



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Doctorado en Cambio Climático y Sostenibilidad

**CODIGESTIÓN DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS
CON LODOS PRIMARIOS PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y METANO Y SU
MODELACIÓN**

Energías Renovables

Mtro. Rolando David Aguilar Muñoz

Asesorado por el Dr. Germán Buitrón Méndez

Guatemala, abril de 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CODIGESTIÓN DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS
CON LODOS PRIMARIOS PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y METANO Y SU
MODELACIÓN**

TRABAJO DE TESIS

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MTRO. ROLANDO DAVID AGUILAR MUÑOZ
ASESORADO POR EL DR. GERMÁN BUITRÓN MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
DOCTOR EN CAMBIO CLIMÁTICO Y SOSTENIBILIDAD

GUATEMALA, ABRIL DE 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Ing. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE DEFENSA DE TESIS

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
EXAMINADOR	Dr. Dennis Salvador Argueta Mayorga
EXAMINADOR	Dr. José Luis Argueta Mayorga
EXAMINADORA	Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CODIGESTIÓN DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS CON LODOS PRIMARIOS PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y METANO Y SU MODELACIÓN

Tema que me fuera aprobado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 28 de noviembre de 2023.

Mtro. Rolando David Aguilar Muñoz

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, overlapping loops and lines, positioned above the printed name.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102

secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.136.2024

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **CODIGESTIÓN DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS CON LODOS PRIMARIOS PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y METANO Y SU MODELACIÓN**, presentado por: **Mtro. Rolando David Aguilar Muñoz**, que pertenece al programa de Doctorado en Cambio Climático y Sostenibilidad después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. José Francisco Gómez Rivera

Decano a.i.



Guatemala, abril de 2024

JFGR/gaoc



Guatemala, abril de 2024

LNG.EEP.OI.136.2024

En mi calidad de Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Doctorado y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

**“CODIGESTIÓN DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS
SÓLIDOS URBANOS CON LODOS PRIMARIOS PARA LA
PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y METANO Y SU MODELACIÓN”**

presentado por **Mtro. Rolando David Aguilar Muñoz** correspondiente al programa de **Doctorado en Cambio Climático y Sostenibilidad** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





Guatemala 13 de noviembre 2023.

M.A. Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

M.A. Ingeniera Cordova:

Por este medio informo que he revisado y aprobado la tesis titulada "CODIGESTIÓN DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS CON LODOS PRIMARIOS PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y METANO Y SU MODELACIÓN" y artículo científico titulado "*Hydrogen and methane production through the codigestion of primary sludge and the organic fraction of solid waste*" del estudiante del programa de **Doctorado en Cambio Climático y Sostenibilidad** ROLANDO DAVID AGUILAR MUÑOZ, quien se identifica con número de carné 100022011.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el *Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014*. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,

Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Coordinadora de Doctorado
Escuela de Estudios de Postgrado



**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**

**Laboratorio de Investigación en
Procesos Avanzados de Tratamiento de Aguas
Unidad Académica Juriquilla**

Santiago de Querétaro, a 18 de octubre de 2023

**Programa de doctorado en Cambio Climático y Sostenibilidad
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
PRESENTE**

En mi calidad como Asesor del Maestro en Ingeniería Sanitaria **Rolando David Aguilar Muñoz** doy el aval correspondiente para la aprobación de la Tesis Doctoral titulada *“Codigestión de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos con lodos primarios para la producción de hidrógeno y metano y su modelación”* quien se encuentra en el programa de Doctorado en Cambio Climático y Sostenibilidad en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

Dr. Germán Buitrón Méndez
Investigador Titular C
Subdirector de Unidades Académicas Foráneas.

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Porque eres el único merecedor de todo Padre Santo. Porque eres quien da todo el conocimiento y sabiduría para ejercerlo, así como las fuerzas necesarias para llevar a cabo todas las cosas. A Ti toda la gloria, Amén.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Gracias Padre por tu guía y fuerzas, gracias por todo.
Mi esposa	Gracias Rocío por ser mi ayuda idónea, tu apoyo incondicional fue valioso para el desarrollo de este trabajo.
Padres y hermanos	Madre, gracias por su ejemplo de superación y valentía, gracias por el sentido de excelencia que siempre me inculcó. Padre, gracias por el ejemplo de orden y disciplina. Hermanos, gracias por formar parte de mi vida y por ser mis compañeros de crecimiento y aprendizaje. A todos con sincero amor.
Mis compañeros	Gracias compañeros por la amistad y experiencias que compartimos durante esta expedición. Se agradece a Javier Saravia por su asesoría en técnicas de ciencia de datos. Se agradece a Eduardo Hernández por su hospitalidad, apoyo y compañerismo.
Mis tutores	Gracias por el conocimiento transmitido en cada una de las asignaciones. Gracias por dedicar su vida a la docencia y enseñanza para formar

profesionales y contribuir de esa forma a la sociedad. Se agradece al Dr. Alfredo Gálvez y a la Dra. Mayra Castillo por su asesoría a lo largo de toda la investigación.

Dr. Germán Buitrón

Muchas gracias por su asesoría en todo el proceso de la investigación, así como por abrirme las puertas de LIPTATA, y por su hospitalidad. Su apoyo fue fundamental para el desarrollo de la investigación.

UNAM

La parte experimental de esta tesis se realizó en el Laboratorio de Investigación en Procesos Avanzados de Tratamiento de Aguas -LIPATA-, Unidad Académica Juriquilla, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus UNAM Juriquilla, Santiago de Querétaro, México. Se agradecen los recursos financieros del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro (proyecto CACTI/90/2022) y del Instituto de Ingeniería, UNAM (GII proyecto No. 3406). Se agradece el apoyo técnico de la M. en C. Gloria Moreno y al M. en B. Jaime Pérez por su asistencia técnica en la fase experimental de esta tesis.

USAC

Se agradece a la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería por el apoyo dado a esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XVII
OBJETIVOS.....	XXI
HIPÓTESIS.....	XXIII
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO.....	XXV
INTRODUCCIÓN	XXXVII
1. ESTADO DEL ARTE.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Análisis crítico y discusión de literatura	2
1.2.1. Biocombustibles gaseosos: hidrógeno y metano.....	3
1.2.1.1. Gas metano.....	3
1.2.1.2. Hidrógeno.....	3
1.2.2. Efectos de las propiedades fisicoquímicas y bromatológicas.....	4
1.2.3. Efecto de la codigestión de la FORSU sobre la producción de biocombustibles gaseosos	7
1.2.4. Separación de la digestión anaerobia en dos etapas	9
1.2.4.1. El papel de la codigestión en digestión anaerobia en dos etapas	13

1.2.5.	Modelos para predicción de biocombustibles gaseosos con digestión anaerobia	13
1.3.	Síntesis conclusiva	14
2.	MARCO TEÓRICO	17
2.1.	Residuos sólidos urbanos (RSU).....	17
2.2.	Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU).....	17
2.2.1.	Constituyentes y origen	17
2.2.2.	Categorización de los constituyentes	18
2.2.3.	Parámetros bromatológicos y fisicoquímicos.....	18
2.2.3.1.	Parámetros bromatológicos	19
2.2.3.1.1.	Carbohidratos.....	19
2.2.3.1.2.	Proteínas.....	20
2.2.3.1.3.	Lípidos.....	20
2.2.3.2.	Parámetros fisicoquímicos de la FORSU	21
2.3.	Proceso de digestión anaerobia	22
2.3.1.	Proceso anaerobio de dos etapas	22
2.3.2.	Codigestión anaerobia de la FORSU.....	24
2.4.	Producción de biocombustibles gaseosos con la FORSU.....	25
2.4.1.	Potencial energético	25
2.4.1.1.	Hidrógeno.	25
2.4.1.2.	Metano en la naturaleza y sus reacciones.....	26
2.4.1.3.	Metano como biocombustible gaseoso	27
2.4.1.4.	Metano como gas de efecto invernadero	27

3.	METODOLOGÍA	29
3.1.	Muestras de la FORSU	29
3.2.	Preparación de las mezclas de la FORSU.....	29
3.3.	Lodo primario (LP)	32
3.4.	Inóculo.....	34
3.5.	Métodos de determinación de parámetros bromatológicos y físicoquímicos.....	34
3.6.	Determinación de los ácidos grasos volátiles (AGVs)	35
3.7.	Determinación de la composición del biogás.....	35
3.8.	Determinación del potencial biológico de producción de hidrógeno y metano	36
3.9.	Cálculos y métodos estadísticos.....	37
4.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	43
4.1.	Producción de biocombustibles gaseosos (hidrógeno y metano) a partir de la FORSU y LP en monodigestión.....	43
4.1.1.	Caracterización de la FORSU y LP.....	43
4.1.2.	Producción de biohidrógeno y biometano producto de la monodigestión	45
4.2.	Producción de biocombustibles gaseosos (hidrógeno y	
	metano) a partir de la FORSU en codigestión con LP.	47
4.2.1.	Caracterización de los cosustratos a partir de la FORSU y LP	47
4.2.2.	Producción de biohidrógeno y biometano producto de la codigestión	48
4.3.	Análisis estadístico de resultados: correlación entre variables y modelo predictor	50
4.3.1.	Resultados de cálculos de varianza.....	50
4.3.2.	Resultados del cálculo de correlaciones.....	51

4.3.3.	Resultados de los modelos de regresión.....	52
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	57
5.1.	Producción de biocombustibles gaseosos (hidrógeno y metano) a partir de la FORSU y LP en monodigestión.....	57
5.1.1.	Características de las mezclas de la FORSU.....	57
5.1.2.	Características del lodo primario (LP).....	59
5.1.3.	Características del cosustrato FORSU: LP.....	61
5.1.4.	Potencial de biohidrógeno (PBH) en monodigestión.....	61
5.1.5.	Potencial de biometano (PBM) en monodigestión..	64
5.2.	Producción de biocombustibles gaseosos (hidrógeno y metano) a partir de la FORSU y LP en codigestión.....	67
5.2.1.	Potencial de biohidrógeno (PBH) a partir de codigestion.....	67
5.2.2.	Potencial de biometano (PBM) a partir de codigestión.....	70
5.3.	Análisis estadístico de resultados: correlación entre variables y aplicación de modelo matemático	73
5.3.1.	Correlaciones entre las variables CARB, PROTEINA y LIPIDOS de los monosustratos con el PBH y PBM.	73
5.3.2.	Correlaciones entre CARB, PROTEINA y LIPIDOS de los cosustratos con el PBH y PMB.	76
5.3.3.	Resultados de PBH y PBM con la aplicación de un modelo matemático.....	79
6.	ALCANCES Y LIMITACIONES.....	87

CONCLUSIONES	89
RECOMENDACIONES.....	91
REFERENCIAS	93
APÉNDICES	113

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Esquema metodológico según las fases y objetivos de la investigación.....	XXV
Figura 2.	Categorización de los desperdicios de alimentos según el sistema Greenfinch	XXIX
Figura 3 .	Equipo AMPTS II	XXXIV
Figura 4.	Proceso de digestión anaerobia según sus principales y grupos de bacterias	12
Figura 5.	Proceso de codigestión anaerobia en dos etapas para determinar el PBH y PBM.....	16
Figura 6.	Preparación de mezclas de la FORSU.....	30
Figura 7.	Sedimentador primario de la PTAR del Campus UNAM Juriquilla, Querétaro	33
Figura 8.	Proceso de caracterización de los lodos primarios	45
Figura 9.	Esquema de las unidades de tratamiento de aguas residuales	59
Figura 10.	PBH y porcentaje de hidrógeno producido por cada mezcla de la FORSU en cada ensayo.....	62
Figura 11.	Porcentaje de hidrógeno tomado a las 16h y 20h en ensayos de monodigestión	64
Figura 12.	PBM y porcentaje de hidrógeno producido por cada mezcla de la FORSU en cada ensayo.....	65
Figura 13.	Porcentaje de metano en el biogás para los ensayos de digestión anaerobia	66

Figura 14.	Porcentaje de hidrógeno tomado a las 16h y 20h en ensayos de codigestión	69
Figura 15.	Porcentaje de metano en el biogás para los ensayos de digestión anaerobia	71
Figura 16.	Resultados de correlación entre mezclas de la FORSU con el PBH y PBM	74
Figura 17.	Correlación entre mezclas de cosustrato FORSU:LP con el PBH y PBM	77

TABLAS

Tabla 1.	Definición teórica y práctica de las variables del estudio	XXX
Tabla 2.	Condiciones de operación de la fermentación y metanogénesis	XXXV
Tabla 3.	Constituyentes de las mezclas de FORSU	30
Tabla 4.	Nombre de variables a los parámetros bromatológicos biocombustibles	38
Tabla 5.	Matriz de variables dependientes e independientes	39
Tabla 6.	Transformación de variables categóricas a variables numéricas	40
Tabla 7.	Modelos de regresión según inclusión de las variables independientes	41
Tabla 8.	Modelos de regresión para PBH según inclusión de las variables independientes	42
Tabla 9.	Caracterización fisicoquímica de las mezclas de la FORSU y de lodo primario	43
Tabla 10 .	Caracterización fisicoquímica y componentes traza de metales en el LP	44

Tabla 11.	Condiciones operativas para la fermentación y metanogénesis en monodigestión.....	46
Tabla 12.	Resultados del PBH y PBM de cada ensayo en monodigestión	47
Tabla 13.	Caracterización fisicoquímica de las mezclas de la FORSU con lodo primario	48
Tabla 14.	Condiciones operativas en la fermentación y metanogénesis en cada codigestión.....	49
Tabla 15.	Resultados del PBH y PBM de cada ensayo de codigestión	50
Tabla 16.	Varianza de las variables independientes	51
Tabla 17.	Correlaciones entre principales variables independientes	52
Tabla 18.	R^2 ajustado según la inclusión de variables independientes al modelo regresor	52
Tabla 19.	R^2 ajustado según el aumento de grado polinomial en la variable independiente	53
Tabla 20.	Coeficientes de cada variable independiente, resultado de una regresión múltiple	53
Tabla 21.	Coeficientes de la variable independiente PBH para cada grado polinomial	54
Tabla 22.	Comparación de caracterización de la FORSU sintética con otros estudios	58
Tabla 23.	Comparación de caracterización de lodo primario con otros estudios	60
Tabla 24.	Ecuaciones desarrolladas a partir de la aplicación de un modelo matemático	80
Tabla 25.	Resultados de PBH proyectados con la Ecuación 1	81
Tabla 26.	Resultados de PBM proyectados con la Ecuación 2.....	84

LISTA DE SÍMBOLOS

H₂S	Ácido sulfhídrico
C₄H₁₀	Butano
CaCO₃	Carbonato de calcio
COT	Carbono orgánico total
C	Carbono
DQO	Demanda química de oxígeno
CO₂	Dióxido de carbono
PT	Fósforo total
CH₄	Gas metano
H₂	Hidrógeno gas
NaOH	Hidróxido de sodio
LP	Lodo primario
NH₄	Nitrógeno amoniacal
N₂	Nitrógeno gas
NTK	Nitrógeno Kjeldahl
N	Nitrógeno
OLR	<i>Organic loading rate</i> (carga orgánica volumétrica, por sus siglas en inglés)
PBH	Potencial de biohidrógeno
PBM	Potencial de biometano
pH	Potencial de hidrógeno
C₃H₈	Propano
RSU	Residuos sólidos urbanos
SF	Sólidos fijos
ST	Sólidos totales

SV	Sólidos volátiles
T	Temperatura
TRH	Tiempo de retención hidráulico

GLOSARIO

Codigestión	Cuando se lleva a cabo el proceso de digestión anaerobia de un cosustrato.
Cosustrato	Se le llama así a la mezcla de dos o más sustratos.
Digestión anaerobia	Proceso biológico en el que se lleva a cabo la oxidación de diferentes compuestos de una sustancia orgánica a través de un metabolismo en ausencia de oxígeno.
Fermentación	Proceso biológico que sucede en la primera etapa de la digestión anaerobia.
LIPATA	Laboratorio de Investigación de Procesos Avanzados en Tratamiento del Agua
Lodo de purga	Lodos retenidos en las unidades de tratamiento de una planta de aguas residuales y que son descartados para su gestión y disposición final.
Lodos primarios	Materia orgánica removida utilizando separación física a través de sedimentación o flotación, en la etapa de tratamiento primario de una planta de tratamiento de aguas residuales.

Metano	Gas incoloro, inodoro, y es un compuesto principal del gas natural.
Metanogénesis	Proceso biológico que sucede en la segunda etapa de la digestión anaerobia.
Monodigestión	Cuando se lleva a cabo el proceso de digestión anaerobia de un sustrato.
Parámetros bromatológicos	Definen la composición orgánica de un residuo en sus tres principales categorías que son: carbohidratos, lípidos y proteínas.
Ruta acetotrófica	Ruta metabólica de la digestión anaerobia a través de la cual se lleva a cabo la formación de gas metano a partir de acetato.
Ruta hidrogenotrófica	Ruta metabólica de la digestión anaerobia a través de la cual se lleva a cabo la formación de gas metano a partir de hidrógeno.
Sustrato	Es una sustancia utilizada para la realización de un ensayo experimental. En estudios de digestión anaerobia suele llamársele así al residuo orgánico objeto de estudio.
UNAM	Universidad Autónoma de México

RESUMEN

La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) y lodos primarios (LP) provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales son dos tipos de residuos ordinarios que comúnmente tienen un manejo inadecuado en la actualidad de países en desarrollo. Impulsar proyectos de biorrefinería a través de la digestión anaerobia para producción de biocombustibles gaseosos puede ser una estrategia viable para mitigar la contaminación producida por el mal manejo de dichos residuos.

Las principales estrategias para comprender el proceso de digestión anaerobia incluyen la evaluación de la composición de la FORSU, principalmente en contenido de carbohidratos, lípidos y proteínas, la aplicación de cosustrato para codigestión, así como el rol de la separación de la digestión anaerobia en dos etapas. Por lo anterior, en este estudio se preparó una investigación para evaluar el efecto de la composición de la FORSU en codigestión con lodos primarios en un proceso anaerobio de dos etapas.

Se realizó análisis estadístico para analizar la correlación de la composición de la FORSU con la producción de hidrógeno y metano. Posteriormente se aplicó un modelo de regresión para la predicción de dichos biocombustibles. Los resultados mostraron que en cuanto al potencial de biohidrógeno (PBH), la mayor correlación la tiene la variable carbohidratos y la menor correlación con el PBH se da para la variable proteína. En contraste, en cuanto al potencial bioquímico de metano (PBM), la variable proteína es la que

muestra mayor significancia estadística. Los modelos aplicados a partir de los datos experimentales obtenidos en este estudio permiten la predicción del PBH con un error de porcentaje medio absoluto del 21 % y del PBM con un 5.13 %.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- Descripción del problema

Se ha observado que utilizar la digestión anaerobia para producción de biocombustibles gaseosos (hidrógeno y metano) a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), presenta varios retos debido a que su composición es sumamente variable, sus constituyentes están en función de la región que la genera; a la cultura y hábitos de consumo, a la interrelación entre crecimiento económico y urbanización, tamaño de la población, clima, clase social, y varía además, a lo largo del tiempo y cambios de temporada anual, por ello, la FORSU por sí sola, es un sustrato complejo y presenta dificultades para brindar estabilidad al proceso de digestión anaerobia(Njuguna et al., 2018).

Las tendencias identificadas en cuanto a digestión anaerobia con FORSU buscan investigar factores que brinden estabilidad a dicho proceso. Entre las tendencias están el estudio de los efectos de la composición bromatológica, la codigestión y la digestión anaerobia en dos etapas. Estas tendencias han sido reportadas en varios estudios como elementos que aportan estabilidad a la digestión anaerobia de la FORSU, así como también disminuyen la incertidumbre sobre la predicción del resultado (Alibardi y Cossu, 2015; Chatterjee y Mazumder, 2019; Elalami et al., 2019).

En relación con las tendencias encontradas, se identifica la necesidad de conocer el efecto de los carbohidratos, lípidos y proteínas de la FORSU con una proporción de lodos primarios; sobre el potencial de hidrógeno y metano a través

de codigestión anaerobia, así como determinar su correlación, y predicción a través de la aplicación de un modelo matemático.

- Formulación del problema

A partir de este planteamiento, se formulan las siguientes preguntas de investigación:

- Pregunta central

¿Cuál es el efecto sobre el potencial de hidrógeno y metano según la variación en la concentración de carbohidratos, lípidos y proteínas de la FORSU, y la proporción de lodos primarios, durante codigestión anaerobia, así como su correlación, y predicción a través de la aplicación de un modelo matemático?

- Preguntas auxiliares

- ¿Cuál es el efecto sobre el potencial de hidrógeno y metano según varía la concentración de carbohidratos, lípidos y proteínas de la FORSU a través de digestión anaerobia en monodigestión?
- ¿Cuál es el efecto sobre el potencial de hidrógeno y metano según varía la concentración de carbohidratos, lípidos y proteínas de la FORSU y de una proporción de lodos primarios en codigestión anaerobia?
- Para la FORSU, con y sin proporción de lodos primarios, ¿Cuál es el nivel de correlación entre la concentración de carbohidratos, lípidos y proteínas y el potencial de hidrógeno y metano?

- ¿Se puede aplicar un modelo matemático para la predicción del potencial de biohidrógeno y biometano?
- Delimitación del problema

A continuación, se hace la delimitación del problema desde el ámbito histórico.

- Delimitación histórica

La codigestión anaerobia ha sido estudiada desde la década de 1970 como mecanismo para proporcionar estabilidad a los procesos anaerobios. Se encontraron estudios sobre la digestión anaerobia de la FORSU a partir de la década de 1990, resultado de la creciente problemática ambiental que los residuos sólidos urbanos (RSU) estaban ocasionando a nivel global (Kiely et al., 1997; Demirekler y Anderson, 1998).

