{\text{kg de cáscaras de cacao}}{\text{año} * \text{ha}} * 0.11 \frac{\text{kg VS}}{\text{kg de cáscaras de cacao}} = 1155 \frac{\text{kg VS}}{\text{año} * \text{ha}}$$

Finalmente se utiliza la producción específica de metano del biodigestor para determinar la producción de metano anual.

$$1155 \frac{\text{kg VS}}{\text{año} * \text{ha}} * 275 \frac{\text{litros de metano}}{\text{kg VS}} = 317.625 \frac{\text{m}^3 \text{ de metano}}{\text{año} * \text{ha}}$$

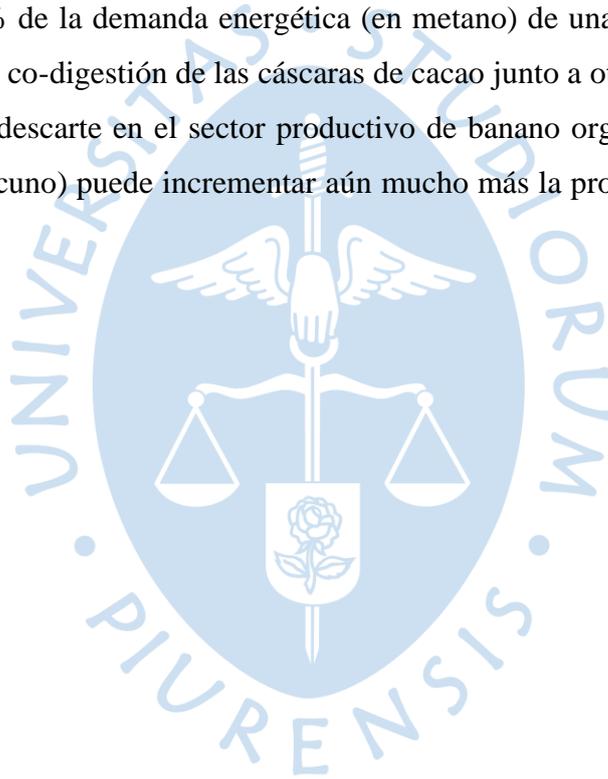
$$317.625 \frac{\text{m}^3 \text{ de metano}}{\text{año} * \text{ha}} * 2 \text{ ha} = 635.25 \frac{\text{m}^3 \text{ de metano}}{\text{año}}$$

Para la determinación del volumen del reactor anaerobio se debe considerar el reactor trabaja a $2.0 \frac{kgSV}{m^3d}$ y que además la biomasa disponible al año es de $1155 \frac{kgVS}{año*ha}$. Asumiendo que se el 80% del volumen del reactor anaerobio es el volumen efectivo se tiene que:

$$\frac{1155 \frac{kgSV}{año * ha}}{2.0 \frac{kgSV}{m^3_{efectivos}d} * 0.8 \frac{m^3_{efectivos}}{m^3_{totales}}} * \frac{1 año}{365 d} = 1.98 \frac{m^3_{totales}}{ha}$$

Por lo tanto, se requieren aproximadamente 2 metros cúbicos por hectárea o 4 metros cúbicos si se consideran las 2 hectáreas pertenecientes a la familia del caso de estudio.

3.4. Comentarios. Un sistema biodigestor de cáscaras de cacao posee el potencial de cubrir hasta el 81.5% de la demanda energética (en metano) de una familia productora de cacao. Un sistema de co-digestión de las cáscaras de cacao junto a otras fuentes de biomasa como pueden ser el descarte en el sector productivo de banano orgánico y el estiércol de animales (ganado vacuno) puede incrementar aún mucho más la producción de metano del biodigestor.



Conclusiones

En el presente trabajo se realizó el estudio experimental de degradabilidad anaerobia de las cáscaras de cacao orgánico por medio de los ensayos BMP y semicontinuo de digestión anaerobia, determinándose el potencial de generación de biometano para distintos niveles de carga orgánica. Para ello se desarrollaron e implementaron prototipos de ensayos que satisfacen la normativa alemana VDI 4630.

La producción de metano obtenida fue mayor en un 56% a los resultados reportados por un estudio experimental de biodigestión de cáscaras de cacao realizado en Ecuador (**Tabla 20**); además de una mayor estabilidad en la producción diaria. Estos resultados sugieren un impacto significativo del control de parámetros, especialmente la temperatura, en la operación de un biodigestor anaerobio. Por tanto, existe una gran oportunidad para el estudio y desarrollo de sistemas de automatización y control de biodigestores.

Otro de los resultados obtenidos fue el desarrollo de una metodología para el dimensionamiento y operatividad de un biodigestor basada en ensayos experimentales que posee la ventaja de permitir seleccionar las condiciones de operación adecuadas y adaptadas al sustrato procesado y predecir posibles inhibiciones o inestabilidades además de la producción esperada de biogás y metano.

Respecto a la cáscara de cacao se puede resaltar que se pudo comprobar la hipótesis de que es un sustrato viable para la alimentación de un biodigestor anaerobio, teniendo la posibilidad de cubrir el 81.5% de la demanda de metano de una pequeña familia, de acuerdo con los resultados obtenidos en el caso de estudio del capítulo 4.

Se debe considerar que las cáscaras de cacao requieren tratamientos mecánicos (e.g. trituración) para facilitar la hidrólisis. Un tema de investigación futura puede ser el diseño de un equipo de trituración de cáscaras de cacao que permita acondicionar la biomasa que se usará en el proceso de biodigestión.

La literatura consultada durante el desarrollo de este trabajo evidencia que la co-digestión, que es la digestión anaerobia de distintos sustratos en un mismo reactor, logra aumentar la producción específica del reactor e incluso lo vuelve más estable, por lo que se recomienda realizar el estudio experimental de co-digestión anaerobia de cáscara de cacao y otros residuos orgánicos, como el estiércol de ganado y verificar el aumento en la producción de metano. En este sentido, se recomienda el uso de residuos orgánicos de origen animal y

vegetal pues cada uno aporta una variedad de sustratos y elementos trazas que permiten la diversificación de los microorganismos anaerobios, lo cual es deseable para lograr una operación estable y eficiente del reactor anaerobio.

Otros temas de investigación futura son: a) la eficiencia energética del sistema y b) el estudio experimental de otras fuentes de biomasa.