Desde entonces, esfuerzos por determinar elementos que aporten estabilidad a la digestión anaerobia de la FORSU han sido llevados a cabo, tales como el entender su composición bromatológica y las causas de su variabilidad, experimentación de codigestión con diversos cosustratos orgánicos y aplicación de diferentes tipos de pretratamiento (mecánicos, termoquímicos o biológicos). Se han implementado exitosamente proyectos a escala industrial para producir energía a partir de la FORSU; como lo es el caso del sistema implementado en el relleno sanitario de Río de Janeiro, Brasil, que recibe 23.5 t/d de FORSU, estudiado por Ornelas-Ferreira et al. (2020), en donde la producción de metano fue efectivamente utilizada para reemplazar el combustible de los camiones recolectores. Así mismo, en el estudio de Dehkordi et al. (2020) se reporta la

producción de 322. Nm³ /t SV a partir de la FORSU que recibe la planta municipal de residuos sólidos de Isfahan en Irán.

Por lo tanto, se espera que al resolver problemas alrededor de la digestión anaerobia de la FORSU, se fomente la formulación de proyectos de aprovechamiento de la FORSU para producción de energía renovable y sustitución de fuentes fósiles.

OBJETIVOS

General

Explicar el efecto sobre el potencial de hidrógeno y metano según varía la concentración de carbohidratos, lípidos y proteínas de la FORSU con una proporción de lodos primarios a través de codigestión anaerobia, y determinar los coeficientes que permitan su predicción con la aplicación de un modelo matemático.

Específicos

1. Determinar experimentalmente el efecto sobre el potencial de hidrógeno y metano según varía la concentración de carbohidratos, lípidos y proteínas de la FORSU a través de monodigestión anaerobia para establecer una línea base de referencia.
2. Determinar experimentalmente el efecto sobre el potencial de hidrógeno y metano según varía la concentración de carbohidratos, lípidos y proteínas de la FORSU con una proporción de lodos primarios a través de codigestión anaerobia.
3. Calcular la correlación entre la concentración de carbohidratos, lípidos y proteínas de la FORSU, con y sin proporción de lodos primarios, sobre el potencial de hidrógeno y metano, para explicar su efecto sobre la variación.

4. Aplicar un modelo matemático para la predicción del potencial de biohidrógeno y biometano, y su validación.

HIPÓTESIS

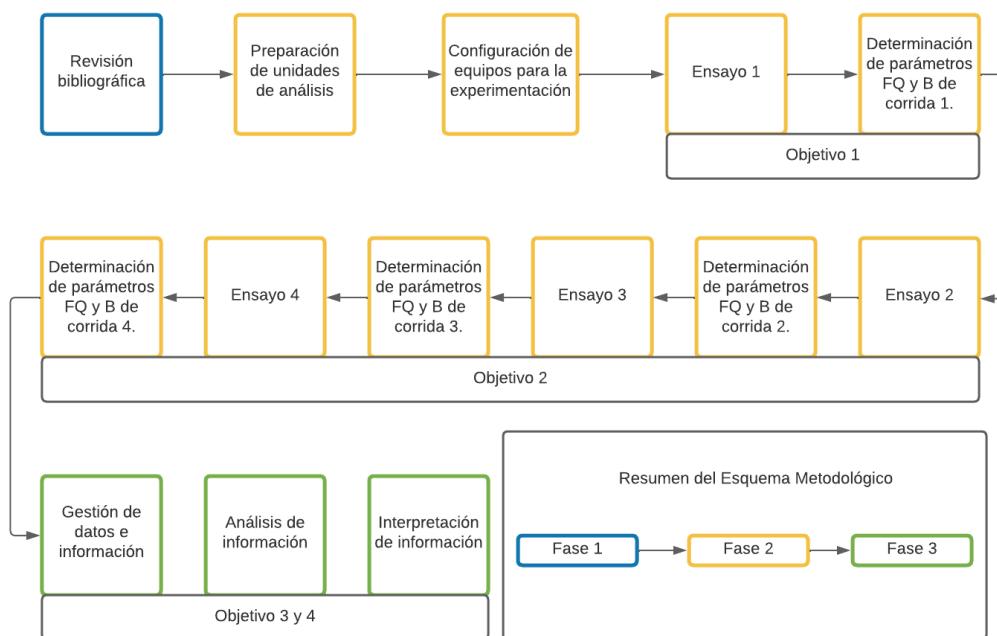
El potencial de hidrógeno y metano mediante la codigestión anaerobia en presencia de lodos primarios es una función que depende del efecto de la variación en la concentración de carbohidratos, lípidos y proteínas de la FORSU, y puede predecirse a través de la aplicación de un modelo matemático.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

A continuación, se hace la descripción de la metodología utilizada para la realización de la investigación y que se ilustra en la Figura 1.

Figura 1.

Esquema metodológico según las fases y objetivos de la investigación



Nota. El esquema muestra las fases de la metodología de la investigación de acuerdo con los objetivos planteados. FQ=fisicoquímicos, B=bromatológicos. Elaboración propia, realizado con Lucidchart.

- Características de la investigación

Se realizó una investigación con enfoque cuantitativo, en donde se determinó resultados para las variables dependientes, potencial de biohidrógeno y biometano, en función de las variables independientes carbohidratos, lípidos y proteínas.

El alcance es explicativo-correlacional, dado que, a través de ensayos experimentales, se midió el efecto que tiene la composición bromatológica de la FORSU, (concentración de carbohidratos, lípidos, y proteínas) como variables independientes, sobre la producción de biocombustibles gaseosos (potencial de biohidrógeno y biometano), variables respuesta, a través de la codigestión anaerobia en dos etapas con una proporción de lodos primarios. Los resultados de los ensayos proporcionaron datos que constituyen un aporte empírico al conocimiento sobre el efecto anteriormente descrito.

Así mismo, el tomar las tendencias de investigación como los son el efecto de los parámetros bromatológicos de la FORSU, la codigestión, y la digestión anaerobia en dos etapas, constituye un aporte metodológico, ya que los resultados reflejarán la importancia que tiene la separación del proceso en dos etapas como un pretratamiento que mejora la solubilidad de un sustrato y por consecuencia, se aumenta la producción de metano en la segunda etapa, así mismo, dentro de este contexto se observará el efecto sobre los potenciales de hidrógeno y metano según varía la composición bromatológica y la proporción de lodos como sustrato para codigestión, siendo esta última, un técnica utilizada para la obtención de un sustrato menos heterogéneo.

Por lo anterior, se adoptó un diseño experimental. Se realizaron cambios en la concentración de carbohidratos, lípidos y proteínas, para medir su efecto

sobre el potencial de biohidrógeno y biometano. Para evaluar dichos efectos se determinó el nivel de correlación de cada variable independiente sobre las variables dependientes o variables respuesta, dando así, una explicación matemática al efecto sobre los combustibles gaseosos, hidrógeno y metano, que tiene la composición de carbohidratos, lípidos y proteínas. Así mismo, se aplicó un modelo matemático para la predicción de los potenciales de hidrógeno y metano. Se validó los resultados proyectados con los resultados experimentales con el propósito de determinar el error de porcentaje medio absoluto sobre los resultados obtenidos, y que ello sirva de criterio al momento de la utilización del modelo.

- Unidades de análisis

Debido a la heterogeneidad de la FORSU, y para garantizar la uniformidad de los resultados experimentales, acotar variabilidad y tener las variables independientes controladas, se estandarizó una mezcla de la FORSU, utilizando los constituyentes orgánicos identificados por el sistema de Greenfinch ilustrados en la Figura 2.

Se tomaron las mismas proporciones utilizadas por Alibardi y Cossu (2015), con el objetivo de utilizar sus resultados como parte de la línea base, así como para facilitar la replicabilidad del estudio. Todas las muestras de la mezcla estándar de la FORSU se prepararon en un solo lote inicial. La FORSU recolectada del mercado de Santa Rosa en Querétaro, México, se clasificó y trituró a diámetro menor de 2 mm. Se hicieron las mezclas de cuatro tipos de la FORSU, la primera es la mezcla de la FORSU que representa su composición típica, la segunda, tercera y cuarta, contienen una proporción mayor al 50 % de carbohidratos, lípidos y proteínas respectivamente. Se determinaron la

composición bromatológica y parámetros fisicoquímicos de cada mezcla, y posteriormente se conservaron en refrigeración a -20 °C.

En cuanto al origen de los residuos orgánicos utilizados para la preparación de las mezclas de FORSU, estas se obtuvieron del mercado de Santa Rosa de Jáuregui, en Querétaro, México. En Querétaro el clima varía a lo largo del año con climas templados húmedos y subhúmedos con lluvias abundantes en verano, granizadas y heladas frecuentes, así mismo tiene climas secos y semisecos. Sus principales actividades económicas son la agricultura y ganadería, actividad minera, turismo y forestal, siendo la principal productora de madera en el estado. Así mismo, cuenta con desarrollo de industria en el sector de alimentos, mecánica automotriz, equipo electrónico, plástico, papel, e industria vitivinícola. Es de tomar en cuenta que dichas actividades económicas y clima, tienen un impacto en la composición de la FORSU, sin embargo, en el caso de este estudio, se realizaron muestras sintéticas con el propósito de manejar dicha variable de forma controlada, y cuya variación se determinó y dejó implícita en las mezclas preparadas, según las concentraciones máximas y mínimas de carbohidratos, lípidos y proteínas que han sido reportadas para la FORSU en la literatura (Campuzano y González-Martínez, 2016).

Figura 2.

Categorización de los desperdicios de alimentos según el sistema Greenfinch



Nota. La imagen muestra los diferentes constituyentes de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos separados en el origen. Obtenido de M. Ja, E. Tutkimuskeskus, S. Heaven, Y. Zhang, R. Arnold, T. Paavola, F. Vaz & C. Cavinato (2010). *D2.1: Compositional analysis of food waste from study sites in geographically distinct regions of Europe.* (p.14). 7 Cooperation.

- Variables de estudio

En la Tabla 1 se identifican las variables dependientes: hidrógeno y metano, y las variables independientes: carbohidratos, proteínas y lípidos, que dan el alcance experimental-explicativo al estudio, así como sus definiciones teórica y práctica.

Tabla 1.*Definición teórica y práctica de las variables del estudio*

Variable	Definición teórica	Definición práctica
Contenido de Carbohidratos	Azúcares, almidones, fibras y celulosa contenido en la materia orgánica (Sierra <i>et. al.</i> , 2008).	Porcentaje sobre el peso de los sólidos totales (% ST).
Contenido de Lípidos	Son principalmente triglicéridos que contienen glicerol y ácidos grasos de cadena larga. Su naturaleza hidrofóbica los hace insolubles en agua (Li, Champagne & Anderson, 2011).	Porcentaje sobre el peso de los sólidos totales (% ST).
Contenido de Proteínas	Cadenas polipeptídicas de aminoácidos conformadas por radicales carboxílicos en un lado y aminos en el otro, contiene nitrógeno y azufre (Nelson y Cox, 2013).	Porcentaje sobre el peso de los sólidos totales (% ST).
Producción de Hidrógeno	El hidrógeno es una molécula diatómica estable, gaseosa, insípida e incolora, formada por un electrón y un protón Chen <i>et. al.</i> , 2023).	Producción volumétrica de hidrógeno por unidad de peso del sustrato orgánico alimentado expresado como sólidos volátiles ($\text{m}^3 \text{H}_2/\text{kg SV}$).
Producción de Metano	El metano es un gas incoloro, inodoro, y es un compuesto principal del gas natural (Yusuf y Oyewumi, 2008).	Producción volumétrica de metano por unidad de peso del sustrato orgánico alimentado expresado como sólidos volátiles ($\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg SV}$).

Nota. La tabla contiene la definición de cada variable del estudio desde la perspectiva teórica y práctica. Elaboración propia, realizado con Excel.

- Fases del estudio

A continuación, se describen cada una de las fases dentro de las cuales se desarrolló la investigación.

- Fase 1: revisión de literatura

La metodología utilizada se basó en el resultado de la revisión de literatura, y procuró dar alcance correlacional explicativo al efecto de los carbohidratos, lípidos y proteínas sobre la producción de hidrógeno y metano a partir de la FORSU en codigestión con lodos primarios.

Por lo tanto, a continuación, se describen las actividades, ensayos de laboratorio, experimentos, métodos, materiales y equipos, utilizados en el estudio experimental para dar el enfoque, alcance y diseño experimental ya citados, así como dar cumplimiento a los objetivos descritos.

- Fase 2: preparación de las unidades de análisis y configuración de los equipos para la experimentación

Se prepararon las unidades de análisis. Para preparar las mezclas de la FORSU, se utilizaron residuos orgánicos obtenidos del mercado de Santa Rosa, Querétaro, México. Los lodos primarios se tomaron de la unidad de homogenización del sistema que trata las aguas residuales del Campus Juriquilla de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Con las mezclas estandarizadas preparadas, a diferentes proporciones de lodos, se caracterizaron para los parámetros fisicoquímicos de: sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), ácidos grasos volátiles (AGVs), demanda química de

oxígeno (DQO), alcalinidad, pH, nitrógeno amoniacal (NH_4), fósforo total (PT), carbono orgánico total (COT) y nitrógeno total Kjeldahl (NTK), así como sus parámetros bromatológicos, carbohidratos, lípidos y proteínas.

- Ensayo inicial

Se utilizó el sistema de ensayo automático de potencial de hidrógeno (PBH) y potencial de metano (PBM) AMPTS II (Bioprocess control, Suecia). El principio de operación del equipo AMPTS II reside en el registro automático en tiempo real del volumen de biogás producido en botellas de 500mL en lote; y cuyos resultados se expresan en una serie de tiempo. Cada mezcla se ensayó en triplicado a escala de laboratorio utilizando las botellas de 500mL del AMPTS II, cada una con 360 mL de volumen útil, alimentado con una muestra de la FORSU estandarizada, bajo las condiciones de la primera etapa de digestión anaerobia que se describen más adelante.

El inóculo consistió de lodos anaerobios granulares obtenidos de una planta que trata harinas en San Juan del Río, Querétaro. Se caracterizó para los siguientes parámetros: pH, SV, ST, DQO y % de humedad. Previo a inocular el ensayo de PBH, se realizó pretratamiento térmico al inóculo anaerobio elevando su temperatura a 100 °C por 24 h para promover la esporulación de bacterias productoras de hidrógeno (género *Clostridium*) e inactivar las arqueas metanogénicas. Luego se inoculó a proporción de 2.7 (SV de inóculo/SV de sustrato) en cada botella con mezcla de la FORSU (Algapani et al., 2019).

Una vez la mezcla estandarizada de la FORSU e inóculo se mezclaron en las botellas, se ajustaron los parámetros iniciales de pH y temperatura. Se aplicó gas N_2 por 3 minutos a cada botella para drenar el aire y asegurar condiciones anaeróbicas. Se operó el AMPTS II por el tiempo necesario hasta que la

producción de biogás no aumento más del 1 % por 3 días consecutivos, con medición del volumen de biogás producido cada día.

El biogás producido se condujo a través de una solución alcalina (pH 10) para captura del H_2S y CO_2 , por lo que se obtuvo una medición directa del hidrógeno y metano producido. Se utilizó timolftaleína para el control del pH en la solución para garantizar en todo momento pH básico (pH>10), ya que, en dicho pH, este reactivo tiene un color azul que cambia a transparente cuando baja el pH (pH<9.3). El tiempo de retención celular estuvo definido por el tiempo que duró la cinética de reacción biológica.

Al finalizar la primera etapa, en las mismas botellas se ensayó la segunda etapa de metanogénesis, se ajustó el pH inicial, utilizando NaOH, y la temperatura de operación en 37 °C. Este control de pH se adopta ya que estudios previos evaluaron su eficacia en el control de pH a través de una solución alcalina (Baldi et. al., 2019).

El inóculo para la segunda etapa se obtuvo de la misma fuente que el anterior. El lodo granular se dejó en incubación por 7 días a 35 °C para agotar cualquier contenido de materia orgánica presente en el inóculo. La cantidad de inóculo agregado para cada ensayo se estimó según las recomendaciones de Holliger et. al. (2016).

Se aplicó gas N_2 por 3 minutos a cada reactor para drenar el aire y asegurar condiciones anaerobias. Se operó el AMPTS II por el tiempo necesario hasta que la producción de biogás no aumentó más del 1 % por 3 días consecutivos, con medición del volumen de biogás producido cada día. El biogás producido se filtró mediante una solución básica pH 10 para captura del CO_2 , por lo que se obtuvo una medición directa del metano producido. El tiempo de

retención celular estuvo definido por el tiempo que duró la cinética de reacción biológica.

Paralelamente se ensayó un experimento bajo las mismas condiciones operativas solo con inóculo y otro con lodos primarios para medir su aporte en la producción de hidrógeno y metano.

- Ensayos 2, 3 y 4

Para los ensayos siguientes, se descongelaron las mezclas de la FORSU correspondientes por cada ensayo. Se replicaron todos los pasos del primer ensayo. Cada mezcla de la FORSU se mezcló con una proporción de lodos. En cuanto a la fracción de lodos primarios, varió en proporción en cada ensayo según se muestra en la tabla 2, con el objeto de determinar el efecto en la codigestión de fracción de lodos primarios para cada proporción examinada. Cada ensayo se realizó en triplicado reflejando cada resultado como el promedio de los tres valores.

Figura 3 .

Equipo AMPTS II



Nota. La imagen muestra los componentes del equipo AMPTS, unidad de reactores, unidad de captura de CO₂ y unidad de medición de volumen. Elaboración propia.

▪ Métodos de medición para obtención de datos

Se determinaron los parámetros de pH, SV, ST, DQO, NH₄ NTK y PT utilizando los métodos estándar. Para la determinación del COT se utilizó un aparato de Carbono Orgánico Total (Shimadzu 5050, Japón). El porcentaje de humedad se determinó por diferencia con los ST. Para determinar el contenido de carbohidratos, lípidos y proteínas se utilizaron los métodos de Dubois *et. al.*, 1956; Lowry *et. al.*, 1951; y Mishra *et. al.*, 2014, respectivamente. El volumen producido en cada etapa, hidrógeno y metano respectivamente se estimó por medio del desplazamiento volumétrico parte del sistema AMPTS II (Figura 3).

El potencial de cada biocombustible gaseoso se calculó al dividir la producción de biogás entre la cantidad de SV del sustrato orgánico alimentado.

Tabla 2.

Condiciones de operación de la fermentación y metanogénesis

Cosustrato		Primera etapa (Fermentación)				Segunda etapa (Metanogénesis)		
		Prop. LP	pH inicial	T °C	Inóculo g peso seco	pH inicial	T °C	Inóculo g peso húmedo
Ensayo 1 (Monodigestión)	FORSUTIPICA	0	5	37	10	7.5	37	53
	FORSUCARB	0	5	37	10	7.5	37	53
Línea base	FORSUPROT	0	5	37	10	7.5	37	53
	FORSULIPID	0	5	37	10	7.5	37	53
	LODOPRIM	1	5	37	10	7.5	37	53
	INOCULO	---	5	37	10	7.5	37	53
Ensayo 2 (Codigestión 1)	FORSUTIPICA_20	20 %	5	37	10	7.5	37	53
	FORSUCARB_20	20 %	5	37	10	7.5	37	53
	FORSUPROT_20	20 %	5	37	10	7.5	37	53
	FORSULIPID_20	20 %	5	37	10	7.5	37	53

Continuación de la Tabla 2.

Cosustrato		Primera etapa (Fermentación)			Segunda etapa (Metanogénesis)			
		Prop.	pH		Inóculo			Inóculo
		LP	inicial	T °C	g peso seco	pH inicial	T °C	g peso húmedo
Ensayo 3 (Codigestión 2)	FORSUTIPICA_30	30 %	5	37	10	7.5	37	53
	FORSUCARB_30	30 %	5	37	10	7.5	37	53
	FORSUPROT_30	30 %	5	37	10	7.5	37	53
	FORSULIPID_30	30 %	5	37	10	7.5	37	53
Ensayo 4 (Codigestión 3)	FORSUTIPICA_40	40 %	5	37	10	7.5	37	53
	FORSUCARB_40	40 %	5	37	10	7.5	37	53
	FORSUPROT_40	40 %	5	37	10	7.5	37	53
	FORSULIPID_40	40 %	5	37	10	7.5	37	53

Nota. En el nombre del cosustrato, el número después del guion bajo, indica la proporción de cosustrato, Prop. LP= proporción de lodo primario. Elaboración propia, realizado con Excel.

○ Fase 3: análisis e interpretación de información

Se utilizaron técnicas de análisis estadístico para determinar el nivel de correlación entre variables dependientes e independientes. Posteriormente, se aplicó un modelo matemático para predecir el potencial de hidrógeno y metano en función del contenido de carbohidratos, lípidos y proteínas, y proporción de lodos. Dichas técnicas se abordan en la siguiente sección. El modelo se validó utilizando los resultados experimentales obtenidos para cada ensayo.

INTRODUCCIÓN

La investigación consistió en estudiar los efectos que tiene la variabilidad de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) sobre la producción de biocombustibles gaseosos, hidrógeno y metano, al estar en codigestión anaerobia en dos etapas con lodos primarios.

Se realizó una revisión bibliográfica en torno a la digestión anaerobia de la FORSU, su modalidad en codigestión y separación en dos etapas, con el objeto de identificar los vacíos de conocimiento sobre los cuales se formuló el problema científico. Posteriormente, se describe la justificación, objetivos, alcance, metodología, y técnicas de análisis de información a través de los cuales se resuelve el problema formulado. Así mismo se incluye una sección sobre la teoría desarrollada en torno a los conceptos involucrados dentro del contexto de la investigación.

En la revisión de bibliografía se observó que uno de los problemas de investigación reside en la inestabilidad que supone la FORSU para los procesos de digestión anaerobia debido a la variabilidad en su composición por la forma en que se origina y su heterogeneidad. Para mitigar dicha inestabilidad, se han aplicado efectivamente la codigestión y la digestión anaerobia en dos etapas. Sin embargo, a pesar de que dichas aplicaciones han resultado en efectos favorables en el balance de los parámetros fisicoquímicos que gobiernan la estabilidad operativa de la digestión anaerobia, no se encontró información suficiente sobre las correlaciones que puedan existir entre las diversas variables que están presentes en un proceso de digestión anaerobia según su configuración.

La configuración de un proceso de digestión anaerobia es compleja, ya que sus parámetros operativos óptimos y sus resultados; dependerán del tipo de sustrato orgánico a procesar, condiciones de pretratamiento, y técnicas de bioaumentación para inocular, y si el proceso se lleva a cabo en una o dos etapas, entre otros.

Así mismo, la FORSU, principalmente en los países en desarrollo, forma parte de una problemática donde convergen emisiones de gases de efecto invernadero que aportan al calentamiento global, y contaminación de fuentes de agua con efectos adversos sobre la salud de las personas y ecosistemas. Por lo tanto, dentro del marco de las energías renovables, la digestión anaerobia de la FORSU para producción de biocombustibles gaseosos, además de aportar a mitigar la problemática descrita, constituye una fuente de energía que reemplaza el uso de energías fósiles, además de que diversifica la matriz energética de la localidad que la adopta.

De igual manera, en los países en desarrollo, las aguas residuales sin tratamiento tienen un contexto similar al de la FORSU. En respuesta a lo trazado por la agenda global sobre el desarrollo sostenible, estos países han destinado esfuerzos a mejorar el tratamiento de sus aguas residuales, aplicando tecnologías apropiadas a su contexto local, que, como resultado, se ha dado principalmente la aplicación de etapas de pretratamiento y tratamientos primarios a las aguas residuales, siendo uno de sus subproductos la materia orgánica sedimentable y suspendida que se remueve en estas etapas; conocidos como lodos primarios.

Basado en lo anterior, la metodología que se aplicó inició con la determinación de una línea base del efecto de la composición de la FORSU en monodigestión; sobre la producción de biocombustibles gaseosos en digestión

anaerobia en dos etapas. Posteriormente se incorporaron diferentes proporciones de lodos primarios como cosustrato para medir el mismo efecto. Finalmente se determinó el nivel de correlación entre la composición de la FORSU sobre la producción de hidrógeno y metano, con lo que se aplicó un modelo matemático que permite predecir la producción de dichos combustibles al conocer la composición de la FORSU y los lodos primarios.

1. ESTADO DEL ARTE

1.1. Introducción

Cada año incrementa la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) debido al crecimiento poblacional y urbanización asociada, así como a sus hábitos de consumo (Tyagi, et al., 2018).

La producción anual de RSU para el año 2016, según datos del banco mundial, se reportó en 2.01 miles de millones de toneladas, y se espera que para 2050 incremente a 3.4 miles de millones.

Los residuos alimenticios junto con otros residuos orgánicos como papel, cartón, cuero y madera, conforman la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), donde dicha proporción orgánica se ha identificado entre un 40 % a 70 % de los RSU (Chatterjee y Mazumder, 2019; y Dehkordi, et al., 2020).

La FORSU presenta diversas formas de ser aprovechada, entre ellas; las vías termoquímicas como incineración, gasificación y pirólisis, pero que requieren el uso de energía para su funcionamiento (Ogunjuyigbe, et al., 2017).

Sin embargo, la digestión anaerobia como vía biológica para producción de hidrógeno y metano se ha posicionado como una forma efectiva y limpia de dar disposición final a la FORSU debido a su alta biodegradabilidad, al mismo tiempo que se genera energía renovable, y se mitigan gases de efecto invernadero (Wang y Yin, 2018).

El potencial energético de la FORSU está asociado a su composición bromatológica, misma que depende a su vez, de la segregación inicial de sus diferentes constituyentes (Njuguna, et al., 2018).

La composición de la FORSU varía de una región a otra (, varía además debido a la cultura y hábitos de consumo, a la interrelación entre crecimiento económico y urbanización, tamaño de la población, clima, clase social, entre otros (Njuguna, et al., 2018).

Su composición también varía a lo largo del tiempo y cambios de temporada anual. La variabilidad incierta de la composición de la FORSU supone dificultades de diseño y operativas sobre los sistemas de digestión anaerobia para producción de biocombustibles gaseosos, por lo que se debe dar atención a temas que mitiguen la inestabilidad que impone la composición de la FORSU sobre los procesos de digestión anaerobia (Seadi, et al., 2012).

A continuación, se presenta una descripción y discusión sobre lo reportado por diferentes autores con respecto a diferentes temas que tienen efectos sobre la estabilidad de la digestión anaerobia, y, en consecuencia, sobre la producción de hidrógeno y metano a partir de la FORSU. La discusión se enmarca en los efectos de la composición bromatológica, digestión anaerobia en una etapa (fermentación para producción de hidrógeno) o dos etapas (metanogénesis para producción de metano), y codigestión con otros sustratos orgánicos.

1.2. Análisis crítico y discusión de literatura

A continuación, se hace una comparación de las diferentes tendencias encontradas en literatura en torno a la digestión anaerobia de FORSU.

1.2.1. Biocombustibles gaseosos: hidrógeno y metano

Se iniciará la revisión de la digestión anaerobia de FORSU en torno al potencial de producción de gas hidrógeno y gas metano.

1.2.1.1. Gas metano

El gas metano, es el gas de efecto invernadero (GEI) más significativo que se produce en el tratamiento y disposición de los RSU. Es responsable aproximadamente del 18 % de la contribución total de GEI, tiene entre 28 a 35 veces más potencial de calentamiento que el CO₂, tiene una vida más corta en la atmósfera, 11 años aproximadamente, contra 120 años del CO₂. El rendimiento energético del metano es de 50 kJ/g, que se asemeja al del gas natural (50.19 kJ/g), y es mayor que el de la gasolina (45.26 kJ/g) (Wang y Yin, 2018).

1.2.1.2. Hidrógeno

El hidrógeno tiene varios beneficios como prometedora fuente de energía: su rendimiento energético es de 142.35 kJ/g, es decir, 2.75 veces mayor rendimiento energético comparado con la gasolina y el gas natural, es totalmente limpio ya que tiene como subproducto únicamente agua, es de fácil almacenamiento y transporte ya que, existe la tecnología para su escalamiento, lo que favorecerá su aplicación (, no produce ningún subproducto tóxico mientras es quemado, y además puede ser convertido de forma eficiente a energía térmica y eléctrica (Sharma y Melkania, 2017).

1.2.2. Efectos de las propiedades fisicoquímicas y bromatológicas

La composición bromatológica de la FORSU está definida por la concentración de carbohidratos, lípidos y proteínas, y estos a su vez, dependen de los constituyentes, cuya categorización ha sido desarrollada por varios sistemas como VALORGAS, Valorsul, UNIVE y Greenfinch, entre otros (Ja, et al., 2010).

Estos sistemas clasifican y categorizan la FORSU según sus constituyentes, entre los que están: frutas y vegetales enteros, cáscaras de frutas y vegetales, carne, legumbres, pasta, arroz, cereales, pan, huesos, huevo, lácteos, bolsas de té y café, dulces, alimentos mezclados, y otros biodegradables como podas de jardín, papel y envolturas orgánicas.

Cada sistema mencionado hace una categorización con perspectivas singulares propicias al momento y forma de recolección. Mientras Valorsul realiza una categorización para residuos que son segregados en la fuente que las origina, VALORGAS incluyó una lista extensiva de constituyentes agrupados en 13 categorías principales; haciéndolo un sistema más detallado. UNIVE hace una adaptación basada en la calidad obtenida para la FORSU recuperada de los RSU a través de pretratamiento mecánico en los sitios de disposición. De forma similar al sistema de Valorsul, el de Greenfinch hace una categorización a través de una observancia interna en las viviendas para considerar el comportamiento de los usuarios en la segregación inicial de los residuos domésticos (Ja, et al., 2010)

La variación en la proporción de los constituyentes de la FORSU implica variaciones en los parámetros bromatológicos: carbohidratos, lípidos y proteínas. En términos de biodegradabilidad, Elalami, et al., (2019) reportan que los

carbohidratos son fácilmente biodegradables, y las proteínas (residuos de rastros e industria cárnica principalmente) son deseables para codigestión debido a su alto contenido orgánico, sin embargo, como monosustrato, su alto contenido de nitrógeno puede causar inhibición del crecimiento biológico debido al amonio.

Por otro lado, Lavagnolo *et. al.* (2018) indican que un contenido bajo de azúcares y almidones (carbohidratos) reducirán la producción de hidrógeno. Los resultados entre Elalami, *et al.* (2019) y Lavagnolo, *et al.* (2018) son confirmados por Alibardi y Cossu (2016), quienes reportan para los carbohidratos una alta correlación con la producción de hidrógeno ($R^2=0.983$, $p<0.01$), no así las proteínas y lípidos ($R^2<0.6$, $p>0.05$).

En otro estudio, Alibardi y Cossu (2015) reportan que mezclas de la FORSU con mayor contenido de lípidos y proteínas conformadas por huevo, aceites y grasas, carne magra, carne y piel de pollo; produjeron menos de 5 mL H_2 /gSV. En cuanto a la producción de metano, la relación fue inversa, por lo que, la observación general se resume en que, al reducir la producción de hidrógeno, aumenta la de metano. Dicha observación puede ser explicada desde la composición de carbohidratos, lípidos y proteínas.

La determinación de las características bromatológicas de la FORSU es esencial para determinar su potencial de producir biocombustibles gaseosos a través de digestión anaerobia (Seadi, *et al.*, 2012).

Campuzano y González-Martínez (2016) realizaron una revisión bibliográfica sobre la relación que hay entre la producción de gas metano y la composición de la FORSU, desde la perspectiva de sus parámetros fisicoquímicos y bromatológicos.

Entre los parámetros fisicoquímicos que fueron analizados están: la densidad, el pH, humedad, sólidos totales (TS), sólidos volátiles (SV), nitrógeno Kjeldahl (NTK), fósforo total (PT), demanda química de oxígeno (DQO), parámetros elementales como: porcentaje de carbono (% C), hidrógeno (% H), nitrógeno (% N) y azufre (% S), y parámetros bromatológicos como: lípidos, proteínas, carbohidratos (celulosa, hemicelulosa, almidón, azúcares), lignina y fibra (Campuzano y González-Martínez, 2016).

El estudio de Campuzano y González-Martínez (2016) concluye en que las menores diferencias (desviación estándar y medias) sobre la producción de biocombustibles gaseosos se observaron para los parámetros de porcentaje de carbono e hidrógeno, humedad, almidón y la relación sólidos volátiles/sólidos totales (SV/ST). La baja variación está relacionada a la FORSU con un mayor contenido de desperdicios alimenticios y compuestos orgánicos fácilmente degradables.

La mayor variabilidad se observó para el fósforo total (PT), azufre (S), hemi-celulosa, nitrógeno (NTK), azúcares, lignina y fibra. Esta alta variabilidad está asociada al contenido heterogéneo de la FORSU, el clima, actividad económica predominante, hábitos de consumo, cambios estacionales en el año y el sistema de recolección. Así lo demuestra también el estudio de Dehkordi *et. al.* (2020), donde reporta una variabilidad de 29 % y 35.5 %, 21 %–25.5 % y 64 % – 84 % en los parámetros de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), y su relación VS/TS respectivamente, en diferentes estaciones del año.

1.2.3. Efecto de la codigestión de la FORSU sobre la producción de biocombustibles gaseosos

Como se ha demostrado en la sección 2.2.2 sobre características bromatológicas de la FORSU, queda de manifiesto que esta por sí sola es un sustrato complejo y presenta dificultades para brindar estabilidad al proceso de digestión anaerobia (Njuguna, et al., 2018).

Una forma de mejorar la estabilidad es combinar la FORSU con uno o más sustratos (cosustratos) para digestión anaerobia. Tyagi, et al., (2018), hacen una revisión bibliográfica sobre los sustratos comúnmente utilizados para codigestión con la FORSU, con el objeto de analizar los efectos sobre la producción de biocombustibles de dicha codigestión.

Entre los cosustratos que regularmente se utilizan están: algas, lodos, residuos de la industria pecuaria (estiércoles, grasa, sangre), residuos de poda agrícola (residuos de café, bagazo de caña, entre otros), desperdicios de alimentos (glicerol, grasas y aceites, frutas y vegetales), aguas residuales domésticas, residuos agrícolas de base lignocelulosa cuyo pretratamiento es indispensable, como paja, tallos, residuos forestales, césped, astillas de madera, además, aguas residuales de procesos industriales como: industria cárnica, lácteos, industria de aceite de palma (POME), industria papelera, textil, metalurgia, electrónicos, química, plásticos, entre otros (Elalami, et al., 2019, Wang y Yin, 2018, Tyagi, et al., 2018, y Dehkordi, et al., 2020).

La razón por la cual la codigestión de la FORSU con otro sustrato orgánico brinda estabilidad a la digestión anaerobia, es debido al efecto de dilución y aporte de elementos por parte del cosustrato, por lo que al ajustar la proporción de cada sustrato permite regular los parámetros principales para diseño y

operación, entre los que están la relación de biodegradabilidad (SV/ST), el contenido de humedad (digestión seca o húmeda), el tiempo de retención hidráulico (TRH), la relación carbono nitrógeno (C/N), la carga orgánica volumétrica (*OLR*, por sus siglas en inglés), el pH, la concentración de metales, parámetros elementales como carbón (% C), nitrógeno (% N), azufre (% S) e hidrógeno (% H). Así mismo, se toma en cuenta para dicha regulación el objetivo final deseado, como rendimiento energético, remoción de cargas orgánicas en la descarga, favorecer la producción de ácidos grasos volátiles (AGVs), entre otros (Borowski, et al., 2018).

Wan y Yin (2018) investigaron el proceso anaeróbico para la producción de hidrógeno. Realizaron monodigestión en lote a partir de lodos activados a concentración de 100 g/L ST, utilizaron lodo anaeróbico como inóculo, los parámetros operativos como el pH lo establecieron en 5.5, obtuvieron un rendimiento de hidrógeno de 9 mL H₂/g ST. Mientras que, por su parte, una monodigestión en lote de residuo de vegetales (fracción de la FORSU), a concentración de 117 g/L ST, sin uso de inóculo ni pretratamiento, con pH operacional de 5, y temperatura en rango mesofílico, se obtuvo un rendimiento de 3.3-19 mL H₂/g ST, la codigestión en dicho estudio no es reportada, tampoco la digestión en dos etapas para producción de metano.

Por otro lado, Ara, et al. (2015) reportan la codigestión en dos etapas de la FORSU con lodos activados y primarios en proporción 75/12.5/12.5, con parámetros operativos de pH entre 6.8-7.6, temperatura en rango mesofílico, y alimentación semi continua, para el que obtuvieron producción de metano de 421 Nm³ CH₄/t SV, comparado con 321 Nm³ CH₄/t SV cuando procesaron en las mismas condiciones únicamente lodos activados (50 %) más primarios (50 %).

Se puede observar de los estudios de Wang y Yin, (2018) (producción de hidrógeno) y Ara, et al. (2015) (producción de metano) que al estar involucrada la FORSU en el proceso, el rendimiento de ambos biocombustibles puede ser mayor, sin embargo no reportan el papel de la composición bromatológica de los sustratos en los experimentos, pero se puede suponer según lo reportado por Alibardi y Cossu (2016) que dichos incrementos al estar involucrada la FORSU se deben a que esta aporta mayor concentración de contenido de carbohidratos, que la mezcla de lodos.

En el caso del uso de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales, y que pueden ser utilizados en codigestión con la FORSU, estos pueden ser lodos primarios, lodos activados, o lodos agotados (Elalami, et al., 2019).

Es importante tomar en cuenta la disponibilidad del sustrato y el contexto local para la selección del tipo de lodos más apropiado. Partiendo de lo anterior, y tomando en cuenta el contexto local de países en desarrollo como Guatemala, las etapas de tratamiento del agua que generalmente son, están a nivel de pretratamiento y tratamiento primario, y que como subproducto producen lodos primarios, por lo que en este contexto, la selección de estos lodos, es un sustrato conveniente para codigestión con la FORSU aplicadas (Noyola, et al., 2013).

1.2.4. Separación de la digestión anaerobia en dos etapas

Los residuos de alimentos contenidos en la FORSU son un sustrato de rápida degradación, lo que supone aún mayores dificultades para la digestión anaerobia en una etapa frente a sustratos sumamente variables. En un reactor de una etapa, al haber rápida degradación, también conlleva una rápida producción de ácidos grasos volátiles, y por lo tanto, el reactor se puede acidificar

inhibiendo la producción de metano. Lo anterior, es especialmente relevante para altas tasas orgánicas volumétricas (OLR), debido a la rápida acumulación de ácidos grasos volátiles (AGVs) (Bouallagui, et al., 2009).

Por otra parte, la digestión anaerobia en dos etapas de un sustrato orgánico altamente biodegradable y una alta carga orgánica volumétrica (OLR), presenta ventajas frente a la digestión en una etapa, ya que permite menor tiempo de retención hidráulica para la degradación de la misma cantidad de sólidos volátiles (SV), y consecuentemente, mayor eficiencia en producción de biocombustibles gaseosos, así mismo, es operativamente más conveniente en su control, ya que el pH se autorregula y aumenta la capacidad de recibir variaciones súbitas de cargas orgánicas (Ariunbaatar, et al., 2015).

Para sistemas de dos etapas, la producción de energía ha sido reportada en un 94.5 % comparado con el 86 % de digestión anaerobia en una etapa, esto es debido a que en digestión de dos etapas, cada reactor puede ser operativamente acondicionado favorablemente para los grupos bacterianos que llevan a cabo el proceso en cada reactor (Chatterjee y Mazumder, 2019).

Otra ventaja de la digestión en dos etapas es que lleva a una degradación de la materia orgánica más rápido que una etapa, lo que se traduce en menores tiempos de retención hidráulica (TRH) (Xiao, et al., 2018, Schievano, et al., 2014).

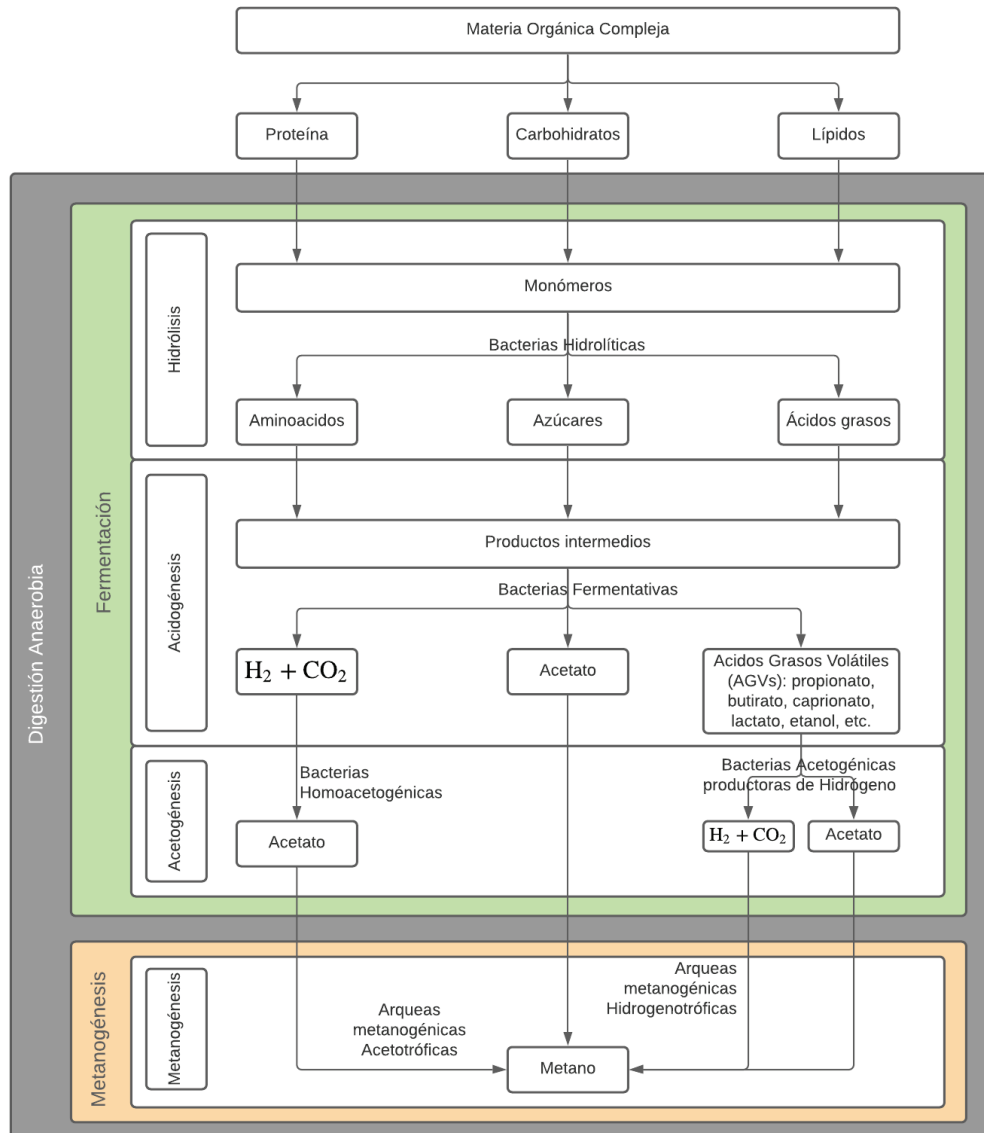
En la figura 4 se puede observar las principales etapas de la digestión anaerobia, la transformación que sufre la materia orgánica en cada etapa, así como los grupos de microorganismos responsables de llevar a cabo cada transformación. La digestión anaerobia en dos etapas abre la posibilidad de la producción de hidrógeno, ya que permite interrumpir el proceso en una primera etapa (fermentación) para recuperar el biogás rico en hidrógeno. Posteriormente,

ya sea en el mismo reactor o en un reactor en serie, acondicionado operativamente para favorecer el crecimiento de las arqueas metanogénicas, este reactor continúa la última etapa de la digestión anaerobia (metanogénesis), en donde se recupera el biogás rico en metano (Ariunbaatar, et al., 2015; Silva, et al., 2018).