- a) Sobre la eficiencia energética del sistema, se sugiere la mejora del reactor anaerobio semicontinuo de tal manera que el mismo biogás generado sea aprovechado para el calentamiento del reactor, evitando la utilización de un calentador eléctrico con miras a su implementación a escala doméstica en sitios sin acceso a la red eléctrica. Se necesita entonces un sistema de calentamiento que utilice el biogás generado u otras fuentes no convencionales de energía (e.g. geotérmica, solar térmica) y estudiar la factibilidad del sistema de control de temperatura, es decir, comprobar que la producción adicional justifica el mayor consumo energético del reactor, o a partir de que escala se vuelve viable.
- b) Por otro lado, la región Piura posee otras fuentes de biomasa. Visitas realizadas a asociaciones de productores de banano orgánico de la región muestran un gran interés en el aprovechamiento de sus residuos orgánicos, principalmente raquis y fruto de descarte, para la producción de biol, insumo muy valorado por su gran aporte fertilizante a las plantas, además de ser de origen natural, un factor muy relevante para las asociaciones que buscan conservar la certificación de “orgánico”. Entre los posibles temas de investigación sugeridos están el estudio de las fuentes de biomasa disponibles en la región, el estudio experimental de la degradabilidad de los raquis y fruto de descarte de las distintas agroindustrias locales y la elaboración de fertilizantes orgánicos (biol) a partir de dichos residuos orgánicos.

Finalmente, se propone la realización de mejoras relacionadas a la medición de la calidad del biogás (contenido de metano, dióxido de carbono y otros gases traza como el H₂S) en línea; y de sistemas de purificación y almacenamiento del biogás generado.

Referencias

- Acosta, N., De Vrieze, J., Sandoval, V., Sinche, D., Wierinck, I., & Rabaey, K. (2018). Cocoa residues as viable biomass for renewable energy production through anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 265, 568–572. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.100>
- Adani, F., Tambone, F., Schievano, A., Salati, S., D'Imporzano, G., Scaglia, B., & Orzi, V. (2010). Assessing amendment and fertilizing properties of digestates from anaerobic digestion through a comparative study with digested sludge and compost. *Chemosphere*, 81(5), 577–583. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.08.034>
- Adomako, D. (1972). Cocoa pod husk pectin. *Phytochemistry*, 11(3), 1145–1148. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)88468-X](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)88468-X)
- Alternativas al Desarrollo. (2015). APPROCAP y su cacao fino de aroma de Piura. Retrieved February 25, 2019, from Alternativas al Desarrollo website: <http://desarrollo-alternativo.org/approcap-y-su-cacao-fino-de-aroma-de-piura-peru-para-el-mundo/>
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., ... Van Lier, J. B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology*. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.040>
- Aparcana, S., & Jansen, A. (2008). Estudio sobre el Valor Fertilizante de los Productos del Proceso Fermentación Anaeróbica para Producción de Biogás. *German Profec*, p. 10. Retrieved from http://www.german-profec.com/cms/upload/Reports/Estudio sobre el Valor Fertilizante de los Productos del Proceso Fermentacion Anaerobica para Produccion de Biogas_ntz.pdf
- Augstburger, F., Berger, J., Censkowsky, U., Heid, P., Milz, J., & Streit, S. (2000). *Agricultura Orgánica en el Trópico y Subtrópico: Guías de 18 cultivos - Cacao* (pp. 1–24). pp. 1–24. Retrieved from <https://www.naturland.de/images/SP/Productores/cacao.pdf>
- Barazarte, H., Sangronis, E., & Unai, E. (2008). La cáscara de cacao (Theobroma cacao L.): Una posible fuente comercial de pectinas. *Archivos Latinoamericanos de Nutricion*.
- Barber, W. P., & Stuckey, D. C. (1999, May 1). The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: A review. *Water Research*, Vol. 33, pp. 1559–1578. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00371-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00371-6)
- Begum, L. (2014). *Advanced processes and technologies for enhanced anaerobic digestion*. Green Nook Press.
- Biomass Users Network (BUN-CA). (2002). Manuales sobre energía renovable: Biomasa. In *Fortalecimiento de la capacidad en energía renovable para América central*. <https://doi.org/10.15713/ins.mmj.3>
- Cai, W.-M., Zhang, B., Zhang, S.-C., Shi, H.-Z., & Zhang, L.-L. (2008). The Influence of pH on Hydrolysis and Acidogenesis of Kitchen Wastes in Two-phase Anaerobic Digestion. *Environmental Technology*, 26(3), 329–340. <https://doi.org/10.1080/09593332608618563>