Zhang, et al. (2005) llevaron a cabo un estudio de digestión en dos etapas de un lote de la FORSU en rango de temperatura mesofílico, pH 7, OLR de 16 g ST/L d, para el cual se obtuvo una producción de metano de 520 m³ CH₄/g ST, y por otro lado Alibardi y Cossu (2015), en condiciones similares y OLR de 10 g SV/L d obtuvieron 586 m³ CH₄/t SV. Estos resultados son consistentes entre sí, y demuestran mayor rendimiento de metano frente al resultado de Dehkordi *et. al.* (2020), quienes reportaron para digestión de la FORSU en una etapa un rendimiento de 322.72 m³ CH₄/g SV.

Figura 4.

Proceso de digestión anaerobia según sus principales y grupos de bacterias



Nota. El esquema muestra cada etapa de la digestión anaerobia y los principales grupos de microorganismos que llevan a cabo el proceso en cada etapa. Elaboración propia, realizado con Lucidchart.

1.2.4.1. El papel de la codigestión en digestión anaerobia en dos etapas

Baldi, et al. (2019) indican que los residuos orgánicos son una fuente rica de carbono para codigestión con lodos, al mismo tiempo que los lodos son un sustrato rico en proteínas y cuya degradación libera iones de amonio e hidróxido. Un nivel óptimo de amonio asegura el adecuado suministro de nutrientes al proceso anaeróbico, y que, en conjunto con el hidróxido, incrementan la capacidad buffer del sistema, siendo la contraparte a la tendencia de acidificación que causa la producción de ácidos grasos volátiles (AGVs), y estos junto con el pH y la alcalinidad, son los parámetros para monitorear la estabilidad del sistema, y que se adecuan según las necesidades de la primera y segunda etapa, fermentación y metanogénesis respectivamente.

1.2.5. Modelos para predicción de biocombustibles gaseosos con digestión anaerobia

Diferentes trabajos de investigación han desarrollado modelos que describen fenómenos relacionados a la digestión anaerobia.

En el caso de Kleinstreuer y Poweigha (1982) modelaron el efecto que tiene la variación de la carga orgánica volumétrica sobre la eficiencia de la hidrólisis en un reactor anaerobio tipo CSTR. Por su parte, Costello, et al. (1991) aplicaron un modelo que toma en cuenta la acumulación y consumo de ácido láctico por bacterias acidogénicas a pH constante, logrando una predicción con un error contra datos experimentales de los subproductos de la hidrólisis que varió de entre el 10 % al 90 % para diferentes subproductos como glucosa, ácido butírico, ácido acético e hidrógeno.

Así mismo, Siegrist, et al. (1993) desarrollaron un modelo que describe la digestión anaerobia, en una y dos etapas, de lodos de aguas residuales en rango mesofílico según el efecto de la temperatura y pH. Por otro lado, el BioModel de Angelidaki, et al. (1999), proporciona una buena aproximación para los resultados de la digestión anaerobia de estiércoles.

Es evidente la diversidad de parámetros que juegan un rol importante en las diferentes configuraciones de la digestión anaerobia. Lo anterior implica que los modelos existentes han sido desarrollados para simular procesos de digestión anaerobia bajo condiciones experimentales específicas.

Por lo tanto, según las principales tendencias de investigación sobre digestión anaerobia de FORSU identificadas hasta aquí, la aplicación de un modelo adaptado para las condiciones experimentales específicas, en el marco de la codigestión de FORSU con lodos primarios en dos etapas para medir el efecto que tiene la concentración de los parámetros bromatológicos y la proporción de lodos sobre los potenciales de biohidrógeno y biometano puede permitir su predicción con una precisión aceptable, y ser de utilidad para otros investigadores que busquen evaluar otras estrategias experimentales a partir de las tendencias anteriormente señaladas.

1.3. Síntesis conclusiva

Debido a la variabilidad de la composición de la FORSU y la inestabilidad que ello supone al proceso de digestión anaerobia, de la revisión bibliográfica se han identificado tendencias de investigación que se demarcan por estudiar elementos que brinden estabilidad a la digestión anaerobia como la interacción entre las variables que se derivan de la composición de la FORSU; sus parámetros fisicoquímicos, parámetros iniciales de diseño (TRH, OLR, T, pH),

parámetros operativos (OLR, pH), mejoramiento con bioaumentación (inóculo de microorganismos y enzimas), aplicación de pretratamientos (mecánicos, termoquímicos y biológicos), incorporación de un cosustrato para codigestión, digestión en una o dos etapas, y cómo los parámetros fisicoquímicos y composición bromatológica de la FORSU se correlaciona con sistemas de categorización como el de Greenfinch (Alibardi y Cossu, 2016; Chatterjee y Mazumder, 2019; Elalami, et al., 2019).

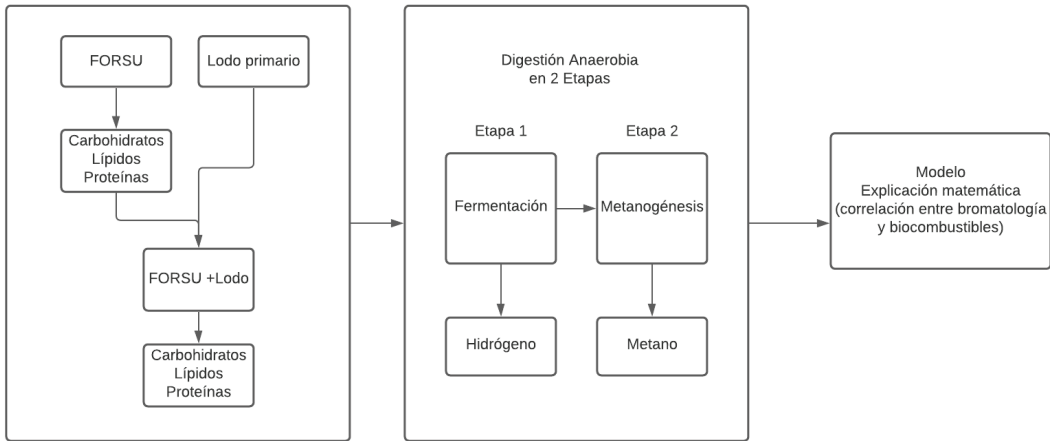
Estudios previos explican los efectos de los carbohidratos, lípidos y proteínas de la FORSU sobre producción de biocombustibles gaseosos, sin embargo, no se correlacionan con la codigestión con lodos primarios de aguas residuales (Alibardi y Cossu, 2016).

Así mismo, estudios sobre los efectos de la digestión anaerobia con la FORSU en dos etapas, no explican la correlación de las variables independientes (composición bromatológica) sobre las variables dependientes (producción de biocombustibles gaseosos) (Chatterjee y Mazumder, 2019; Righetti, et al., 2020).

En resumen, luego de la revisión bibliográfica acerca de la digestión anaerobia con la FORSU, surge el tema de estudiar el efecto de los parámetros bromatológicos en la producción de hidrógeno y metano a partir de la FORSU en codigestión con lodos primarios. El proceso de transformación debe ser estudiado y analizado con técnicas de ciencia de datos con el objeto de establecer un modelo predictivo para valorización de la FORSU en el marco de referencia ilustrado en la Figura 5.

Figura 5.

Proceso de codigestión anaerobia en dos etapas para determinar el PBH y PBM



Nota. El proceso muestra el proceso de codigestión anaerobia en dos etapas, utilizando codigestión con la FORSU y lodos primarios de aguas residuales para analizar y modelar los efectos de los carbohidratos, lípidos y proteínas sobre la producción de biocombustibles gaseosos. Elaboración propia, realizado con Lucidchart.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Residuos sólidos urbanos (RSU)

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son todos los residuos generados en los hogares como consecuencia de las actividades domésticas. Los RSU son un subproducto del desarrollo y crecimiento poblacional, con características propias del estilo de vida, hábitos de consumo y producción de la sociedad que los genera, y que provienen del sector vivienda, restaurantes, comercios e industrias, entre otros, cuya fracción orgánica se encuentra entre el 40 % al 70 % de los RSU (Chatterjee y Mazumder, 2019; Dehkordi, et al., 2020).

Así mismo, los RSU tienen un poder calorífico promedio de 10 MJ/kg, y por lo tanto son una fuente de energía (Malinauskaite, et al., 2017).

2.2. Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU)

A continuación, se define la FORSU desde el punto de vista de sus constituyentes, así como por su caracterización fisicoquímica y bromatológica.

2.2.1. Constituyentes y origen

Los constituyentes de la FORSU varían de un lugar a otro debido a cambios de cultura, nivel de desarrollo económico, clima, entre otros. De forma generalizada, los residuos alimenticios junto con otros residuos orgánicos como papel, cartón, cuero y madera conforman la FORSU (Dehkordi, et al., 2020).

Para efectos de este estudio, se utilizó la composición planteada por el sistema de categorización de Greenfinch y que se detalla en la siguiente sección.

2.2.2. Categorización de los constituyentes

Para la categorización de la FORSU se han desarrollado diferentes sistemas, cuyo objetivo es separar e identificar sus diferentes constituyentes. Entre estos sistemas se encuentra VALORGAS, UNIVE, Valorsul, Greenfinch, y WRAP, que proponen la categorización de la composición de la FORSU, identificando y pesando cada uno de sus constituyentes, con una ligera variación de enfoque.

Entre los sistemas mencionados, el de Greenfinch, categoriza la FORSU en el punto de generación dentro de la vivienda, se identifica los siguientes constituyentes: frutas y vegetales enteros, cáscaras de frutas y vegetales, carne, legumbres, pasta, arroz, cereales, pan, huesos, huevo, lácteos, bolsas de té y café, dulces, alimentos mezclados, y otros biodegradables como podas de jardín, papel y envolturas orgánicas. Por lo tanto, el sistema de Greenfinch ha sido adoptado como referencia para la FORSU que ha sido separada desde su generación, al contrario de otros sistemas descritos por Ja *et. al.*, (2010), que consideran una recolección unificada y posterior separación en el lugar de tratamiento, por lo tanto, dicha FORSU tiene otros constituyentes que son categorizados por aparte dentro del sistema respectivo de categorización aplicado.

2.2.3. Parámetros bromatológicos y fisicoquímicos

La caracterización de la FORSU se puede dividir en cuatro principales tipos de parámetros, los propios de las características físicas como el diámetro

de partícula y su densidad, los de su composición elemental como el porcentaje de carbono (% C), hidrógeno (% H), nitrógeno (% N) y azufre (% S), los parámetros bromatológicos y los fisicoquímicos (Campuzano y González-Martínez, 2016).

2.2.3.1. Parámetros bromatológicos

La FORSU es un sustrato ideal para producción de biocombustibles gaseosos debido a que contiene diferentes compuestos orgánicos pertenecientes a tres grupos principales: carbohidratos, lípidos y proteínas (Alibardi y Cossu, 2016).

2.2.3.1.1. Carbohidratos

Los carbohidratos como azúcares y almidones son fácilmente biodegradables, pero proporcionan un bajo rendimiento energético, y dicho rendimiento baja aún más para la FORSU con altos contenidos de carbohidratos en forma de fibra, debido a la baja velocidad de hidrólisis por su compleja estructura ramificada y resistente (Sierra, et al., 2008).

La fibra está químicamente enlazada a la lignina, que es un constituyente de la fibra pero que no es considerada un carbohidrato, sino que es denominada un polímero que contiene fenoles estrechamente enlazados con polisacáridos, lo que le da la resistencia a la fibra sobre acción microbiana.

Por lo tanto, para la FORSU con alto contenido de fibras, como residuos de podas de jardín y hojas, la lignina será determinante en la velocidad de biodegradabilidad y por lo tanto en la producción de biocombustibles gaseosos.

2.2.3.1.2. Proteínas

Las proteínas son cadenas de aminoácidos. Estas son el único compuesto orgánico en la FORSU que contiene nitrógeno y azufre. Por lo tanto, bajo condiciones de descomposición anaerobia, el azufre llevará a la formación de ácido sulfhídrico (H_2S) como constituyente de los biocombustibles gaseosos, y que por lo tanto habrá que retirar del mismo para su aprovechamiento (Nelson y Cox, 2013).

Las proteínas en forma de residuos cárnicos principalmente son deseables para codigestión debido a su alto contenido orgánico, sin embargo, como monosustrato, su alto contenido de nitrógeno puede causar inhibición del crecimiento biológico debido a la concentración de amonio que es tóxico para las arqueas metanogénicas (Ariunbaatar, et al., 2015, Tyagi, et al., 2018).

2.2.3.1.3. Lípidos

Los lípidos están constituidos por las grasas y aceites, tanto de origen animal como vegetal. Son principalmente triglicéridos que contienen glicerol y ácidos grasos de cadena larga. Su naturaleza hidrofóbica los hace insolubles en agua y se adhieren fácilmente a los demás constituyentes de la FORSU. En cuanto a descomposición anaeróbica de los lípidos, estos son fácilmente hidrolizables, y se han reportado mayores rendimientos energéticos para la FORSU con mayor contenido de grasas y aceites (Li, et al., 2011; Wan, et al., 2011).

2.2.3.2. Parámetros fisicoquímicos de la FORSU

Los parámetros fisicoquímicos de la FORSU se derivan de las principales categorías y de su bromatología. Estos definen los parámetros de diseño y operativos de un sistema de digestión anaerobia. Entre los parámetros fisicoquímicos principales están, la humedad, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y fijos (SF); y su relación con los ST, nitrógeno Kjeldahl y fósforo total. Con estos parámetros se determina la biodegradabilidad de la materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes necesarios para el proceso biológico (Alibardi y Cossu, 2015).

En cuanto a los sólidos, los ST representan el contenido total de masa presente en un sustrato, los SV representan la fracción orgánica y los SF la fracción inorgánica.

Otro parámetro fisicoquímico que es menos común su determinación para el análisis de la FORSU es la demanda química de oxígeno (DQO). Su uso no es muy común debido a la forma de la FORSU en heterogeneidad y tamaño de partícula, por lo que regularmente, esta se relaciona con los sólidos volátiles (SV), donde a mayor relación SV/ST mayor DQO. Algunos valores reportados muestran una variación significativa. Para valores de DQO de 575 g/kg la relación SV/ST fue de 0.92, y para una DQO de 140 g/kg, la relación fue de 0.43 (Alibardi y Cossu, 2015; Forster-Carneiro, Pérez & Romero, 2008).

Es importante conocer los parámetros fisicoquímicos para determinar los parámetros de diseño y operativos de la digestión anaerobia, y que, en su adecuada determinación y selección, reside la posibilidad de optimizar el aprovechamiento energético de la FORSU (Campuzano y González-Martínez, 2016).

2.3. Proceso de digestión anaerobia

En la figura 4 se observa una simplificación a cuatro etapas del proceso de digestión anaerobia. En cada una de dichas etapas diferentes grupos de bacterias y arqueas metabolizan la materia orgánica en compuestos simples.

De forma más práctica, la digestión anaerobia puede ser dividida en dos etapas principales como se mostró en la Figura 4, la fermentación y la metanogénesis, en donde a su vez, la fermentación comprende 3 de las 4 etapas principales, hidrólisis, acidogénesis y acetogénesis (Zhang, et al., 2017).

La digestión anaerobia reduce el volumen de la materia orgánica y la transforma en diferentes subproductos como los son: biocombustibles gaseosos (hidrógeno y metano), el digestato que es la fracción sólida (fertilizante), ácidos grasos volátiles (materias primas), entre otros (Tyagi, et al., 2018).

2.3.1. Proceso anaerobio de dos etapas

En la primera etapa de la digestión anaerobia, la etapa de fermentación, las bacterias hidrolizan y convierten materia orgánica insoluble en compuestos más simples y solubles en agua, donde como biocombustible se obtiene biogás rico en contenido de hidrógeno. Así mismo, esta primera etapa hace el papel de pretratamiento para un sustrato orgánico complejo como la FORSU, ya que promueve la conversión de ácidos grasos volátiles en biogás con mayor eficiencia (Micolucci, et al., 2018).

Posteriormente en la segunda etapa, la etapa de metanogénesis, se obtiene biogás rico en contenido de metano. La digestión anaerobia en dos etapas es capaz de tratar mayores cargas de la FORSU y producir mayores

rendimientos de energía según Chatterjee y Mazumder (2019), y que coincide con lo afirmado por Xiao, et al., (2018) quienes reportaron una producción energética total un 30 % mayor en digestión anaerobia en dos etapas comparado con digestión en una etapa.

En la Figura 4, que muestra el proceso simplificado de la digestión anaerobia, se observa que el hidrógeno se produce entre las etapas intermedias antes de la metanogénesis, por lo tanto, para recuperarlo es necesario interrumpir el proceso en la etapa de fermentación, ajustando los parámetros de operación del reactor para favorecer solamente el crecimiento de microorganismos productores de metano (Zahedi, et al., 2016).

En la etapa de fermentación, la hidrólisis es la etapa limitante del proceso y cuya eficiencia se puede mejorar con pretratamiento. En la fermentación, entre 10 % a 20 % de la materia orgánica como sólidos suspendidos volátiles (SSV) o disueltos, es transformada a biogás con H_2 y CO_2 como constituyentes principales, mientras un porcentaje restante de SSV aún se encuentra en la fracción líquida en forma de ácidos grasos volátiles, etanol, entre otros. Por lo tanto, para mejorar la recuperación energética, la segunda etapa de metanogénesis es necesaria para utilizar dichos productos intermedios y transformarlos en gas metano (Micolucci, et al., 2018).

Lo anterior también es confirmado por Liu, et al., (2019), quienes reportan que la digestión anaerobia en dos etapas permite hacer una mejor eficiencia en el aprovechamiento del sustrato orgánico para conversión de energía produciendo dos biocombustibles gaseosos con alto contenido energético.

Otro aspecto en la digestión anaerobia es que el 70 % del metano aproximadamente se obtiene vía acetotrófica y el 30 % vía hidrogenotrófica, es

decir relación 70/30 (ver figura 4). Esta relación se puede ver influenciada por los parámetros operativos, principalmente el pH, la temperatura de operación, la relación carbono nitrógeno (C/N) y la carga orgánica volumétrica (OLR) (Elalami, et al., 2019).

2.3.2. Codigestión anaerobia de la FORSU

El concepto de codigestión anaerobia se refiere a la combinación de sustratos orgánicos en donde sus características combinadas resultan en un sustrato orgánico orientado a ajustar parámetros fisicoquímicos como la relación carbono-nitrógeno, el porcentaje de humedad, entre otros, con el objetivo de dar balance y estabilidad al proceso anaerobio que en presencia de dos o más tipos de sustratos orgánicos, se le denomina codigestión (Zhou, et al., 2013).

La FORSU por sí sola es un sustrato complejo y presenta dificultades para brindar estabilidad al proceso de digestión anaerobia, ya que carece de ciertas características que limitan su eficiencia como sustrato orgánico para la digestión anaerobia (Tyagi, et al., 2018).

Por ello, una variedad de sustratos han sido investigados para su codigestión con la FORSU, entre los reportados están las algas, residuos de agroindustria como leche y pulpa de café, bagazo de caña, grasas y glicerol, lodos de aguas residuales, lodos activados, residuos agrícolas de base lignocelulosa como paja, tallos, residuos forestales, césped, astillas de madera, estiércoles de animal y otros desperdicios animales de la industria cárnica como sangre y grasa, aguas residuales de procesos industriales (industria de aceite, industria papelera), ceniza de RSU, aguas industriales (técnico, metalurgia, electrónicos, química, plásticos) (Dehkordi, et al., 2020; Elalami, et al., 2019; Tyagi, et al., 2018; Wang y Yin, 2018).

La codigestión de la FORSU con lodo de aguas residuales contribuye a mejorar la degradabilidad del sustrato orgánico y por lo tanto el rendimiento de metano (Elalami, et al., 2019).

2.4. Producción de biocombustibles gaseosos con la FORSU

A continuación, se describe la producción de los biocombustibles gaseosos, hidrógeno y metano, generados a través de digestión anaerobia a partir de FORSU.

2.4.1. Potencial energético

El potencial energético de la FORSU, dentro del marco del aprovechamiento en digestión anaerobia de los RSU, puede definirse como la cantidad de energía que se puede recuperar desde determinado sustrato orgánico. Dicho potencial parte del poder calorífico de los RSU, que como ya se citó anteriormente, es en promedio 10 MJ/kg, y de donde se deriva el potencial de la FORSU, el cual a su vez, depende del estudio detenido de las diferentes variables presentes en el contexto local, viéndose positiva o negativamente influenciado en función de la elección de los parámetros fisicoquímicos de diseño de la digestión anaerobia según sustratos orgánicos disponibles (Njuguna, et al., 2018).

2.4.1.1. Hidrógeno

El hidrógeno es una molécula diatómica estable, gaseosa, insípida e incolora, formada por un electrón y un protón. Constituye el 75 % de toda la materia en la tierra, y se encuentra combinado con otros elementos como el

carbono con el que forma compuestos orgánicos, así como con el oxígeno para formar moléculas de agua (Chen, et al., 2023).

El hidrógeno (H_2) ha sido ampliamente reconocido como una energía limpia con cero emisiones de gases de efecto invernadero y un contenido energético 2.75 veces mayor (142 kJ/g) que el de la gasolina (Malinauskaite, et al., 2017).