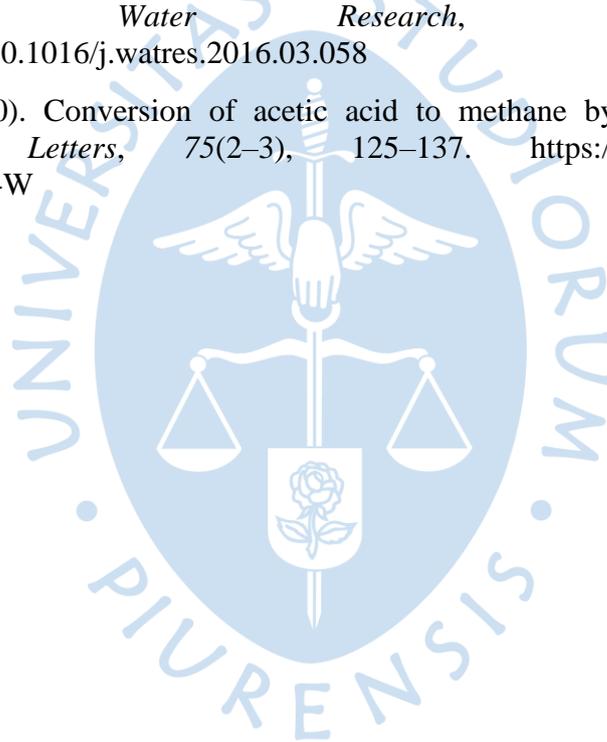
- Campos-Vega, R., Nieto-Figueroa, K. H., & Oomah, B. D. (2018). Cocoa (Theobroma cacao L.) pod husk: Renewable source of bioactive compounds. *Trends in Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.09.022>
- Chae, K. J., Jang, A., Yim, S. K., & Kim, I. S. (2008). The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure. *Bioresource Technology*, 99(1), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.063>
- Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, Vol. 99, pp. 4044–4064. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>
- Da Costa Gomez, C. (2013). Biogas as an energy option. In *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications* (pp. 1–16). <https://doi.org/10.1533/9780857097415.1>
- Daud, Z., Sari, A., Kassim, M., Aripin, A. M., Awang, H., & Hatta, Z. M. (2013). Chemical Composition and Morphological of Cocoa Pod Husks and Cassava Peels for Pulp and Paper Production. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(9), 406–411. Retrieved from [http://eprints.uthm.edu.my/8105/1/dr_halizah_\(fptv\).pdf](http://eprints.uthm.edu.my/8105/1/dr_halizah_(fptv).pdf)
- Del Real Olvera, J., & Lopez-lopez, A. (2009). Biogas Production from Anaerobic Treatment of Agro-Industrial Wastewater. In *Biogas* (pp. 91–103). <https://doi.org/10.5772/1793>
- Donkoh, A., Atuahene, C. C., Wilson, B. N., & Adomako, D. (1991). Chemical composition of cocoa pod husk and its effect on growth and food efficiency in broiler chicks. *Animal Feed Science and Technology*, 35(1–2), 161–169. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(91\)90107-4](https://doi.org/10.1016/0377-8401(91)90107-4)
- Drosg, B. (2013). Process monitoring in biogas plants. In *IEA Bioenergy*. [https://doi.org/retrieved on 15th~March 2017](https://doi.org/retrieved%20on%2015th~March%202017)
- Durán Ramírez, F. (2013). *Cultivo y explotación del Cacao*. Retrieved from https://books.google.com.pe/books/about/Cultivo_y_explotación_del_cacao.html?id=g9xzAQAACAAJ&redir_esc=y
- E.W. Rice, R.B. Baird, A. D. E. (2012). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd edition. In *Standard Methods*. [https://doi.org/ISBN 9780875532356](https://doi.org/ISBN%209780875532356)
- El-Mashad, H. M., Zeeman, G., Van Loon, W. K. P., Bot, G. P. A., & Lettinga, G. (2004). Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure. *Bioresource Technology*, 95(2), 191–201. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.07.013>
- Faas, L., Westwood, N. J., Rodriguez-Garcia, J., McQueen Mason, S., Hadley, P., Gomez, L., ... Van Damme, I. (2018). Valorisation strategies for cocoa pod husk and its fractions. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 14, 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.07.007>
- Fitch Solutions. (2018). Tougher Stance On Cocaine To Drive Cocoa Production In Peru. Retrieved March 12, 2019, from Fitch Solutions website: <https://www.fitchsolutions.com/corporates/commodities/tougher-stance-cocaine-drive-cocoa-production-peru-27-11-2018>

- Gavala, H. N., Yenal, U., Skiadas, I. V., Westermann, P., & Ahring, B. K. (2003). Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge. Effect of pre-treatment at elevated temperature. *Water Research*, 37(19), 4561–4572. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00401-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00401-9)
- Gerardi, M. H. (2003). The Microbiology of Anaerobic Digesters. In *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. <https://doi.org/10.1002/0471468967>
- Guevara, J. (2018). The Chocolate Fruit: Looking Inside a Cacao Pod. Retrieved March 17, 2019, from Perfect Daily Grind website: <https://www.perfectdailygrind.com/2018/02/chocolate-fruit-looking-inside-cacao-pod/>
- Guwy, A. J. (2004). Equipment used for testing anaerobic biodegradability and activity. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s11157-004-1290-0>
- INACAL. (2017). *NTP 208.040:2017 - CACAO Y CHOCOLATE. Buenas prácticas para la cosecha y beneficio.*
- Inclusive, A., & Systems, M. (2016). *Peru Cocoa Alliance Final Report An Inclusive Market Systems Approach to Alternative Development.* (October). Retrieved from www.usaid.gov/gda/global-development-alliance-annual-program
- International Cocoa Organization. (2010). *International Cocoa Agreement 2010* (p. 44). p. 44. Retrieved from https://www.icco.org/about-us/international-cocoa-agreements/doc_download/6-english-2010-international-cocoa-agreement.html
- Korres, N. E., Kiely, P. O., Jonathan, S. W., & Benzie, J. A. H. (2013). Bioenergy Anaerobic by Digestion and wastes: Using agricultural biomass and organic wastes. In *Routledge, Taylor & Francis Group*. Retrieved from https://books.google.com.my/books/about/Bioenergy_Production_by_Anaerobic_Digest.html?id=zpniXwAACAAJ&redir_esc=y
- Kozicka, M., Tacconi, F., Horna, D., & Gotor, E. (2018). *Forecasting cocoa yields for 2050.* <https://doi.org/https://hdl.handle.net/10568/93236>
- Kraemer, T., & Gamble, S. (2014). Integrating anaerobic digestion with composting. *BioCycle*, 55(10), 32–36. Retrieved from <https://www.biocycle.net/2014/11/18/integrating-anaerobic-digestion-with-composting/>
- León, J. C. (2018, March). El 93% de la producción peruana de cacao se concentra en 7 regiones. *Agencia Agraria de Noticias*, p. 2. Retrieved from <http://agraria.pe/noticias/el-93-de-la-produccion-peruana-de-cacao-se-concentra-en-7-re-16171>
- Lock, D. H. (2018). Potencial energético de los residuos de la cadena de valor del cacao (Theobroma Cacao) en la Región Madre de Dios. *Universidad Nacional Agraria La Molina*. Retrieved from <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3660>
- Lopes, S. A. F., Ferreira, H. I. S., Llamosas, Á., Romeu, A. P., Santana, H., Llamosas, A., & Pinheiro, A. (1985). Situação atual da utilização de subprodutos de cacau no Brasil. In *Boletim Técnico CEPLAC*. Bahia, Brasil.
- López, R. (2016). Desarrollo de un Modelo Matemático para la Fermentación del Cacao

- Criollo Blanco (Universidad de Piura). Retrieved from <http://repositorio.concytec.gob.pe/handle/CONCYTEC/231>
- Lubis, M., Gana, A., Maysarah, S., Ginting, M. H. S., & Harahap, M. B. (2018). Production of bioplastic from jackfruit seed starch (*Artocarpus heterophyllus*) reinforced with microcrystalline cellulose from cocoa pod husk (*Theobroma cacao* L.) using glycerol as plasticizer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/309/1/012100>
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource Technology*, 83(1), 47–54. [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(01\)00119-5](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(01)00119-5)
- MINAGRI. (2016). Estudio del cacao en el Perú y en el mundo. Retrieved from Dirección de Estudios Económicos e Información Agraria website: <http://www.minagri.gob.pe/portal/analisis-economico/analisis-2016?download=10169:estudio-del-cacao-en-el-peru-y-en-el-mundo>
- Motamayor, J. C., Lachenaud, P., da Silva e Mota, J. W., Loor, R., Kuhn, D. N., Brown, J. S., & Schnell, R. J. (2008). Geographic and genetic population differentiation of the Amazonian chocolate tree (*Theobroma cacao* L.). *PLoS ONE*, 3(10), e3311. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003311>
- National Energy Education Development. (n.d.). Biomass at a glance. Retrieved February 12, 2019, from National Energy Education Development website: [https://www.need.org/Files/curriculum/Energy At A Glance/BiomassAtAGlance_11x17.pdf](https://www.need.org/Files/curriculum/Energy%20At%20AGlance/BiomassAtAGlance_11x17.pdf)
- Nigam, P. S., & Singh, A. (2014). Cocoa and Coffee Fermentations. In *Encyclopedia of Food Microbiology: Second Edition* (pp. 485–492). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384730-0.00074-4>
- Novaes, R. F. V. (1986). Microbiology of anaerobic digestion. *Water Science and Technology*, 18(12), 1–14. <https://doi.org/10.2166/wst.1986.0159>
- Ogejo, J. A., Wen, Z., Ignosh, J., Bendfeldt, E., Collins, E. R., & Technology, B. (2009). Biomethane Technology. *Virginia Cooperative Extension*, (Publication 442-881), 1–11. Retrieved from <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/50131?show=full>
- Perú 21. (2017, January). 36% de la producción mundial de cacao se concentra en territorio nacional. Retrieved March 13, 2019, from Perú21 website: <https://peru21.pe/lima/36-produccion-mundial-cacao-concentra-territorio-nacional-65223>
- Pinho, S. C., Ratusznei, S. M., Rodrigues, J. A. D., Foresti, E., & Zaiat, M. (2004). Influence of the agitation rate on the treatment of partially soluble wastewater in anaerobic sequencing batch biofilm reactor. *Water Research*, 38(19), 4117–4124. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.08.015>
- Praveena, C., Karthikeyan, S., Kannan, J., Jegadeeswari, V., & Suresh, J. (2018). Studies on Composting of Cocoa (*Theobroma Cacao* L.) Pod Husk. *International Journal of Advanced Research*, 6(9), 1081–1085. <https://doi.org/10.21474/ijar01/7616>
- Sahito, A. R., & Siddiqui, Z. (2013). Estimating Calorific Values of Lignocellulosic Biomass From Estimating Calorific Values of Lignocellulosic Biomass From Volatile.

- International Journal of Biomass and Renewables*, 2(1), 1–6. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Rasool_Mahar2/publication/254559549_ESTIMATING_CALORIFIC_VALUES_OF_LIGNOCELLULOSIC_BIOMASS_FROM_VOLATILE_AND_FIXED_SOLIDS/links/54accc5b0cf23c69a2b84a0c.pdf
- Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S., & Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp. 2262–2289. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>
- Schwan, R. F., & Wheals, A. E. (2004). The microbiology of cocoa fermentation and its role in chocolate quality. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 44(4), 205–221. <https://doi.org/10.1080/10408690490464104>
- Seeking Alpha. (2015). Cocoa Beans Forecasted For \$2,800-\$2,999 | Seeking Alpha. Retrieved June 2, 2019, from Seeking Alpha website: <https://seekingalpha.com/article/3118396-cocoa-beans-forecasted-for-2800-2999>
- Sobamiwa, O., & Longe, O. G. (1994). Utilization of cocoa-pod pericarp fractions in broiler chick diets. *Animal Feed Science and Technology*, 47(3–4), 237–244. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(94\)90127-9](https://doi.org/10.1016/0377-8401(94)90127-9)
- Sullivan, D. (2012, March). Anaerobic Digestion In The Northwest. Retrieved February 19, 2019, from BioCycle website: <https://www.biocycle.net/2012/03/14/anaerobic-digestion-in-the-northwest/>
- Suryawanshi PC, Chaudhari AB, Bhardwaj S, & Yeole TY. (2013). Operating Procedures for Efficient Anaerobic Digester Operation. In *Res. J. Animal, Veterinary & Fishery Sci. International Science Congress Association* (Vol. 1). Retrieved from www.isca.in
- Syamsiro, M., Saptoadi, H., Tambunan, B. H., & Pambudi, N. A. (2012). A preliminary study on use of cocoa pod husk as a renewable source of energy in Indonesia. *Energy for Sustainable Development*, 16(1), 74–77. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.10.005>
- Tian, L., Zou, D., Yuan, H., Wang, L., Zhang, X., & Li, X. (2015). Identifying proper agitation interval to prevent floating layers formation of corn stover and improve biogas production in anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 186, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.018>
- Torres, M. (2012). Influencia de las características y procesado del grano de cacao en la composición físico-química y propiedades sensoriales del chocolate negro tesis doctoral (Universitat Rovira i Virgili). Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=102863>
- Varnero, M. T. (2011). Manual de Biogas. In *Manual de Biogas*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- VDI. (2006). Fermentation of organic materials - Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. *VDI-Richtlinien*. <https://doi.org/2006>
- Vriesmann, L. C., Teófilo, R. F., & Lúcia de Oliveira Petkowicz, C. (2012). Extraction and characterization of pectin from cacao pod husks (*Theobroma cacao* L.) with citric acid. *LWT - Food Science and Technology*, 49(1), 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.04.018>
- Ward-Doria, M., Arzuaga-Garrido, J., Ojeda, K. A., & Sánchez, E. (2016). Production of

- biogas from acid and alkaline pretreated cocoa pod husk (*Theobroma cacao* L.). *International Journal of ChemTech Research*, 9(11), 252–260.
- Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., & Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, Vol. 99, pp. 7928–7940. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.044>
- Yapo, B. M., & Koffi, K. L. (2013). Extraction and Characterization of Gelling and Emulsifying Pectin Fractions from Cacao Pod Husk. *Journal of Food and Nutrition Research*, 1(4), 46–51. <https://doi.org/10.12691/jfnr-1-4-3>
- Yenigün, O., & Demirel, B. (2013). Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review. *Process Biochemistry*, Vol. 48, pp. 901–911. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.04.012>
- Zamanzadeh, M., Hagen, L. H., Svensson, K., Linjordet, R., & Horn, S. J. (2016). Anaerobic digestion of food waste - Effect of recirculation and temperature on performance and microbiology. *Water Research*, 96, 246–254. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.058>
- Zinder, S. H. (1990). Conversion of acetic acid to methane by thermophiles. *FEMS Microbiology Letters*, 75(2–3), 125–137. [https://doi.org/10.1016/0378-1097\(90\)90527-W](https://doi.org/10.1016/0378-1097(90)90527-W)



Apéndices



Apéndice A. Métodos y procedimientos para determinación de sólidos totales y volátiles en materia orgánica

1. Introducción

La presente guía tiene como objetivo establecer los procedimientos estándares para la determinación del contenido de sólidos totales y sólidos volátiles de una muestra de materia orgánica por medio del método del secado en horno e incineración en mufla.