Entre las vías biológicas para producción de hidrógeno, la digestión anaerobia sobresale debido a que se puede obtener de una variedad de sustratos orgánicos, siendo la FORSU uno de los más utilizados), sin necesidad de consumo de energía, lo que hace de su forma de generación, un biocombustible gaseoso de producción sostenible (Muradov y Veziroğlu, 2008).

Debido a que el hidrógeno se encuentra combinado con otros elementos en la naturaleza, este debe ser generado. Se puede producir de varias formas, por medio de la disociación del agua, reacción del metano con vapor de agua, reacción del agua con monóxido de carbono, entre otros (Muradov y Veziroğlu, 2008).

2.4.1.2. Metano en la naturaleza y sus reacciones

El metano es un gas incoloro, inodoro, y es un compuesto principal del gas natural, cuyos constituyentes son 75 % CH_4 , 15 % etanol (C_2H_8) y 5 % otros hidrocarburos como propano (C_3H_8) y butano (C_4H_{10}). Por lo anterior, el metano es el principal hidrocarburo del gas natural, por ello puede ser energéticamente aprovechado y reemplazar otros combustibles. A temperatura ambiente, el gas metano es menos denso que el aire, no es tóxico al inhalar, pero puede producir

sofocamiento si se reduce la concentración de oxígeno inhalada (Baena-Moreno, et al., 2020).

Al quemar una molécula de metano en presencia de oxígeno, esta libera una molécula de dióxido de carbono (CO_2) y 2 moléculas de agua (H_2O). Se puede sintetizar comercialmente por destilación de carbón bituminoso y por calentamiento de una mezcla de carbón e hidrógeno, también puede ser producido en laboratorio calentando acetato de sodio con hidróxido de sodio (Yusuf y Oyewumi, 2008).

2.4.1.3. Metano como biocombustible gaseoso

Como se describió en la sección 7.3, el proceso de digestión anaerobia de la biomasa tiene como uno de sus subproductos el biogás, en cuya composición, el metano conforma entre un 50 % y 70 % (Baena-Moreno, et al., 2020).

El biogás tiene un poder calorífico (21.5 MJ/m^3) inferior al del metano (35.9 MJ/m^3), siendo este último mayor al del gas natural (31.8 MJ/m^3).

El biogás presenta ventajas frente al gas natural y otros combustibles fósiles (energías no renovables), ya que, al ser un derivado de la biomasa, constituye una fuente de energía renovable, así mismo, es una alternativa para diversificar la matriz energética y suministrar puntos descentralizados de generación y suministro de energía (Malinauskaite, et al., 2017).

2.4.1.4. Metano como gas de efecto invernadero

El gas metano es responsable aproximadamente del 18 % de la contribución total de los gases de efecto invernadero (GEI), tiene entre 28 a 36

veces más potencial de calentamiento que el CO₂, con vida más corta en la atmósfera, 11 años aproximadamente, contra 120 años del CO₂.

El metano es un GEI y un combustible al mismo tiempo. Por lo tanto, reducir las emisiones de metano causados en los vertederos de RSU significa además de un beneficio económico, un beneficio ambiental, al reducir las emisiones de metano hacia la atmósfera, ya que su aprovechamiento ofrece una forma efectiva en el corto plazo; en la mitigación del calentamiento global, suministro de energía renovable, y la reducción de la huella de carbono asociada a la sustitución que conlleva su uso por otros combustibles fósiles.

3. METODOLOGÍA

3.1. Muestras de la FORSU

Las muestras de la FORSU sintéticas fueron preparadas a partir de los residuos de alimentos que representan sus diferentes constituyentes. Estos constituyentes, fueron recolectados en el mercado de Santa Rosa de Jáuregui de la ciudad de Querétaro y rechazos de un supermercado local, con el propósito de utilizar una mezcla reproducible y como variable controlada, que simule la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. Se seleccionó la fuente de disponibilidad más inmediata para la obtención de los constituyentes de la FORSU, debido a que dicha fuente no es objeto de análisis, y las concentraciones de carbohidratos, lípidos y proteínas que aportan los constituyentes recolectados serán caracterizados.

3.2. Preparación de las mezclas de la FORSU

Se definieron cuatro diferentes mezclas para representar la FORSU, siendo la primera una representación según su composición típica (FT) reportada en literatura, la segunda se preparó con un mayor contenido de carbohidratos (FC) por encima de los lípidos y proteínas, la tercera con un mayor contenido de proteína (FP), y la cuarta con un mayor contenido de lípidos (FL). Las proporciones utilizadas para la composición de cada mezcla se pueden observar en la Tabla 3. Con el propósito de que las mezclas de la FORSU siempre fueran una representación real de esta, las proporciones de sus constituyentes se definieron en función del rango de porcentajes máximo y mínimo para los

carbohidratos, lípidos y proteínas reportados para diferentes ciudades alrededor del mundo (Campuzano y González-Martínez, 2016).

Tabla 3.

Constituyentes de las mezclas de FORSU

Tipo de mezcla	Carne	Grasa	Fruta	Vegetales	Pan	Total
FORSUTIPICA (FT)	15.0 %	17.0 %	20.00 %	30.00 %	18.0 %	100.0 %
FORSUCARB (FC)	10.0 %	10.0 %	30.00 %	20.00 %	30.0 %	100.0 %
FORSUPROT (FP)	30.0 %	10.0 %	20.00 %	30.00 %	10.0 %	100.0 %
FORSULIPID (FL)	10.0 %	30.0 %	20.00 %	30.00 %	10.0 %	100.0 %

Nota. Los porcentajes (%) se encuentran dentro de los rangos máximos y mínimos para cada constituyente. Elaboración propia, realizada con Excel.

Luego de pesar y preparar todas las mezclas (figura 6), cada mezcla fue triturada en un procesador de alimentos común, en dilución 1:3 para obtener una consistencia semi-líquida, finalmente se empacaron y almacenaron a -20 °C.

Figura 6.

Preparación de mezclas de la FORSU

a) Recolección de residuos.



b) Pesaje de residuos.



Continuación de la Figura 6.

c) Constituyentes recolectados para realizar mezclas de la FORSU.



d) Mezclas preparadas y almacenadas a -20 °C.



Nota. a) muestra los residuos recolectados en el mercado local, b) proceso de pesaje de residuos por cada constituyente de la FORSU, c) constituyentes de la FORSU utilizado para preparar las mezclas sintéticas, d) mezclas de FORSU ya preparadas. Elaboración propia.

Cada una de las mezclas se caracterizaron para conocer su composición bromatológica y fisicoquímica: contenido de carbohidratos, lípidos, proteínas, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), ácidos grasos volátiles (AGVs), demanda química de oxígeno (DQO), alcalinidad, pH, nitrógeno amoniacal (NH_4), fósforo total (PT), carbono orgánico total (COT) y nitrógeno total Kjeldahl (NTK).

3.3. Lodo primario (LP)

El lodo primario (LP) se obtuvo del cárcamo de sedimentación primaria (Figura 7) de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) del campus de la UNAM, ubicada en Juriquilla, Querétaro. Esta PTAR trata agua de los institutos de investigación, por lo tanto, el agua es considerada más de tipo industrial. Utilizando la técnica y condiciones del recipiente adecuadas, se tomó la muestra en una caneca de 5 galones y se preservó en almacenamiento a 4 °C hasta su utilización. Se caracterizó para conocer su composición bromatológica y fisicoquímica: contenido de carbohidratos, proteínas, y lípidos, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), ácidos grasos volátiles (AGVs), demanda química de oxígeno (DQO), alcalinidad, pH, nitrógeno amoniacal (NH_4), fósforo total (PT), carbono orgánico total (COT), nitrógeno total Kjeldahl (NTK), así mismo, se determinaron los metales hierro, níquel, magnesio, cobre, sodio, calcio, zinc, cromo y cobalto (Reutelshofer y Guzmán, 2015).

Figura 7.

Sedimentador primario de la PTAR del Campus UNAM Juriquilla, Querétaro



Nota. La imagen muestra la unidad de sedimentación primaria de la planta de tratamiento de donde se tomó el lodo primario utilizado en el estudio. Elaboración propia.

Las proporciones de lodos a ensayar se definieron en 20 %, 30 % y 40 %, para los ensayos 2, 3 y 4. El límite inferior de 20 % obedece al límite para que la digestión anaeróbica sea considerada húmeda (Elsamadony y Tawfik, 2015).

El límite superior del 40 % fue definido según la importancia del residuo a tratar, y ya que esta investigación, dentro del marco de energía renovable, busca determinar el potencial de biohidrógeno y biometano de la FORSU con y sin cosustrato, por tanto, se desea que la proporción de FORSU siempre sea mayor a la del lodo primario.

3.4. Inóculo

El inóculo consistió en lodos anaerobios granulares obtenidos de un reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB por sus siglas en inglés) que trata las aguas residuales de una industria harinera en San Juan del Río, Querétaro. Para inocular la primera etapa (fermentación) para producción de hidrógeno, se realizó un pretratamiento térmico en un horno a 105 °C por 24 horas para inhibir las arqueas metanogénicas y llevar a cabo la esporulación del género *Clostridium*, principales productoras de hidrógeno. Para inocular la segunda etapa (metanogénesis), no se realizó pretratamiento para inhibición de las arqueas metanogénicas; sin embargo, se realizó un pretratamiento para el agotamiento de cualquier sustrato orgánico que pudiese estar presente en el lodo granular. Este pretratamiento consistió en colocar el inóculo en una incubadora a 37 °C por 7 días (Cardeña, et al., 2017).

3.5. Métodos de determinación de parámetros bromatológicos y fisicoquímicos

Cada mezcla de la FORSU y el lodo primario se le determinó los parámetros bromatológicos de carbohidratos, proteínas, y lípidos según los métodos de Dubois, et al., 1956; Lowry, et al., 1951; y Mishra, et al., 2014, respectivamente. Así mismo los parámetros fisicoquímicos de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), alcalinidad, pH, carbono orgánico total (COT), nitrógeno total Kjeldahl (NTK), se utilizó los métodos estándar, para la demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno amoniacal (NH₄), fósforo total (PT); se utilizó métodos Hach. Adicionalmente, a los lodos primarios se les determinó los metales hierro, níquel, magnesio, cobre, sodio, calcio, zinc, cromo y cobalto utilizando espectroscopía de absorción atómica (equipo marca Agilent Technologies 3111A).

3.6. Determinación de los ácidos grasos volátiles (AGVs)

Para la determinación de los ácidos grasos volátiles y etanol, se tomó una muestra del efluente de cada botella al final de la fermentación anaerobia, así como del efluente de la metanogénesis. Para preparar las muestras, cada una se centrifugó y luego se filtró con filtros de membrana de nitrocelulosa de 0.45 μm y se almacenaron a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Un cromatógrafo de gases (Agilent Technologies 7890B, USA) fue utilizado para procesar las muestras, equipado con una columna DB-FFAP (15 m x 530 μm x 1 μm) y un detector de ionización de llama. La temperatura del inyector y del detector fueron $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivamente. El nitrógeno gas fue utilizado como gas transportador con un flujo de 2.5 mL / min.

3.7. Determinación de la composición del biogás

Se tomó una muestra del espacio de cabeza de la botella por medio de una jeringa de 10 mL de una botella de cada mezcla de la FORSU y lodos primarios, de cada uno de los ensayos. Para determinar la composición del biogás, cada muestra fue inyectada en un cromatógrafo de gases SRI Instruments (8610C model, USA) provisto con un conductor térmico (TCD) y dos columnas de acero inoxidable con un largo de 1.82 metros y diámetro de 3.175 mm. El gas transportador utilizado fue nitrógeno con un flujo de 20 mL/min. La temperatura del inyector fue de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la del detector $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ a una presión de 35 psi.

3.8. Determinación del potencial biológico de producción de hidrógeno y metano

Se utilizó el sistema de ensayo automático de potencial de hidrógeno (PBH) y potencial de metano (PBM) AMPTS II. Cada mezcla se ensayó en triplicado utilizando las botellas de 500 mL del AMPTS II, cada una con 360mL de volumen útil, alimentado con una muestra de las mezclas de la FORSU según el diseño experimental y bajo las condiciones operativas anteriormente mostradas.

Una vez la mezcla de la FORSU correspondiente y el inóculo para producción de hidrógeno se mezclaron en las botellas, se ajustaron los parámetros iniciales de pH y temperatura según. Se aplicó gas N₂ por 20 segundos a cada botella para drenar el aire y asegurar condiciones anaeróbicas. Se operó el AMPTS II por el tiempo necesario hasta que la producción de biogás tuvo un crecimiento menor al 5 % y 1 % por 3 días consecutivos, para el PBH y PBM respectivamente (Carrillo-Reyes, et al., 2020).

El volumen acumulado de biogás fue registrado automáticamente a cada 15 minutos por el equipo AMPTS II.

El biogás producido en las botellas del equipo AMPTS II fue filtrado mediante una solución básica pH 10 para captura del H₂S y CO₂, por lo que se obtuvo una medición directa de hidrógeno y metano, respectivamente. Se utilizó timolftaleína para el control del pH en la solución para garantizar en todo momento pH básico (pH>10), ya que, en dicho pH, este reactivo tiene un color azul que torna a transparente cuando baja el pH (pH<9.3). El tiempo de retención celular estuvo definido por la duración de la cinética de reacción celular según los

criterios de finalización de experimentos de PBH y PBM dados por Carrillo-Reyes, et al., (2020).

Al finalizar la primera etapa de digestión anaerobia, en las mismas botellas que contenían el efluente de la fermentación, se incorporó el inóculo reservado para la metanogénesis, se ajustó la alcalinidad para tener un mínimo de 3000 mg/L CaCO_3 , se ajustó el pH inicial, utilizando NaOH, y la temperatura de operación en 37 °C. Este control de pH se adopta ya que estudios previos evaluaron su eficacia en el control de pH a través de una solución alcalina (Baldi, et al., 2019).

A partir del segundo ensayo, se mezcló una proporción de lodos primarios. Dicha proporción se varió en cada ensayo según el diseño experimental, para determinar el efecto en la codigestión de la FORSU con lodos primarios para cada proporción examinada. Cada determinación se realizó en triplicado reflejando cada resultado como el promedio de los tres valores.

El volumen producido en cada etapa, de hidrógeno y metano respectivamente, se estimó por medio del desplazamiento volumétrico; parte del sistema AMPTS II. El volumen producido por el inóculo en cada etapa, fermentación y metanogénesis respectivamente fue restado de la producción total para obtener los potenciales producidos por los sustratos objeto de estudio.

3.9. Cálculos y métodos estadísticos

Para efecto del uso del programa R en el análisis estadístico, se asignó un nombre de variable a los parámetros bromatológicos y al potencial de los biocombustibles gaseosos (hidrógeno y metano) como se observa en la Tabla 4 a continuación:

Tabla 4.

Nombre de variables a los parámetros bromatológicos biocombustibles

Parámetro	VARIABLE
FORSU FT	SUSTRATO_FT
FORSU FC	SUSTRATO_FC
FORSU FP	SUSTRATO_FP
FORSU FL	SUSTRATO_FL
Proporción de Lodo	PROP_LODO
Carbohidratos	CARB
Proteína	PROTEINA
Lípidos	LIPIDOS
PBH	PBH
PBM	PBM

Nota. La tabla muestra el nombre de variable asignado a cada parámetro por efectos de la programación en el programa R. Elaboración propia, realizado con Excel.

Así mismo, utilizando las variables de la Tabla 4, con el objeto de facilitar el análisis estadístico de los datos obtenidos en la experimentación y posteriormente la elaboración de un modelo de regresión, se conformó una matriz (tabla 5) de variables independientes; X1, X2, X3, X4, y variables dependientes; Y1 y Y2, que se muestra a continuación:

Tabla 5.*Matriz de variables dependientes e independientes*

X1	X2	X3	X4	Y1	Y2
CARB	PROTEINA	LIPIDOS	PROP_LODO	PBH	PBM
1690	430	245	0	41.485	494.19
2027	480	343	0	48.785	480.93
775	560	212	0	29.465	513.67
819	330	357	0	29.945	512.92
997	272	153	0.2	42.345	480.83
1113	284	197	0.2	50.745	460.07
529	386	149	0.2	28.935	467.11
517	221	225	0.2	27.605	476.73
780	222	125	0.3	34.975	432.48
854	228	156	0.3	40.385	425.59
438	321	126	0.3	22.625	427.75
417	185	182	0.3	16.685	461.79
610	183	102	0.4	31.575	488.42
659	186	125	0.4	36.985	495.29
362	267	106	0.4	23.835	488.4
338	157	148	0.4	18.675	500.31
69	60	31	1	64.715	164.3

Nota. La tabla muestra la definición de las variables dependientes e independientes para la aplicación de los modelos de regresión. Elaboración propia, realizado con Excel.

Se inició aplicando un análisis estadístico de las variables numéricas para determinar la utilidad de cada una de ellas en la elaboración del modelo. Así mismo, debido a que hay técnicas de *machine learning* que no tienen la capacidad de manejar variables categóricas, como FT, FC, FP, y FL, estas variables se transformaron a variables numéricas a través de la técnica de *One*

Hot Encoding (variables ficticias), donde se crearon variables binarias, que se observan en la Tabla 6 representando en cada fila la característica de la variable categórica con un uno (1) y su ausencia con un cero (0). Con dicha transformación, las variables categóricas podrán ser manejadas como variables numéricas en el análisis estadístico.

Tabla 6.

Transformación de variables categóricas a variables numéricas

VARIABLE	SUSTRATO_FT	SUSTRATO_FC	SUSTRATO_FP	SUSTRATO_FL
FT	1	0	0	0
FC	0	1	0	0
FP	0	0	1	0
FL	0	0	0	1
FT_20	1	0	0	0
FC_20	0	1	0	0
FP_20	0	0	1	0
FL_20	0	0	0	1
FT_30	1	0	0	0
FC_30	0	1	0	0
FP_30	0	0	1	0
FL_30	0	0	0	1
FT_40	1	0	0	0
FC_40	0	1	0	0
FP_40	0	0	1	0
FL_40	0	0	0	1
LP	0	0	0	0

Nota. La tabla muestra la transformación de variables categóricas en variables ficticias por efectos de considerarlas en la codificación dentro del análisis estadístico llevado a cabo en el programa R. Elaboración propia, realizado con Excel.

Posteriormente, se procedió a hacer un análisis de distribución de datos para las variables dependientes PBH y PBM y un análisis de varianza para las variables dependientes; con el objeto de analizar la utilidad que tendrían las variables en aplicación de un modelo de regresión. Luego se aplicó un análisis de multicolinealidad entre variables independientes. Con el análisis de varianza y de multicolinealidad se definieron las variables a utilizar en el modelo de regresión.

Finalmente, se aplicó la regresión múltiple para definir el modelo más confiable tanto para la predicción PBH y del PBM. Para la aplicación del modelo del PBH, se evaluaron 3 modelos de regresión múltiple (Tabla 7) tomando en cuenta las variables con mejor *p-value* según el análisis de varianza. En el modelo 1 se utilizaron las variables PROP_LODO y CARB, en el modelo 2 se utilizó PROP_LODO, CARB y PROTEINA, y en el modelo 3 se utilizó PROP_LODO, CARB, PROTEINA y LIPIDO. Se eligió el mejor modelo según el criterio del R^2 ajustado y la distribución de sus residuales según la prueba de Shapiro-Wilk, lo que valida la aceptación del modelo.

Tabla 7.

Modelos de regresión según inclusión de las variables independientes

Modelo	PROP_LODO	CARB	PROTEINA	LIPIDOS
Modelo 1	X	X	X	X
Modelo 2	X	X	X	
Modelo 3	X	X		

Nota. Variables consideradas en el análisis del modelo validadas en el análisis de varianza. Elaboración propia, realizado con Excel.

Para la elaboración del modelo del PBM, se evaluaron tres modelos de regresión polinomial (Tabla 8) tomando en cuenta las variables con mejor *p-value* según el análisis de varianza. En el modelo 1 se utilizaron las variables PBH y PBH1, en el modelo 2 se utilizaron PBH, PBH1 y PBH2, y en el modelo 3 se utilizaron PBH, PBH1, PBH2 y PBH3. Se eligió el mejor modelo según el criterio del R^2 ajustado.

Tabla 8.

Modelos de regresión para PBH según inclusión de las variables independientes

Modelo	PBH	PBH1	PBH2	PBH3
Modelo 1	X	X		
Modelo 2	X	X	X	
Modelo 3	X	X	X	X

Nota. Variables consideradas en el análisis del modelo más adecuado. Elaboración propia, realizado con Excel.

El modelo, desde un enfoque cuantitativo, se construyó a partir de los datos de concentración de las variables independientes controladas, y de los resultados de las variables respuesta según la metodología utilizada, donde se identificó los parámetros que más relevancia tuvieron sobre las variables respuesta. Su aplicación, por lo tanto, debe limitarse al marco metodológico utilizado en este estudio, es decir, la codigestión de FORSU y lodos primarios en un proceso en dos etapas.

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Producción de biocombustibles gaseosos (hidrógeno y metano) a partir de la FORSU y LP en monodigestión

A continuación, se presentan los resultados de la caracterización de cada mezcla de la FORSU realizada sin cosustrato. Así mismo, se presentan la caracterización de los lodos primarios utilizados como cosustrato. Posteriormente se presentan los resultados del potencial de biohidrógeno y biometano de cada una de las mezclas sin cosustrato en monodigestión.

4.1.1. Caracterización de la FORSU y LP

En la tabla 9 se muestran los resultados de la caracterización fisicoquímica y bromatológica de cada una de las mezclas de la FORSU preparadas.

Tabla 9.