2. Equipos y materiales

- Horno de convección: Con capacidad de alcanzar una temperatura de 110 °C.
- Mufla: Con capacidad de alcanzar una temperatura de 550 °C.
- Desecador
- Desecante (gel de sílice) con indicador de humedad.
- Crisoles de porcelana o platillos de aluminio.
- Balanza de precisión
- Pinzas para crisoles
- Lápiz de grafito

3. Preparación

- Realizar la verificación de temperatura en los hornos, estos deben estar calibrados. Calíbrelos de ser necesario.
- El gel de sílice debe estar completamente seco. Siga las instrucciones indicadas por el fabricante para eliminar la humedad. Generalmente es por medio de calentamiento a 110 °C por 2 horas.
- Lavar los crisoles de porcelana o platillos de aluminio. Secarlos en el horno por una hora a 110 °C y colocarlos dentro del desecador.
- Calibrar la balanza de precisión. Siga las instrucciones del fabricante.

4. Determinación de sólidos totales

Los ensayos deben realizarse por duplicado o triplicado para garantizar la confiabilidad de los resultados.

- Etiquete y registre el peso de los crisoles (W_{crisol}). Para el etiquetado se recomienda la utilización de un lápiz de grafito. No usar plumones indelebles o similares.

- Tome una muestra de 30 a 50 gramos (aproximadamente) y colóquela sobre el plato de medición de la balanza. Utilice la función Tare de la balanza de precisión. Pese y registre el peso obtenido ($W_{muestra}$).
- Coloque la muestra en el horno a 105 °C y deje secar por 24 horas.
- Retire las muestras y colóquelas en el desecador. Utilice las pinzas para crisoles en este paso. Deje enfriar las muestras dentro del desecador cerrado por 15 minutos.
- Retire las muestras del desecador y realice el pesado de las mismas. Colocar nuevamente en el horno a 105 °C por 30 minutos y repetir el procedimiento de enfriamiento y pesado hasta obtener un peso constante. Registre el último peso obtenido como W_{105} .
- Calcular el contenido de sólidos totales utilizando la fórmula siguiente:

$$TS\% = \frac{W_{105} - W_{crisol}}{W_{muestra}} * 100$$

5. Determinación de sólidos volátiles

Para la determinación de los sólidos volátiles primero se realiza el procedimiento de determinación de sólidos volátiles y se prosigue con los siguientes pasos:

- Tome las muestras y colóquelas en la mufla a 550 °C durante 2 a 4 horas.
- Retire las muestras de la mufla y colóquelas en el desecador durante media hora para su enfriamiento. Utilice las pinzas para crisol.
- Determine el peso de las muestras y regístrelo como W_{550} .
- El contenido de sólidos volátiles puede determinarse usando la siguiente fórmula:

$$VS\% = \frac{W_{105} - W_{550}}{W_{muestra}} * 100$$

Apéndice B. Métodos y procedimientos para la determinación del potencial de biometano a partir de la biodigestión anaerobia de sustratos orgánicos

1. Introducción

La presente guía tiene como objetivo establecer una metodología y procedimientos estándares para la determinación del potencial de producción de biometano a partir de sustratos orgánicos por medio del proceso de biodigestión anaerobia, así como presentar sugerencias y recomendaciones para la ejecución del ensayo de potencial de biometano y la presentación e interpretación de los resultados obtenidos.

2. Definiciones

- **Ácidos grasos volátiles (AGV o VFA):** Biomolécula de naturaleza lipídica con cadenas carbonadas de menos de seis carbonos. Debido a esto son fácilmente volátiles. También son llamados ácidos grasos de cadena corta.
- **Condiciones anaerobias:** En ausencia de oxígeno libre molecular. Puede referirse también a la hermeticidad requerida, además de las temperaturas adecuadas y nivel de pH neutro requeridas para que se lleve a cabo satisfactoriamente la digestión anaerobia de materia orgánica.
- **Degradabilidad:** Potencial de un sustrato a ser degradado en condiciones anaerobias por organismos acidogénicos y metanogénicos para la obtención de biogás.
- **Demanda química de oxígeno (DQO o COD):** Una medida indicativa de la cantidad de oxígeno que pueden consumir las reacciones en una solución medida.
- **Desgasificación:** Etapa de no-alimentación e incubación a la que los lodos anaerobios son sometidos con el propósito de terminar de procesar materia orgánica que pueda estar aun presente en los lodos. Se expresa comúnmente en masa de oxígeno consumido por volumen de solución, que en unidades SI es miligramos por litro.
- **Mesofílico:** Referido a los microorganismos anaerobios adaptados al rango de temperaturas que van desde los 30°C hasta los 40°C. También puede referirse a este rango de temperatura.

- **Microorganismos anaerobios:** Grupo de bacterias y arqueas que solo pueden subsistir en ausencia de oxígeno.
- **Reactor anaerobio:** Recipiente hermético en el que ocurre el proceso de digestión anaerobia.
- **Termofílico:** Referido a los microorganismos anaerobios adaptados al rango de temperaturas que van desde los 45°C hasta los 60°C. También puede referirse a este rango de temperatura.
- **Sustrato:** Materia prima para el proceso de biodigestión anaerobia.
- **Sólidos totales (ST o TS):** Sólidos en una muestra que quedan luego de un proceso de secado a 105 °C.
- **Sólidos volátiles (SV o VS):** Sólidos en una muestra que se pierden en la ignición de los sólidos totales a 550°C.

3. Métodos y procedimientos propuestos

3.1. Sustrato

3.1.1. Caracterización. El sustrato ensayado debe caracterizarse lo más detalladamente posible, en general en términos de sólidos totales (TS) y sólidos volátiles (VS), además de determinar su demanda química de oxígeno (DQO o COD) y contenido de nitrógeno total. Algunos métodos estándar sugeridos para la caracterización del sustrato ensayado son listados en la **Tabla B.1.**

Tabla B.1. Métodos estándar para ensayos de caracterización de sustratos.

Ensayo	Estándar	Título
Sólidos totales	APHA 2540 B	Total solids dried at 103 –105°C
Sólidos volátiles	APHA 2540 E	Fixed and volatile solids ignited at 550°C
Demanda química de oxígeno	APHA 5220 B	Chemical oxygen demand (COD) “Open reflux method”
Nitrógeno total	APHA 4500-N _{org} B	Nitrogen (organic) “Macro-Kjeldahl method”

En el caso de sustratos orgánicos de origen vegetal, es deseable también la determinación de su contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, en especial debido a la no-degradabilidad de esta última.

Para el caso de sustratos provenientes de desechos ácidos se deben tomar precauciones en la determinación de los sólidos volátiles. Se recomienda incrementar el pH del sustrato para reducir la volatilidad de los ácidos grasos volátiles (AGV) con el fin de determinar de manera más precisa los sólidos volátiles. Para muestras de sustratos de elevada

volatilidad, la determinación de los sólidos totales debe realizarse con una temperatura máxima de 90°C en lugar de 105°C.

3.1.2. Trituración o tratamientos mecánicos. Para el caso de los sustratos orgánicos sólidos, y dependiendo de la homogeneidad del sustrato y su composición, es posible que el tamaño de las partículas que conforman el sustrato influya en la producción acumulada de metano. Sustratos lignocelulósicos son difíciles de hidrolizar, por lo que se sugiere un tratamiento mecánico adecuado, i.e. trituración o picado.

El tamaño de las partículas influye notablemente en la cinética de la degradación de los sustratos: a menor tamaño de partícula, mayor relación área superficial – volumen. Se recomienda que el tamaño de las partículas sea inferior a 10 milímetros.

3.2. Inóculo

3.2.1. Obtención. El inóculo debe ser lo más fresco posible y debe obtenerse de un reactor anaeróbico que se encuentre operando en el rango de temperatura adecuado, i.e. mesofílico o termofílico, dependiendo del rango de temperatura al que se llevará a cabo el ensayo. Se prefieren reactores que se encuentren procesando una mezcla variada de sustratos para asegurar la presencia de distintos tipos de microorganismos anaeróbicos y garantizar que los sustratos a ensayar no presenten limitaciones por inexistencia de microorganismos adecuados para su degradación.

La muestra de lodo anaerobio obtenida debe ser homogénea y libre de componentes extraños (e.g. piedras, ramas, madera) antes de ser utilizada. Durante el traslado del lodo anaerobio al lugar donde se llevarán a cabo los ensayos, se debe asegurar que las condiciones anaerobias se mantengan, en especial hermeticidad, pH y temperatura adecuada.

3.2.2. Almacenamiento. Para el almacenamiento de los lodos anaerobios se debe utilizar un recipiente o contenedor herméticamente sellado para garantizar que las condiciones anaerobias necesarias para la supervivencia de los microorganismos presentes en los lodos anaerobios. La temperatura de almacenamiento debe coincidir con los rangos de operación mesofílica o termofílica presentes en el reactor anaerobio de origen de los lodos.

De ser el caso, es preferible preparar un reactor de almacenamiento de lodos anaerobios, con temperatura controlada y sello hermético, además de contar con entradas

para biomasa y salidas de lodos y biogás. Este reactor debería alimentarse de manera periódica para permitir la reproducción de los microorganismos y garantizar una población bacteriana sostenible.

3.2.3. Desgasificación. Antes de su utilización, los lodos anaerobios deben ser *desgasificados*, esto es, sometidos a un periodo de incubación con el objetivo de terminar de procesar el material orgánico degradable residual que pueda encontrarse presente. La desgasificación debe ser llevada a cabo a la misma temperatura de operación que el reactor anaerobio de origen de los lodos anaerobios y hasta alcanzar una producción insignificante de biogás, usualmente lograda después de 3 a 7 días, dependiendo de la degradabilidad de la biomasa presente en los lodos anaerobios.

3.3. Instalación experimental

3.3.1. Montaje experimental. Existen diversas técnicas para la medición de la producción de biogás en un ensayo BMP, entre las que destacan principalmente dos métodos: el método volumétrico (desplazamiento de una solución barrera) y el método manométrico (variación de presión a volumen constante). En la presente guía de procedimientos estándar se empleará el método volumétrico.

El método volumétrico se basa en la medición del volumen desplazado por una solución barrera, generalmente de pH ácido, ocasionado por la producción de biogás a presión constante. Para la medición del volumen desplazado, se sugiere el montaje experimental mostrado en las figuras B.1 y B.2. Es importante asegurar la hermeticidad del montaje experimental pues es un factor influyente en la precisión del método.

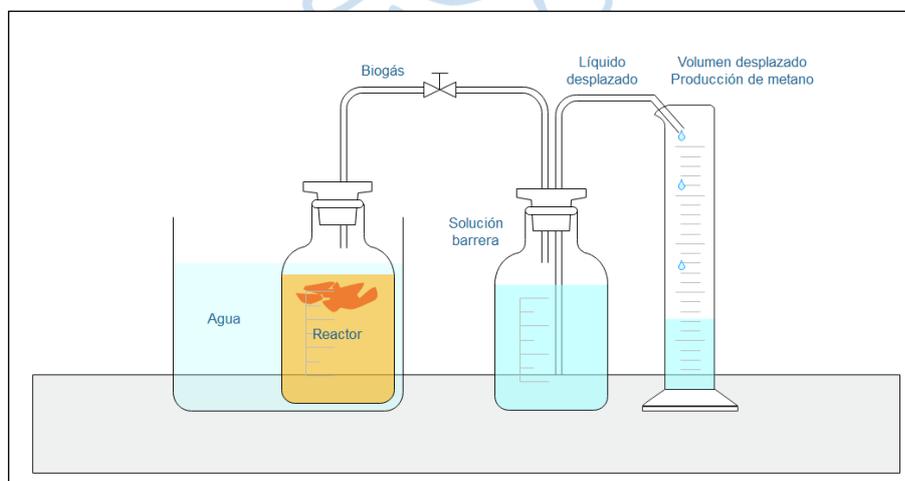


Figura B.1. Montaje experimental para medición de producción de biogás.