Caracterización fisicoquímica de las mezclas de la FORSU y de lodo primario

Sustrato	% de Lodo	ST	SV	DQO	TOC	NH4	NTK	PT	Alcalinidad	Carbohidratos	Proteínas	Lípidos	Etanol	Acetato
	primario	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g CaCO3/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
FT	0 %	378	363	405	73.44	0.39	70	10.2	160	1690	430	245	903	1519.5
FC	0 %	440	423	840	75.00	0.495	66	19.7	140	2027	480	343	1986	2389.5
FP	0 %	271	258	390	37.64	0.645	44	5.8	170	775	560	212	1932	2181
FL	0 %	340	327	1290	42.52	0.69	17	13.4	160	819	330	357	951	1464

Nota. Resultados de la caracterización de las mezclas de FORSU. Elaboración propia, realizado con Excel.

La caracterización del lodo primario (LP) se presenta en la Tabla 10 a continuación.

Tabla 10 .

Caracterización fisicoquímica y componentes traza de metales en el LP

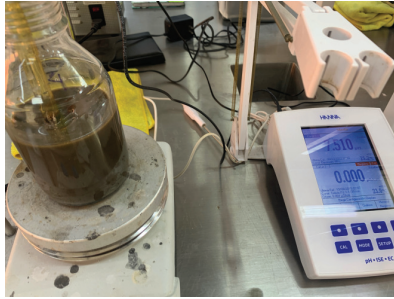
Parámetro	Dimensional	Resultado
ST	g/L	56.20
SV	g/L	40.44
DQO	g/L	292.50
TOC	g/L	9.34
NH ₄	g/L	0.09
NTK	g/L	38.92
PT	g/L	0.65
Alcalinidad	g CaCO ₃ /L	400.00
Carbohidratos	mg/L	69.40
Proteínas	mg/L	60.00
Lípidos	mg/L	30.88
Fe	mg/L	170.75
Ni	mg/L	0.08
Mg	mg/L	26.80
Cu	mg/L	7.18
Na	mg/L	49.60
Ca	mg/L	246.00
Zn	mg/L	1.80
Cr	mg/L	0.11
Co	mg/L	0.06

Nota. Resultados de la caracterización del lodo primario. Elaboración propia, realizado con Excel.

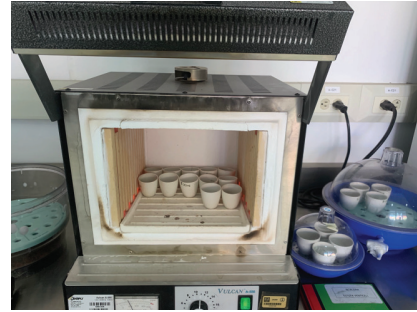
Figura 8.

Proceso de caracterización de los lodos primarios

a)



b)



Nota. La imagen a muestra el proceso de determinación de pH, y la imagen b, muestra la determinación de los sólidos volátiles. Elaboración propia.

4.1.2. Producción de biohidrógeno y biometano producto de la monodigestión

Luego de realizada la caracterización de todas las mezclas de la FORSU y del lodo primario, se procedió a realizar el primer ensayo en lote utilizando el sistema de ensayo automático de potencial de hidrogeno (PBH) y potencial de metano (PBM) AMPTS II, según las secuencias y condiciones operativas indicadas en la tabla 11 para la monodigestión.

Tabla 11.*Condiciones operativas para la fermentación y metanogénesis en monodigestión*

No. De ensayo	Sustrato	Cosustrato	Primera etapa		Segunda etapa	
			(Fermentación)		(Metanogénesis)	
			Proporción de lodo			
		primario	pH inicial	T °C	pH inicial	T °C
Ensayo 1	FT	0	5	37	7.5	37
(Monodigestión)	FC	0	5	37	7.5	37
Línea base	FP	0	5	37	7.5	37
	FL	0	5	37	7.5	37
	LP	1	5	37	7.5	37
	INOCULO	---	5	37	7.5	37

Nota. Condiciones de pH inicial y temperatura utilizadas en la etapa de fermentación y de metanogénesis del ensayo 1. Elaboración propia, realizado con Excel.

Los resultados del PBH y PMB, así como la concentración de hidrógeno y metano dentro del biogás respectivamente, para cada uno de los ensayos en monodigestión se presenta en la Tabla 12, así mismo, en el apéndice 1 se pueden consultar los gráficos correspondientes a la cinética de reacción biológica para cada ensayo y cada etapa de digestión anaerobia a partir de los cuales se tomaron los resultados de biohidrógeno y biometano anteriormente reportados. En dichos gráficos, los datos experimentales se ajustan al modelo de Gompertz. La desviación estándar refleja la diferencia entre los triplicados en cada ensayo.

Para la construcción de los gráficos del Apéndice 1 se utilizó el reporte generado por el equipo AMPTS, con los registros del volumen y producción de biogás diario a lo largo de todo el tiempo que duró la cinética de reacción biológica.

Tabla 12.*Resultados del PBH y PBM de cada ensayo en monodigestión*

No. De ensayo	Sustrato y Cosustrato	PBH	% H ₂	PBM	% CH ₄
		[mL H ₂ /g SVad]	% en biogás	[mL CH ₄ /g SVad]	% en biogás
Ensayo 1	FT	41.5 ± 5.1	43.19 %	494.2 ± 41	59.44 %
(Monodigestión)	FC	48.8 ± 27.6	48.09 %	480.9 ± 64.7	59.24 %
Línea base	FP	29.5 ± 6.4	43.19 %	513.7 ± 85.5	60.46 %
	FL	29.9 ± 6.8	35.01 %	512.9 ± 94.2	60.39 %
	LP	64.7 ± 2.5	6.21 %	164.3 ± 6.9	65.96 %

Nota. Resultados de PBH y PBM de la monodigestión de FORSU utilizados como línea base. Elaboración propia, realizado con Excel.

4.2. Producción de biocombustibles gaseosos (hidrógeno y metano) a partir de la FORSU en codigestión con LP

A continuación, se presentan los resultados de la caracterización de cada mezcla de la FORSU realizada con cosustrato. Posteriormente se presentan los resultados del potencial de biohidrógeno y biometano de cada una de las mezclas entre la FORSU y una proporción de LP en codigestión.

4.2.1. Caracterización de los cosustratos a partir de la FORSU y LP

En la Tabla 13 se muestran los resultados de la caracterización del cosustrato entre la FORSU y LP. Los valores mostrados son producto de relaciones estequiométricas según el peso de cada sustrato entre la FORSU y LP utilizados para la conformación de nuevas mezclas con distintas proporciones de lodo primario. Debido a que la mezcla entre sustratos no produce una reacción

química que modifique las sustancias después de producirse la mezcla, las concentraciones resultantes de cada parámetro tienen un comportamiento lineal.

Tabla 13.

Caracterización fisicoquímica de las mezclas de la FORSU con lodo primario

Sustrato	% de Lodo	ST	SV	DQO	TOC	NH4	NTK	PT	Alcalinidad	Carbohidratos	Proteínas	Lípidos	Etanol	Acetato
	primario	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g CaCO3/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
FT_20	20 %	240	225	357	46	0.260	57	6.1	263	997	272	153	517	870
FC_20	20 %	261	245	584	44	0.303	53	10.8	261	1113	284	197	1058	1273
FP_20	20 %	196	182	356	28	0.450	42	4.0	250	529	386	149	1259	1422
FL_20	20 %	225	211	888	29	0.446	26	8.3	257	517	221	225	567	874
FT_30	30 %	197	182	342	37	0.219	53	4.9	295	780	222	125	396	666
FC_30	30 %	210	194	512	36	0.249	50	8.3	296	854	228	156	796	958
FP_30	30 %	169	154	343	24	0.378	41	3.3	280	438	321	126	1010	1140
FL_30	30 %	188	173	755	25	0.366	29	6.6	289	417	185	182	441	679
FT_40	40 %	164	148	330	31	0.187	49	3.9	320	610	183	102	301	507
FC_40	40 %	172	156	457	29	0.208	47	6.4	322	659	186	125	598	719
FP_40	40 %	145	131	333	21	0.317	41	2.8	305	362	267	106	800	903
FL_40	40 %	158	143	650	21	0.302	31	5.2	314	338	157	148	341	524

Nota. Resultados de la caracterización fisicoquímica y bromatológica de las mezclas de FORSU con lodo primario. Elaboración propia, realizado con Excel.

4.2.2. Producción de biohidrógeno y biometano producto de la codigestión

Al finalizar el primer ensayo, se procedió a agregar una proporción de lodos a las mezclas de la FORSU para dar inicios a los ensayos 2, 3 y 4 que corresponden a la codigestión. De igual manera que en la monodigestión, también se utilizó el sistema de ensayo automático de potencial de hidrógeno (PBH) y potencial de metano (PBM) AMPTS II, según las secuencias y condiciones operativas indicadas en la Tabla 14.

Tabla 14.*Condiciones operativas en la fermentación y metanogénesis en cada codigestión*

No. De ensayo	Sustrato	Cosustrato	Primera etapa (fermentación)		Segunda etapa (metanogénesis)	
			PROP_LOD			
		O	pH inicial	T °C	pH inicial	T °C
Ensayo 2	FT_20	0.2	5	37	7.5	37
(Codigestión 1)	FC_20	0.2	5	37	7.5	37
	FP_20	0.2	5	37	7.5	37
	FL_20	0.2	5	37	7.5	37
Ensayo 3	FT_30	0.3	5	37	7.5	37
(Codigestión 2)	FC_30	0.3	5	37	7.5	37
	FP_30	0.3	5	37	7.5	37
	FL_30	0.3	5	37	7.5	37
Ensayo 4	FT_40	0.4	5	37	7.5	37
(Codigestión 3)	FC_40	0.4	5	37	7.5	37
	FP_40	0.4	5	37	7.5	37
	FL_40	0.4	5	37	7.5	37

Nota. Condiciones de pH inicial y temperatura utilizadas en la etapa de fermentación y de metanogénesis del ensayo 2, 3 y 4. Elaboración propia, realizado con Excel.

Los resultados del PBH y PMB, así como la concentración de hidrógeno y metano dentro del biogás respectivamente, para cada uno de los ensayos en codigestión se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15.*Resultados del PBH y PBM de cada ensayo de codigestión*

No. De ensayo	Sustrato y Cosustrato	PBH	% H ₂	PBM	% CH ₄
		[mL H ₂ /g SVad]	% en biogás	[mL CH ₄ /g SVad]	% en biogás
Ensayo 2 (Codigestión 1)	FT_20	42.3 ± 5.8	37.60 %	480.8 ± 18.9	42.34 %
	FC_20	50.7 ± 7.9	41.50 %	460.1 ± 19.5	37.78 %
	FP_20	28.9 ± 4.3	27.60 %	467.1 ± 29.1	38.48 %
	FL_20	27.6 ± 4.4	26.70 %	476.7 ± 33.4	37.56 %
(Codigestión 2)	FT_30	35 ± 1.3	33.14 %	432.5 ± 15.1	58.14 %
	FC_30	40.4 ± 0.9	37.41 %	425.6 ± 5.1	58.89 %
	FP_30	22.6 ± 1.1	22.51 %	427.8 ± 11.7	60.94 %
	FL_30	16.7 ± 0.2	16.21 %	461.8 ± 13.3	63.30 %
Ensayo 4 (Codigestión 3)	FT_40	31.6 ± 0.6	30.22 %	488.4 ± 40	63.56 %
	FC_40	37 ± 0.8	37.98 %	495.3 ± 51.8	62.67 %
	FP_40	23.8 ± 0.5	29.18 %	488.4 ± 37.1	60.26 %
	FL_40	18.7 ± 0.5	30.22 %	500.3 ± 70.1	63.12 %

Nota. Resultados de PBH y PBM de la codigestión de FORSU con lodos primarios en los ensayos 2, 3 y 4. Elaboración propia, realizado con Excel.

4.3. Análisis estadístico de resultados: correlación entre variables y modelo predictor

Posteriormente, con los resultados de la caracterización de las mezclas de FORSU, así como de los potenciales de biohidrógeno y biometano obtenidos, se procedió a realizar el análisis estadístico, el cual inició con el cálculo de varianza.

4.3.1. Resultados de cálculos de varianza

En la Tabla 16 se muestran los resultados de las varianzas de cada variable independiente.

Tabla 16.

Varianza de las variables independientes

Parámetro	Variable	Varianza
FT	SUSTRATO_FT	0.1912
FC	SUSTRATO_FC	0.1912
FP	SUSTRATO_FP	0.1912
FL	SUSTRATO_FL	0.1912
Proporción de lodo primario	PROP_LODO	0.0572
Concentración de carbohidratos	CARB	240249
Concentración de proteínas	PROTEINA	16056
Concentración de lípidos	LIPIDOS	6945

Nota. Resultados de varianza sobre las variables independientes. Elaboración propia, realizado con Excel.

Del análisis de las varianzas en la tabla 16, se observa que las variables PROP_LODO, CARB, PROTEINA, y LIPIDO son las principales variables predictoras y no muestran multicolinealidad.

4.3.2. Resultados del cálculo de correlaciones

En la Tabla 17 se muestran los resultados de la correlación, que, según el análisis de varianza, son las principales variables predictoras para tomar en cuenta para la elaboración del modelo, para evitar utilizar variables con

multicolinealidad. Se puede observar que las variables que mayor correlación presentan entre ellas son PROP_LODO y CARB.

Tabla 17.

Correlaciones entre principales variables independientes

	PROP_LODO	CARB	PROTEINA	LIPIDOS
PROP_LODO	1	-0.6880728	-0.8342016	-0.8504487
CARB	-0.6880728	1	0.57213614	0.63097376
PROTEINA	-0.8342016	0.57213614	1	0.54096304
LIPIDOS	-0.8504487	0.63097376	0.54096304	1

Nota. Resultados de la correlación entre variables. Elaboración propia, realizado con Excel.

4.3.3. Resultados de los modelos de regresión

Una vez definidas las variables a incluir en el modelo según el análisis de varianza y multicolinealidad de las variables independientes, se procedió a realizar ejercicios de diferentes modelos, utilizando el criterio del R^2 ajustado, para determinar la utilidad de cada variable dentro del modelo de regresión.

En las Tablas 18 y 19 se muestran los resultados del R^2 y R^2 ajustado, respectivamente. Dichas tablas, muestran los modelos planteados para la selección del mejor modelo según el comportamiento de R^2 y R^2 ajustado. Para el modelo predictor del PHB se utilizó regresión múltiple y para el modelo predictor del PBM se utilizó regresión polinomial.

Tabla 18.

R² ajustado según la inclusión de variables independientes al modelo regresor

Modelo	PROP_LODO	CARB	PROTEINA	LIPIDOS	R ²	R ² ajustado	p-value
Modelo 1	X	X	X	X	0.7147	0.6196	0.002852
Modelo 2	X	X	X		0.7005	0.6314	0.001032
Modelo 3	X	X			0.6772	0.6311	0.000365

Nota. Resultados del R² ajustado de cada modelo analizado para la predicción del PBH. Elaboración propia, realizado con Excel.

Según el comportamiento del R² y R² ajustado mostrado en la Tabla 18, se elige el modelo 3 como el modelo a utilizar para la predicción del PBH.

Tabla 19.

R² ajustado según el aumento de grado polinomial en la variable independiente

Modelo	PBH	PBH1	PBH2	PBH3	R ²	R ² ajustado	p-value
Modelo 1	X	X			0.3671	0.3249	0.1
Modelo 2	X	X	X		0.7736	0.7413	0.03929
Modelo 3	X	X	X	X	0.8657	0.8347	0.01051

Nota. Resultados del R² ajustado de cada modelo analizado para la predicción del PBM. Elaboración propia, realizado con Excel.

En la Tabla 20 se muestran los coeficientes para cada variable independiente, así como su *p-value*, mismos con los que posteriormente se construirá la ecuación del modelo.

Tabla 20.

Coefficientes de cada variable independiente, resultado de una regresión múltiple

	Coefficiente	<i>p-value</i>
Intercepto	-0.068526	0.991951
PROP_LODO	52.716116	0.000251
CARB	0.026815	0.000171

Nota. Coeficientes del modelo seleccionado para la predicción del PBH. Elaboración propia, realizado con Excel.

A continuación, se muestra la ecuación 1 que refleja el resultado de los coeficientes obtenidos en el modelo 3, definido como el modelo con mejor ajuste para predecir el PBH observado en la Tabla 20.

$$PBH = -0.068526 + (52.716116 * PROP_LODO) + (0.026815 * CARB) \quad (1)$$

Donde:

PBH: producción de hidrógeno expresado en ml H₂ / g SV_{add}

CARB: contenido de carbohidratos en la FORSU expresado en mg/L.

PROP_LODO: proporción de lodo en la mezcla con la FORSU expresado en %.

Así mismo, según el comportamiento del R² y R² ajustado mostrado en la tabla 19, se elige el modelo 3 como el modelo a utilizar para la predicción del PBM. En la Tabla 21 se muestran los coeficientes para cada variable independiente, así como su *p-value*, mismos coeficientes que se utilizarán posteriormente para construir la ecuación del modelo.

Tabla 21.

Coefficientes de la variable independiente PBH para cada grado polinomial

	Coefficiente	<i>p-value</i>
Intercepto	712.8811	0.00117
PBH1	-26.1581	0.1
PBH2	0.8982	0.03929
PBH3	-0.0096	0.01051

Nota. Coeficientes del modelo seleccionado para la predicción del PBM. Elaboración propia, realizado con Excel.

A continuación, se muestra la ecuación 2 que refleja el resultado de los coeficientes obtenidos en el modelo 3, definido como el modelo con mejor ajuste para predecir el PBM observado en la Tabla 21.

$$PBM = 712.8811 + (-26.1581 * PBH) + (0.8982 * PBH^2) + (-0.0096 * PBH^3) \quad (2)$$

Donde:

PBM: producción de metano expresado en ml H₂ / g SV_{add}

PBH: producción de hidrógeno expresado en ml H₂ / g SV_{add}
obtenido en la ecuación 1.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Producción de biocombustibles gaseosos (hidrógeno y metano) a partir de la FORSU y LP en monodigestión

A continuación, se comparan los resultados de este estudio con otros estudios similares con el objeto de encontrar una explicación a las similitudes o diferencias encontradas. Se iniciará discutiendo las caracterizaciones, posteriormente los potenciales de biohidrógeno y metano, y finalmente los resultados de correlación y aplicación de un modelo matemático.

5.1.1. Características de las mezclas de la FORSU

Los trabajos de investigación que utilizan la FORSU para evaluar el comportamiento de la digestión anaerobia con dicho sustrato, suelen utilizar la FORSU sintética o la FORSU tomada de rellenos sanitarios (Dehkordi, et al., 2020; Michalopoulos, et al., 2020).

En el caso de este estudio, se utilizó una preparación sintética tomando los constituyentes de un mercado local, cuya caracterización está en congruencia comparada en la Tabla 22 con el estudio de Santiago *et. al.* (2020) quienes también utilizaron una preparación sintética y han reportado sus resultados en la misma manera que este estudio, haciéndolos comparables. Una diferencia se observa en el resultado de carbohidratos, siendo menor en este estudio. Parte de dicha diferencia se le puede atribuir al porcentaje de frutas, verduras y pan utilizado para realizar la mezcla, que, en el caso de este estudio, fue 15 % menor en relación con el estudio de Santiago, et al., (2020).

Otras diferencias son atribuibles a la forma de preparación de la muestra en cuanto a trituración y congelamiento para conservación de las mismas, mecanismos habitualmente utilizados como pretratamiento del sustrato, que ayudan a aumentar la fracción soluble del mismo, y por tanto, a mayor solubilidad de la muestra, se obtiene mayor concentración en sus parámetros caracterizados. En cuanto al estudio de Lee, et al., (2022) la FORSU fue obtenida de una planta de tratamiento de residuos sólidos, se puede observar concentraciones de 2 a 4 veces menores a las de las mezclas sintéticas. Este hecho es atribuible al proceso de elaboración de las mezclas sintéticas en contraste con el proceso de obtención en un sitio de tratamiento, en donde la fracción orgánica se ve mezclada con otros constituyentes sólidos y líquidos que impactan su composición, y por tanto también impactan la valorización del residuo al tener un efecto sobre los potenciales de biohidrógeno y biometano, lo que constituye una parte de la hipótesis de este estudio.

Tabla 22.

Comparación de caracterización de la FORSU sintética con otros estudios

	ST	SV	DQO t	N-NH3	Carbohidratos	Proteínas	Lípidos	pH	Fuente
Sustrato	g/L	g/L	g/L	g/L	mg/L	mg/L	mg/L		
FW	150.50	140.6	192	0.280	ND	ND	ND	4.31	Lee <i>et. al.</i> , (2022)
OSW	441.00	353.00	449	0.490	7,163.00	ND	ND	7.42	Santiago (2019)
FT	378.09	363.12	405	0.390	1,690.00	434.25	244.50	6.07	Este estudio
FC	440.21	423.39	840	0.495	2,027.00	483.00	343.33	6.00	Este estudio
FP	271.36	258.10	390	0.645	775.20	564.75	212.25	6.44	Este estudio
FL	339.76	326.68	1290	0.690	819.20	326.38	357.50	6.47	Este estudio

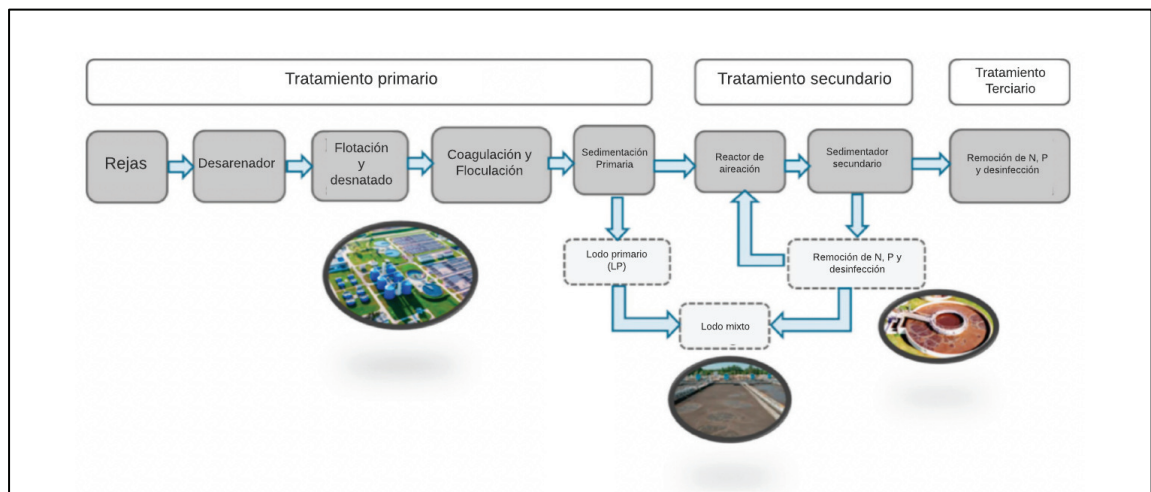
Nota. Se muestran resultados de otros estudios en comparación con los obtenidos en este estudio con respecto a las características de la FORSU. ND=no determinado, FW= *Food waste*. Elaboración propia, realizado con Excel.