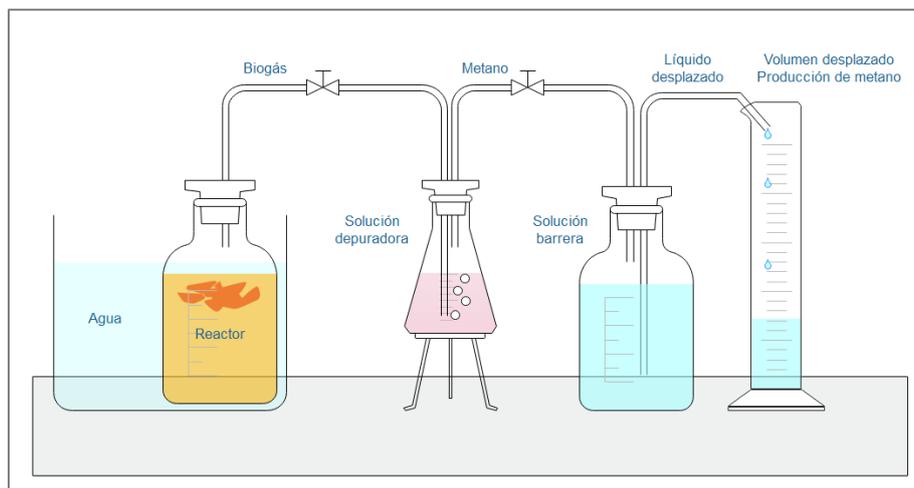


Figura B.2. Montaje experimental para medición de producción de biogás.

Para el reactor y el recipiente que contendrá la solución barrera se sugiere la utilización de un recipiente de 0.5 a 2 litros de capacidad. Estos pueden ser frascos Schott o similares con sellos herméticos para conservar las condiciones anaerobias y evitar fugas de biogás.

Para el recipiente que contendrá la solución depuradora en las líneas de medición de metano se sugiere un matraz de Erlenmeyer de 0.5 litros. El sello debe ser hermético.

La probeta graduada para la medición del volumen desplazado debe tener una capacidad similar o mayor a la capacidad del recipiente con solución barrera.

Para la conservación de la temperatura en las condiciones mesofílicas (37 °C) o termofílicas (55 °C) se sugiere utilizar un baño maría. Es importante que el nivel del baño este por encima del nivel de los reactores para asegurar que toda la mezcla se encuentre a la temperatura de incubación definida para el ensayo. Por lo tanto, el nivel del baño debe monitorearse durante todo el ensayo para compensar pérdidas de agua por efecto de evaporación.

Para la preparación de la muestra a ensayar y su inoculación se recomienda respetar la relación de sólidos volátiles:

$$\frac{VS_{sustrato}}{VS_{inóculo}} \leq 0.5$$

Además, se recomienda que los sólidos totales de la mezcla (sustrato + inóculo) no superen el 10% para evitar una sobrecarga orgánica de las bacterias durante el ensayo.

3.3.2. Soluciones barrera y depuradora. Para la preparación de las soluciones barrera y depuradora, en las tablas B.2 y B.3 se listan los reactivos o sustancias necesarios.

Tabla B.2. Materiales para preparación de solución barrera (1 litro)

Preparación de 1 L de solución barrera	
Cloruro de sodio	200 g.
Ácido cítrico	5 g.
Agua desionizada	1 L.

Tabla B.3. Materiales para preparación de solución depuradora (1 litro)

Preparación de 1 L de solución depuradora	
Dióxido de sodio	80 g.
Fenoltaleína	2 gotas
Agua desionizada	1 L.

3.3.3. Duplicados. El ensayo debe ser realizado al menos por duplicado por cada dilución o mezcla de sustratos ensayados para garantizar reproducibilidad y significancia estadística, aunque se sugiere realizarlo por triplicado.

La cantidad mínima de duplicados necesarios depende de la heterogeneidad del sustrato y confiabilidad de las mediciones, siendo incluso necesario una mayor cantidad mínima de ensayos para sustratos muy heterogéneos.

Para sustratos no ensayados previamente, el ensayo debe realizarse a diferentes niveles de dilución en agua, para evitar la obtención de resultados erróneos de potencial de metano por sobrecarga orgánica o inhibición.

3.3.4. Blancos analíticos. Para garantizar que la producción de metano medida por el ensayo corresponde únicamente a la degradación del sustrato y no a carga orgánica residual que pudiera existir en el inóculo empleado se utiliza el ensayo de blancos.

El blanco analítico debe prepararse bajo las mismas condiciones que el sustrato ensayado con la salvedad que no se emplea ningún sustrato orgánico en su preparación, solo inóculo y agua.

La producción obtenida en el blanco analítico, si llegara a obtenerse producción, debe ser restada de la producción obtenida en los ensayos con sustrato.

Es recomendable realizar el ensayo de blanco analítico por duplicado o triplicado para garantizar reproducibilidad y significancia estadística.

3.3.5. Referencia analítica. Para propósitos de control y referencia, se realiza también un ensayo de control. La preparación del ensayo de control debe ser similar al sustrato ensayado con la salvedad que se utiliza un sustrato de referencia en lugar del sustrato analizado. De preferencia, el sustrato de referencia debe ser celulosa, cuando se están realizando ensayos en sustratos de origen vegetal o gelatina para el caso de ensayos en sustratos de origen animal como carnes, pescado y desechos similares.

Cuando la muestra de referencia es celulosa microcristalina, una cantidad de entre 740 y 750 ml por gramo de sólidos volátiles puede ser producida. El 80% de este valor teórico debe ser alcanzado por la muestra de referencia analítica.

Otros sustratos de referencia pueden ser el acetato el cual también es 100% degradable en condiciones anaeróbicas.

Así mismo, se recomienda realizar el ensayo de control por duplicado o triplicado para garantizar reproducibilidad y significancia estadística.

3.3.6. Mezclado. El mezclado facilita el contacto entre las bacterias y los sustratos, previniendo la acumulación de sustrato o sustancias intermediarias, como los AGV, en el medio anaerobio. El mezclado puede ser intermitente, e.g. una vez al día, o continuo. La frecuencia del mezclado es un parámetro importante en el estudio cinético de la degradabilidad de los sustratos y debe ser reportado en los resultados obtenidos en el ensayo.

3.4. Registro de datos. El registro de la producción diaria de biogás y metano del ensayo BMP debe realizarse como mínimo con una frecuencia diaria, aunque se sugiere toma de datos dos veces al día. Los datos que deben ser registrados son hora de muestreo, identificador de ensayo, volumen desplazado, temperatura y presión; así como cualquier otro dato o comentario que se considere pertinente

La prueba debe continuarse hasta que se alcanza una producción diaria de biogás insignificante. El criterio para poner fin a la prueba es cuando la producción diaria de biogás equivale únicamente al 1 % del volumen total de biogás producido hasta ese momento. Generalmente, la mayoría del biogás se forma en la primera semana del ensayo BMP y la duración del ensayo es de entre 20 y 40 días.

3.5. Resultados. Para la presentación de los resultados deben seguirse ciertas pautas y recomendaciones listadas a continuación para garantizar consistencia y comparabilidad con los datos encontrados en la bibliografía.

3.5.1. Presentación. Las mediciones de producción de biogás y metano deben ser normalizadas y presentadas en condiciones estándar de temperatura y presión, utilizando la fórmula que se muestra a continuación:

$$V_{normal} = V_{medido} * \frac{(p - p_{vapor\ agua}) * 273\ K}{1013\ mbar * T}$$

Donde

V_{normal} es el volumen normalizado.

V_{medido} es el volumen medido y registrado en el ensayo BMP.

p es la presión medida en milibares.

$p_{vapor\ agua}$ es la presión parcial de vapor de agua a la temperatura T.

T es la temperatura registrada en el ensayo BMP.

La temperatura T y la presión p hacen referencia al biogás y pueden tomarse iguales a la temperatura y presión del ambiente en el que se está realizando el ensayo BMP con un margen de error muy pequeño. La presión parcial de vapor de agua puede obtenerse del apéndice E.

Para la determinación de la producción específica por kilogramo de sólidos volátiles se puede utilizar la ecuación descrita a continuación:

$$B_u = \frac{100 * \sum V_n}{m_{sustrato} * VS_{sustrato}\%}$$

Donde

B_u es la producción específica de metano

V_n es el volumen normalizado de metano producido diariamente en litros

$m_{sustrato}$ es la masa del sustrato en kilogramos

$VS_{sustrato}\%$ es el porcentaje de sólidos volátiles del sustrato

Los resultados deben presentarse por ensayo y siempre deben ir acompañados de una descripción detallada y clara de la fuente del inóculo, sustrato o sustratos ensayados, composición del sustrato y dilución. Se presentan además los resultados de los perfiles de producción de metano y biogás respecto al tiempo, tanto la producción diaria como acumulada, así como la producción de los ensayos de blancos analíticos y sustratos de referencia.

Considerar además presentar la fecha de inicio y fin del experimento, así como las condiciones experimentales del ensayo. Se brinda como ejemplo, en el apéndice C, un reporte de resultados general de un ensayo BMP, el mismo que puede ser usado como guía para la presentación de resultados.



Apéndice E. Presión parcial de vapor de agua en función de la temperatura

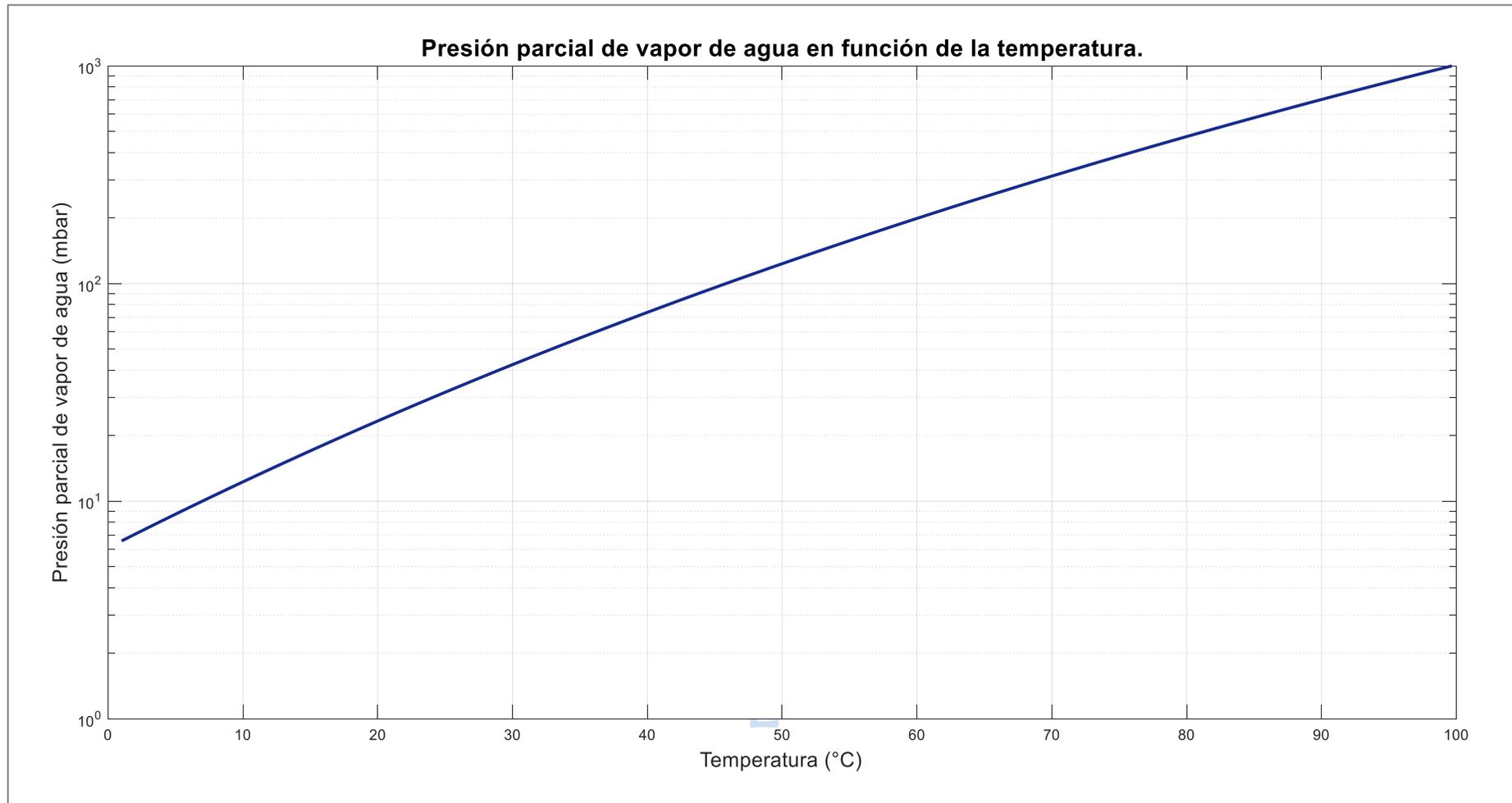


Figura E.1. Presión parcial de vapor de agua en función de la temperatura. Fuente: Elaboración propia a partir de la ecuación de Buck.