5.1.2. Características del lodo primario (LP)

Como se observa en la figura 9, el lodo primario se obtiene de las plantas de tratamiento de aguas residuales, principalmente por métodos de separación física como flotación o sedimentación, previo a recibir cualquier tratamiento químico o biológico. Los lodos obtenidos de reactores biológicos o sedimentación secundaria tienen menor contenido orgánico debido al propio proceso de depuración biológico que conlleva consumo de materia orgánica para reproducción celular, así como liberación de energía (Gavala, et al., 2003; Zhou, et al., 2013).

Figura 9.

Esquema de las unidades de tratamiento de aguas residuales



Nota. Etapas de tratamiento en un sistema de tratamiento de aguas residuales y los procesos unitarios que lo componen. Tomado y adaptado de D. Elalami *et. al.* (2019). Pretreatment and co-digestion of wastewater sludge for biogas production: Recent research advances and trends [Pretratamiento y codigestión de lodos de aguas residuales para la producción de biogás: avances y tendencias recientes en la investigación]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109287. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109287>

En cuanto a las características de los lodos primarios, estarán en función del tiempo de descarte de lodos y de la concentración de sólidos alcanzada dentro de la unidad de separación física.

Este hecho se puede observar en la Tabla 23 donde se compara la caracterización de lodos primarios obtenidos de varios estudios. Los resultados muestran que en los casos de mayor concentración de sólidos totales (ST), se tiene mayor concentración de DQO. La composición orgánica de dicha DQO en cuanto a contenido de carbohidratos, proteínas y lípidos, dependerá de las actividades que hayan originado las aguas residuales. Así mismo, en los estudios de Zhu, et al., (2008); Mahdy, et al., (2015); Guo, et al., (2022); y este estudio, la concentración de carbohidratos se encuentra en el rango de 60 mg/L a 120 mg/L, aproximadamente, lo que denota un rango típico para las características del lodo primario.

Tabla 23.

Comparación de caracterización de lodo primario con otros estudios

	ST	SV	DQO t	N-NH3	Carbohidratos	Proteínas	Lípidos	pH	Fuente
Sustrato	g/L	g/L	g/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L		
SS	100.3	70.7	101.2	1,000	ND	ND	ND	6.14	Lee <i>et. al.</i> , (2022)
LP	12.50	7.50	3.57	ND	60.70	565.40	ND	7.20	Guo <i>et. al.</i> , (2022)
LP	29.60	19.70	ND	ND	45.90	26.80	ND	ND	Mahdy <i>et. al.</i> , (2015)
LP	33.50	26.40	33.90	360	3,200.00	ND	ND	6.00	Zhou <i>et. al.</i> , (2013)
LP	30.60	19.80	35.90	ND	124.00	ND	ND	5.90	Zhu <i>et. al.</i> , (2008)
LP	56.2	40.44	293.00	85	69.4	60	30.88	6.80	Este estudio

Nota. Resultados de caracterización de lodo primario en otros estudios comparados con los obtenidos en este estudio. ND=no determinado, SS= Sewage Sludge. Elaboración propia, realizado con Excel.

5.1.3. Características del cosustrato FORSU: LP

En los resultados de caracterización de los cosustratos de este estudio reportados anteriormente, se observa que a medida que aumenta la proporción de lodos, estos tienen un efecto de dilución, y, por tanto, la concentración de sólidos, DQO, nutrientes y parámetros orgánicos, disminuye. Lo anterior es debido a que los lodos contienen principalmente agua, en un 99 %, por lo que aportan muy poca materia orgánica y nutrientes (Guo *et. al.*, 2022).

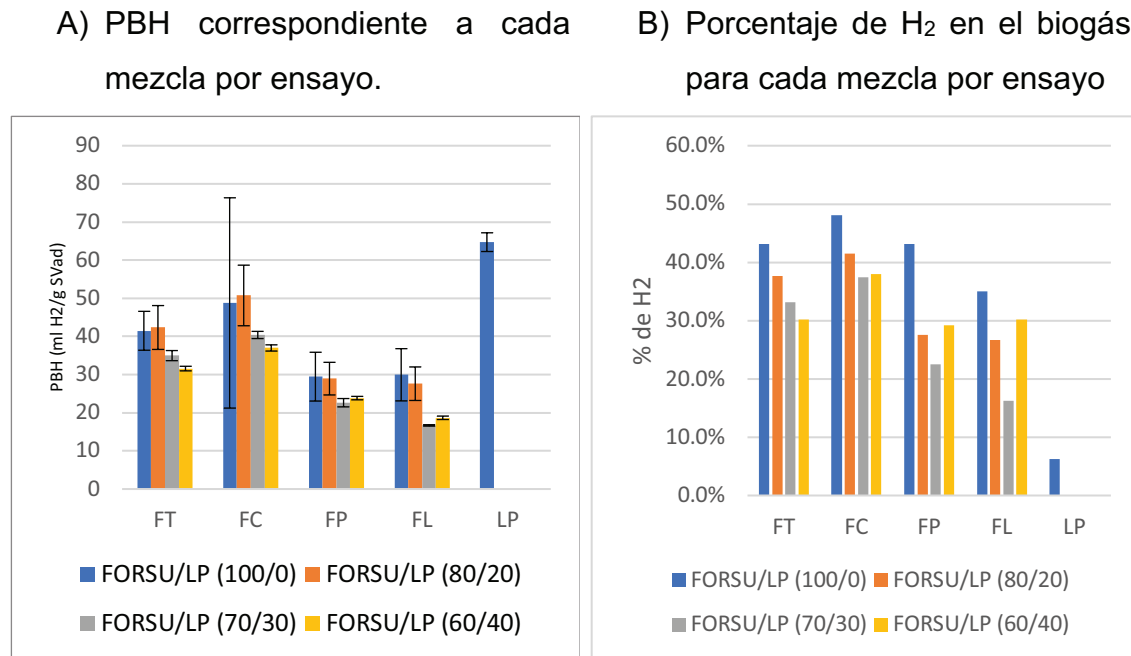
Caso contrario sucede con la alcalinidad, en donde a medida que aumenta la proporción de lodos, aumenta la alcalinidad del cosustrato. Lo anterior es debido a que los lodos tienen mayor contenido de carbonatos de calcio que las mezclas de la FORSU, tal como se evidencia en las tablas de resultados de caracterización de ambos sustratos. Este suceso es favorable para la digestión anaerobia debido a que esta es altamente afectada por baja alcalinidad. Por tanto, el hecho de complementar la FORSU con LP en un cosustrato es favorable para el proceso anaerobio, así como para reducción de costos operativos por consumo de reactivos destinados a aumentar la alcalinidad en el proceso como medida de mejorar su estabilidad.

5.1.4. Potencial de biohidrógeno (PBH) en monodigestión

En la figura 10 se ilustra el PBH obtenido en el ensayo de monodigestión: ensayo 1 (FORSU/LP: 100/0), y ensayos de codigestión: ensayo 2 (FORSU/LP: 80/20), ensayo 3 (FORSU/LP: 70/30), y ensayo 4 (FORSU/LP: 60/40), y en el apéndice se muestran las curvas del PBH a lo largo de toda la duración de la cinética de reacción ajustada al modelo de Gompertz, y su desviación estándar. Así mismo se muestra la concentración de hidrógeno en el biogás para cada ensayo.

Figura 10.

PBH y porcentaje de hidrógeno producido por cada mezcla de la FORSU en cada ensayo



Nota. Gráficos de barra que ilustran los resultados de a) PBH y b) contenido de hidrógeno en el biogás; para cada mezcla y cada ensayo. Elaboración propia, realizado con Excel.

De todas las mezclas que representan la FORSU en monodigestión, la mezcla con mayor contenido de carbohidrato fue la que tuvo un mayor PHB con 49 mL H₂/g SSV_{ad}, y el menor PBH fue para la mezcla con mayor contenido de proteína con 29 mL H₂/g SSV_{ad}. Los resultados anteriores son congruentes con lo reportado por Tarazona *et. al.*, (2022), quienes ensayaron sustratos al 100 % de concentración de carbohidratos, lípidos y proteínas. Ellos reportaron para los sustratos con concentración del 100 % de lípidos y proteínas una producción de hidrógeno de 0 NL H₂ /L_{reactor}. Lo anterior, es consistente con los resultados de este estudio, donde los PBH más bajos fueron para las mezclas de la FORSU

con mayor contenido de lípidos y proteínas, 29 mL H₂/g SSV_{ad} y 30 mL H₂/g SSV_{ad} respectivamente.

En cuanto al PBH del LP, se observa un resultado de 69.40 mL/g SSV_{ad}, sin embargo, como se aprecia en la figura 11 parte A, más del 90 % del biogás producido es CO₂; al hacer la medición a la hora 16 de la cinética de reacción. Al hacer nuevamente la medición a la hora 20 (Figura 11 parte B), se observa el mismo comportamiento, e incluso se encuentra ya una traza de CH₄. Lo anterior evidencia que aun habiendo sido preparado el ensayo para la producción de hidrógeno, utilizando pH 5 e inóculo productor de hidrógeno (género *Clostridium*), la hidrogenotrofia se vio inhibida dando partida a la metanogénesis.

A este respecto, Berrocal, (2017) reporta tres causas relacionadas a la adición de lodos como cosustrato en una fermentación anaerobia, y cuyo efecto es negativo en el PBH. Dichas causas se relacionan con la alcalinización del pH por encima del ideal para el proceso de producción de hidrógeno, toxicidad debido a la liberación excesiva de cationes amonio, y proliferación de los microorganismos nativos en el lodo por encima de los microorganismos hidrogenotróficos.

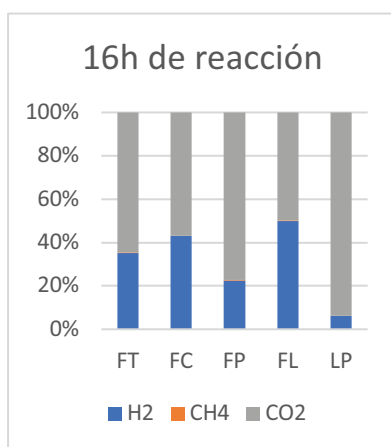
Sobre la proporción de hidrógeno en el biogás ilustrado para todos los ensayos en monodigestión de la Figura 11, la mayor concentración se dio en el ensayo 1, monodigestión de la FORSU FT (FORSU/LP: 100/0), con 48.09 % de hidrógeno en el biogás, y el mínimo para la mezcla FP con 21 %. De igual manera, Alibardi y Cossu (2016), reportaron para una mezcla con mayor contenido de proteína, el menor porcentaje de hidrógeno en el biogás. Ellos realizaron mezclas variando el contenido de carbohidratos lípidos y proteínas para estudiar el comportamiento en la producción de hidrógeno. En sus resultados, reportaron una concentración de hidrógeno en el biogás del 3 % para una mezcla preparada

a partir de carne roja, carne de pescado y queso, es decir, principalmente proteína.

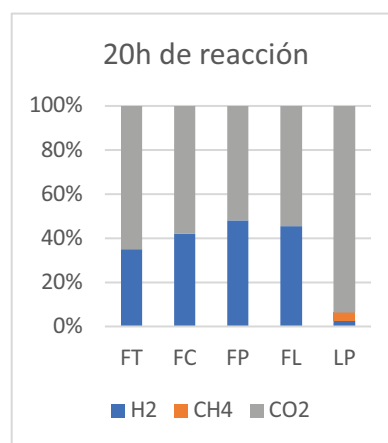
Figura 11.

Porcentaje de hidrógeno tomado a las 16h y 20h en ensayos de monodigestión

A) Ensayo 1: monodigestión



B) Ensayo 1: monodigestión



Nota. Gráficos de barra que ilustran los resultados del contenido de hidrógeno en la monodigestión en a) la hora 16 de reacción y b) la hora 20 de reacción. Elaboración propia, realizado con Excel.

Según los resultados observados del PBH, y en función de ir formulando la respuesta a la hipótesis de este estudio, es importante hacer notar el efecto en el PBH cuando aumenta la concentración de carbohidratos en la mezcla de FORSU.

5.1.5. Potencial de biometano (PBM) en monodigestión

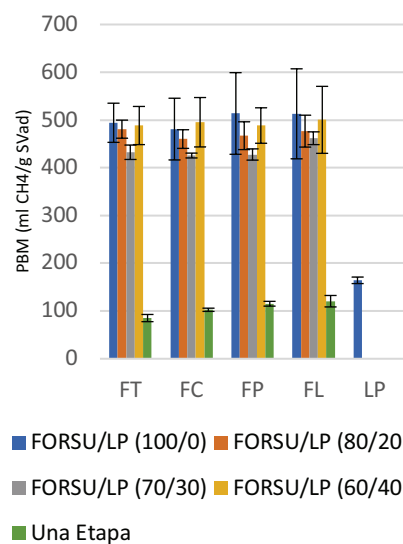
En la Figura 12 se ilustra el PBM y la concentración de metano en el biogás, para cada mezcla, en cada uno de los ensayos de metanogénesis, y en

el apéndice se muestran las curvas del PBM a lo largo de toda la duración de la cinética de reacción ajustada al modelo de Gompertz, y su desviación estándar.

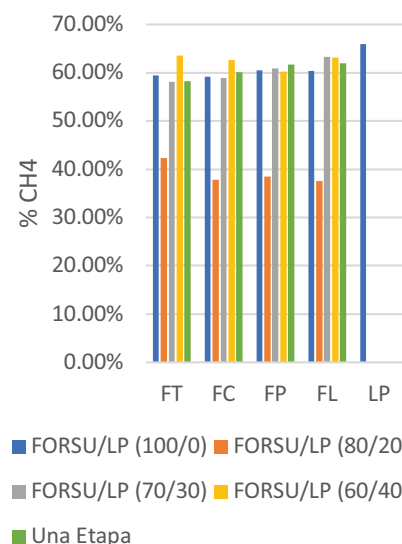
Figura 12.

PBM y porcentaje de hidrógeno producido por cada mezcla de la FORSU en cada ensayo

A) PBM correspondiente a cada mezcla por ensayo.



B) Porcentaje de CH₄ en el biogás para cada mezcla por ensayo.



Nota. Gráficos de barra que ilustran los resultados de a) PBM y b) contenido de metano en el biogás; para cada mezcla y ensayo. Elaboración propia, realizado con Excel.

Se puede observar en la Figura 11 que para todas las mezclas de la FORSU como monosustrato, el PBM tuvo un comportamiento uniforme, donde el máximo se reportó para la mezcla FP en el ensayo 1 con 513 mL CH₄/gSV_{ad}, y el mínimo para las mezclas de la FORSU fue para la mezcla con mayor concentración de carbohidratos (FC) con 480 mL CH₄/gSV_{ad}. En cuanto al lodo

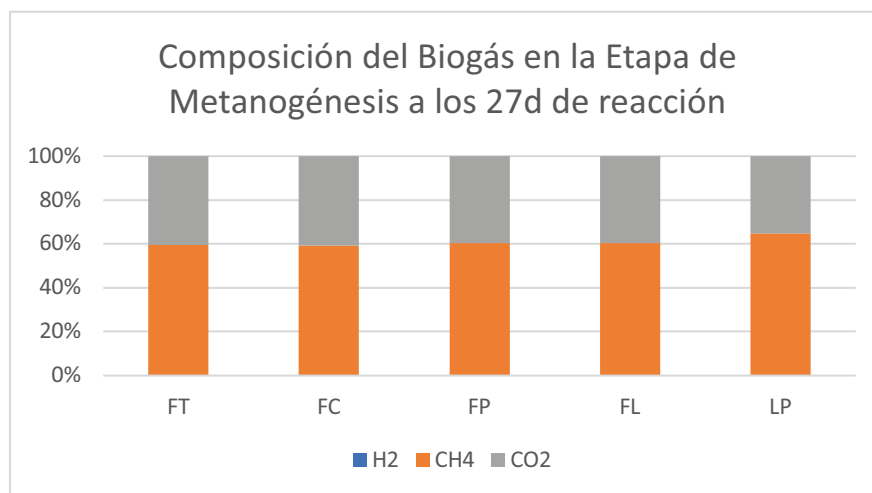
primario (LP) el PBM fue de 164 mL CH₄/gSV_{ad}, aún más bajo que la mezcla FC. Esto es debido al alto porcentaje de humedad del sustrato y bajo contenido orgánico de los lodos (Elalami, et al., 2019).

En otro estudio, Yue, et al., (2020), reportaron una producción de metano en digestión anaerobia en 2 etapas a partir de residuos de alimentos; de 465 mL CH₄/gSV_{ad}. Aunque no reportan contenido de carbohidratos, lípidos y proteínas, su resultado se puede comparar con la mezcla de la FORSU típica de este estudio (FT), donde se obtuvo un PBM de 495 mL CH₄/gSV_{ad}. Se puede observar que los resultados son similares, y el ligero aumento en el resultado de este estudio es atribuible al manejo de la muestra que fue molido y descongelado, aumentando así la solubilidad de sus constituyentes, lo que favorece la transformación de la materia orgánica a metano.

Figura 13.

Porcentaje de metano en el biogás para los ensayos de digestión anaerobia

A) Ensayo 1: monodigestión



Nota. Gráficos de barra que ilustran los resultados del contenido de metano para cada mezcla a los 27 días de reacción. Elaboración propia, realizado con Excel.

En la Figura 13 se puede observar la concentración de metano en el biogás para cada una de las mezclas de la FORSU y el LP. La concentración de metano se mantuvo entre 59 % y 60 % para todas las mezclas de la FORSU y en 65 % para el LP. En todos los casos, los resultados se encuentran dentro de los valores típicos reportados en la literatura; como se discutirá más adelante.

5.2. Producción de biocombustibles gaseosos (hidrógeno y metano) a partir de la FORSU y LP en codigestión

Se desarrollará la producción de biocombustibles gaseosa, desarrollados en la investigación.

5.2.1. Potencial de biohidrógeno (PBH) a partir de codigestion

En cuanto al PBH, en la figura 10 presentada en la sección 6.1.4, se puede observar que la mezcla FC en el ensayo 2, codigestión FORSU/LP (80/20), produjo el resultado más alto con 50.75 mL H₂/g SV_{ad}. En contraste, el PBH más bajo reportado fue para la mezcla FL en el ensayo 3 (70/30) con 16.69 mL H₂/g SV_{ad}. Lo anterior hace evidente algunos puntos a resaltar. Por un lado, que es favorable la codigestión de la FORSU con lodos primarios comparado con la digestión anaerobia en monodigestión de la FORSU y LP solos.

Así mismo, se observa un comportamiento decreciente en forma general, relacionado al aumento de la proporción de lodos en el cosustrato a partir de la proporción de mezcla FORSU/LP (80/20), y esto, como se explicará más adelante, tiene que ver con la dilución del contenido de carbohidratos que sucede en el cosustrato a medida que aumenta la proporción de lodos, y al ser los carbohidratos el parámetro orgánico con mayor correlación al PBH, hecho que

se evidencia en este estudio, es de esperar su disminución al reducirse la concentración de carbohidratos. En el estudio de Zhou *et. al.*, (2013), reportan para una mezcla de FORSU/LP (75/20) el mayor PBH de 130 mL H₂/g SSV_{ad}, luego de haber ensayado diferentes proporciones de mezcla. Así mismo, encontró el mismo comportamiento decreciente en el PBH a medida que aumenta la proporción de LP a partir de la proporción de mezcla FORSU/LP (75/25).

Sobre la proporción de hidrógeno en el biogás la mayor concentración se dio para la mezcla FC en el ensayo 4 de codigestión ilustrados en la figura 14 parte A y 14 parte B con una concentración del 38 %. Se puede observar que con relación a la mayor proporción en el ensayo 1, monodigestión de la FORSU (FORSU/LP: 100/0) que fue de 48.09 % de hidrógeno en el biogás, el resultado en los ensayos de codigestión fue menor. Lo anterior se debe a la disminución en la concentración de carbohidratos que tienen una alta correlación con la producción de hidrógeno como se discutirá más adelante. La mínima concentración de hidrógeno se dio para la mezcla FL en el ensayo 3, codigestión FORSU/LP (70/30) con 16.21 %.

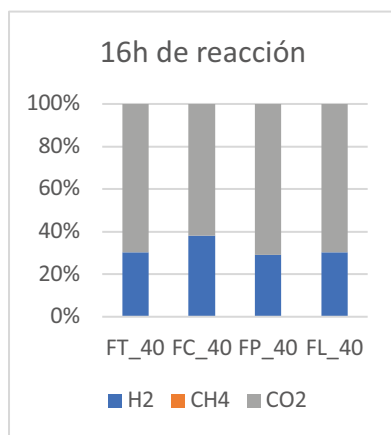
Es importante hacer notar en la Figura 14, que la concentración de hidrógeno en el biogás se midió en dos momentos diferentes para cada ensayo, siendo la primera medición a la hora 16 de la cinética de reacción, y la segunda a la hora 20. Se observa que, en todas las mediciones, la mayor proporción de hidrógeno se dio en la hora 16. Paralelamente, se corrió un ensayo adicional de 7 días de reacción en donde la proporción de hidrógeno se reportó por debajo del 8 %. Lo anterior deja claro que la proporción de hidrógeno en el biogás disminuye a partir de la hora 16 de reacción en un ensayo en lote. A este respecto, Berrocal (2017) indica que, la producción de hidrógeno se da en la fase de crecimiento exponencial de la fermentación, en un experimento en lote, y Escamilla-Alvarado

(2011) reportó que en promedio, la fase exponencial de la fermentación tuvo una duración de 18 horas.

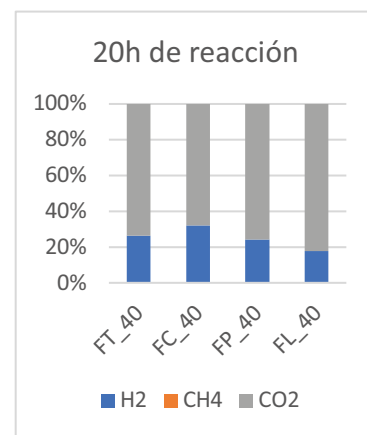
Figura 14.

Porcentaje de hidrógeno tomado a las 16h y 20h en ensayos de codigestión

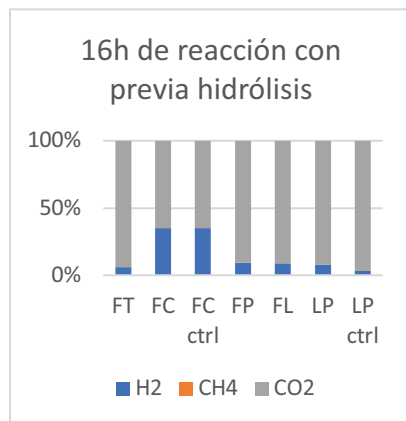
A) Ensayo 4: codigestión 60/40



B) Ensayo 4: codigestión 60/40

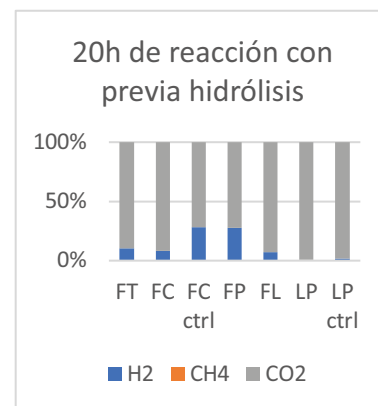


C) Ensayo 3ET: monofermentación con previa hidrólisis



D) Ensayo 3ET: monofermentación con previa hidrólisis

E)



Nota. Gráficos de barra que ilustran los resultados del contenido de hidrógeno en a) ensayo 4 a la hora 16 de reacción b) ensayo 4 a la hora 20 de reacción c) monofermentación a la hora 16 de reacción con pretratamiento de hidrólisis d) monofermentación a la hora 20 de reacción con pretratamiento de hidrólisis. Elaboración propia, realizado con Excel.

5.2.2. Potencial de biometano (PBM) a partir de codigestión

Para todas las mezclas de la FORSU, con y sin cosustrato, el máximo se reportó para la mezcla FP en el ensayo 1, monodigestión de cada mezcla, con 513 mL CH₄/gSV_{ad}, y el mínimo fue de 425 mL CH₄/gSV_{ad} para la mezcla FC del ensayo 3, codigestión FORSU/LP (70/30), siendo la diferencia entre el mínimo y el máximo PBM entre todos los ensayos del 17 %. La diferencia de las mezclas con presencia de la FORSU en comparación del LP, fue que las mezclas con la FORSU produjeron un poco más del triple de metano, ello debido al mayor contenido orgánico.

En el estudio de Lee *et. al.*, (2022), reportan un PBM producto de digestión anaerobia en dos etapas de, 220 mL /gSV add para lodo de purga, 354 mL /gSV_{ad} para la FORSU, y de 314 mL /gSV add y 368 mL /gSV add para la codigestión de lodos de purga y la FORSU, donde este último recibió un pretratamiento termo-alkalino.

Otro hecho que se puede resaltar es que, para el menor PBH de 16.69 mL H₂/gSV_{ad} se tuvo un PBM de 461.79 mL CH₄/gSV_{ad} que es cercano al PBM de 480 mL CH₄/gSV_{ad} que se obtuvo para el máximo PBH de 49.79 mL H₂/gSV_{ad}. Este resultado deja ver que, al producirse menos hidrógeno, se produce más metano, lo que puede deberse a que, al utilizarse menos materia orgánica para producir hidrógeno, esta queda en forma de metabolitos presentes en el medio líquido, y que es materia orgánica que estará disponible para la producción de metano en la segunda etapa de la digestión anaerobia. Un resultado similar fue reportado por Cuetos *et. al.* (2007) citado por Escamilla-Alvarado (2011), quienes evidenciaron que las mejores condiciones de producción de CH₄ estuvieron relacionadas a una reducción en la producción de H₂ en la etapa previa de fermentación.

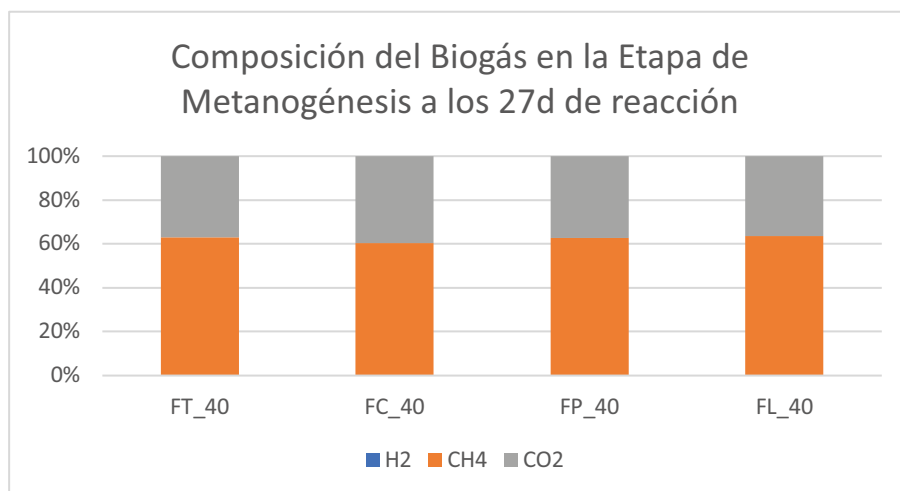
Así mismo, en el estudio de Escamilla-Alvarado (2011) se observa que el PBM de la codigestión es aproximadamente 12 % menor a la de la monodigestión de la FORSU, mismo hecho reflejado en los resultados de este estudio, en donde los PBM de los ensayos 2, 3 y 4 que corresponden a codigestión, estuvieron de 1 % a 17 % más bajas que el PBM de la monodigestión de la FORSU en el ensayo 1. Esta reducción en principio puede parecer desfavorable en la valorización de los residuos, sin embargo, el beneficio en los costos operativos debe ser tomando en cuenta, debido al ahorro en reactivos para aumentar alcalinidad que se obtiene al utilizar lodos primarios o de purga, que aportan alcalinidad y humedad para mejorar la digestión anaerobia de la FORSU.

En la Figura 15 se puede observar que, para todos los ensayos en este estudio, el porcentaje de metano se mantuvo entre 58 % a 66 % del biogás.

Figura 15.

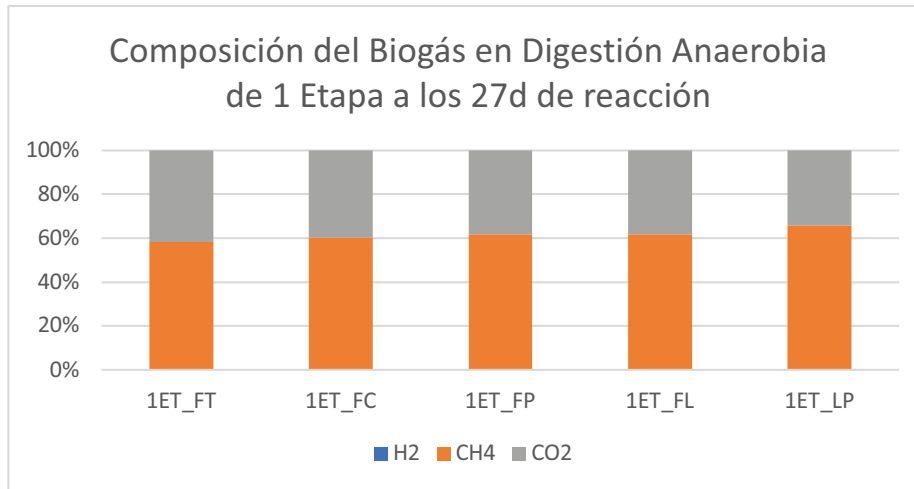
Porcentaje de metano en el biogás para los ensayos de digestión anaerobia

A) Ensayo 4: codigestión 60/40



Continuación de la Figura 15.

B) Ensayo 1ET: monodigestión en digestión anaerobia en 1 etapa.



Nota. Gráficos de barra que ilustran los resultados del contenido de metano en a) ensayo 4 a los 27 días de reacción b) ensayo en una etapa a los 27 días de reacción. Elaboración propia, realizado con Excel.

En el estudio de Escamilla-Alvarado (2011), reporta la concentración de metano en el biogás, producto de digestión anaerobia en 2 etapas de la FORSU, entre 56 % a 64 %. Como se puede corroborar, los rangos en los que se mantiene el porcentaje de metano son similares y no se ven afectados por la separación en etapas de la digestión anaerobia, ni tampoco por la codigestión.

Lo anterior es debido al metabolismo anaerobio, donde la materia orgánica es oxidada para reproducción celular, uso de energía, y como subproducto se obtiene la producción de biogás, y dicho proceso está dirigido por el metabolismo de los grupos de bacterias, en este caso arqueas metanogénicas, y que siempre serán los mismos grupos de microorganismos sin importar el tipo de residuo orgánico (Thiele & Zeikus, 1988).

Hasta acá, ha quedado de manifiesto el efecto de la concentración de los carbohidratos, lípidos y proteínas sobre el PBH, siendo siempre mayores los valores, a mayor concentración de carbohidratos. Por el contrario, se observa un menor PBM para las mezclas con mayor concentración de carbohidratos. Lo anterior hace sentido desde el proceso bioquímico que se da en la digestión anaerobia en dos etapas, siendo la primera etapa, el proceso de fermentación, donde las bacterias productoras de hidrógeno toman principalmente los carbohidratos para producir hidrógeno y por tanto, queda menor disponibilidad de este parámetro para la producción de metano.

Con los resultados del PBH y PBM se podría realizar una estimación del valor económico por la valorización energética de los mismos, como energías renovables, conociendo la cantidad de FORSU que se procesaría en digestión anaerobia en dos etapas. Para ello, se han reportado el valor de mercado del hidrógeno entre 4 a 6 euros por kilogramo y del metano en 1 euro por kilogramo, según su valor en bolsa consultado el 24 de noviembre de 2023.

5.3. Análisis estadístico de resultados: correlación entre variables y aplicación de modelo matemático

A continuación, se llevó a cabo el análisis estadístico entre los resultados de las variables independientes y las variables dependientes.

5.3.1. Correlaciones entre las variables CARB, PROTEINA y LIPIDOS de los monosustratos con el PBH y PBM

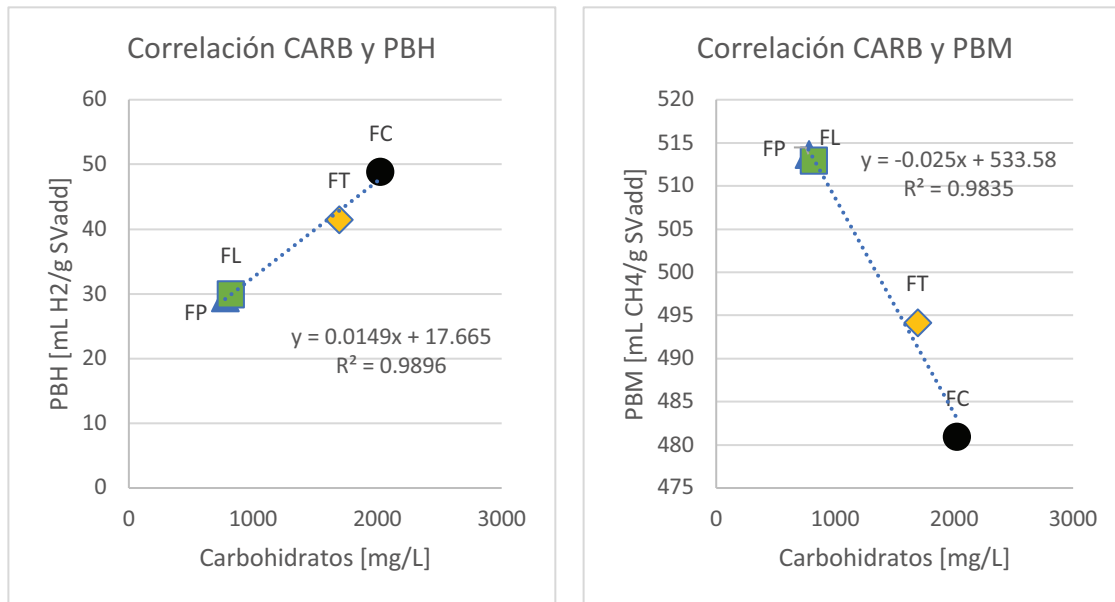
En la figura 16 se muestran los gráficos que ilustran la correlación entre cada parámetro bromatológico con el PBH y PBM respectivamente, a partir de las mezclas de la FORSU monosustrato. Se puede observar que en cuanto al

PBH, la mayor correlación la tiene con los carbohidratos ($R^2=0.99$), y la menor correlación con el PBH se da para la proteína. En contraste, en cuanto al PBM, los lípidos son los que muestran mayor significancia estadística ($R^2=0.077$). Lo anterior, matemáticamente hace sentido con la bioquímica del proceso, ya que, como se explicó anteriormente, si a mayor PBH se tiene menor PBM en el proceso bioquímico, ya que, al consumirse los carbohidratos en la primera etapa, la variable CARB es la que mayor correlación tiene con el PBH, por lo que matemáticamente la variable CARB mostró una correlación negativa con el PBM; debido a que hay menos disponibilidad de carbohidratos en la segunda etapa.

Figura 16.

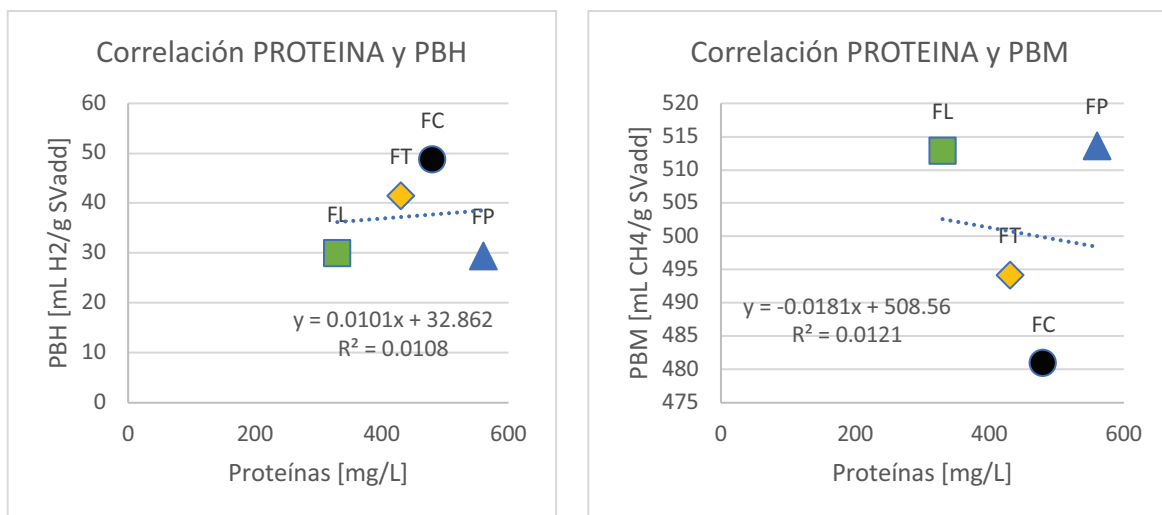
Resultados de correlación entre mezclas de la FORSU con el PBH y PBM

A) Correlación del contenido de carbohidratos en la FORSU con el PBH y PBM.

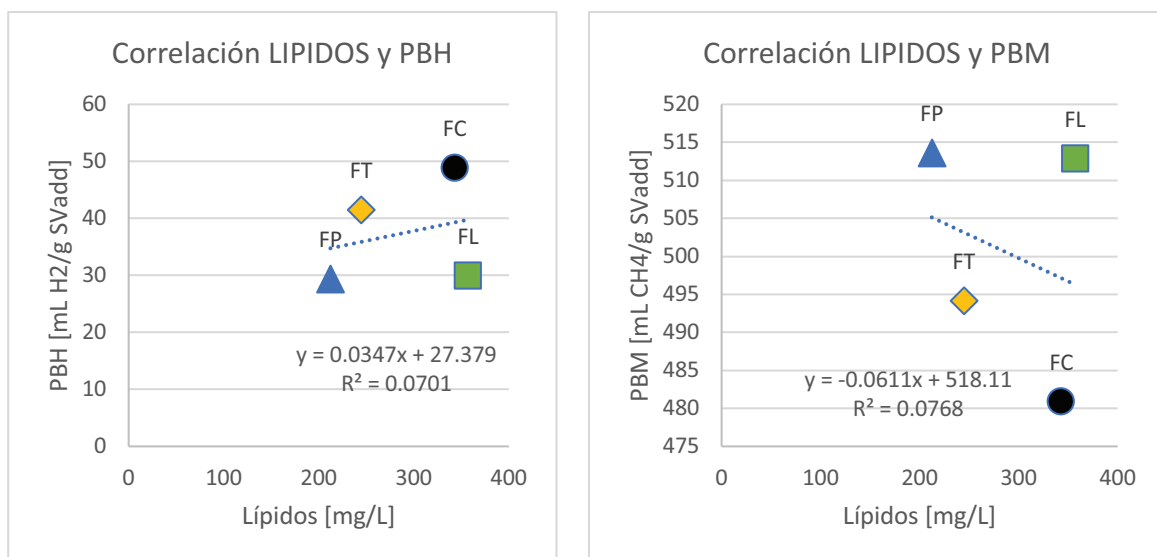


Continuación de la Figura 16.

B) Correlación del contenido de proteínas en la FORSU con el PBH y PBM.



C) Correlación del contenido de lípidos en la FORSU con la producción de hidrógeno.



Nota. Gráficos con los resultados de correlación en el ensayo de monodigestión para a) CARB con PBH y CARB con PBM b) PROTEINA con PBH y PROTEINA con PBM c) LIPIDOS con PBH y LIPIDOS con PBM. Elaboración propia, realizado con Excel.

En el estudio realizado por Alibardi y Cossu (2016), determinaron que la mayor correlación al PBH fueron los carbohidratos ($R^2=0.983$), mientras que las proteínas y lípidos mostraron una baja correlación ($R^2\leq 0.6$). Así mismo, reportan que para las muestras donde obtuvieron un mayor PBH, se reflejó en un menor PBM y viceversa. Este mismo hecho se refleja en este estudio, y es debido a que la materia orgánica que fue utilizada para la síntesis de hidrógeno ya no está disponible para generación de metano.

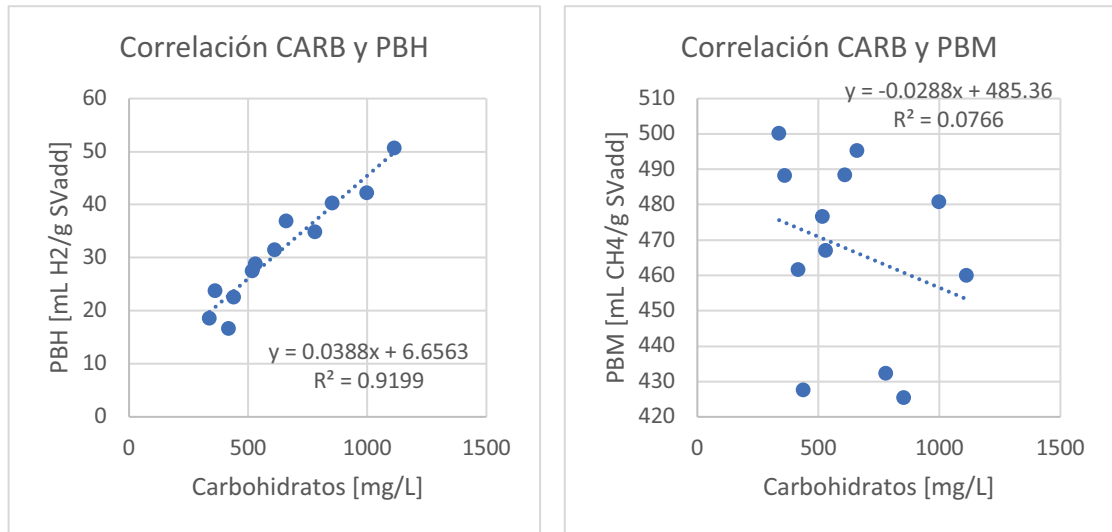
5.3.2. Correlaciones entre CARB, PROTEINA y LIPIDOS de los cosustratos con el PBH y PMB

Los gráficos que se ilustran en la Figura 17 muestran la correlación entre las diferentes mezclas FT, FC, FP y FL con el PBH y PBM, tanto para los ensayos de monodigestión como los de codigestión. Se observa que la mayor correlación con el PBH la tienen la mezcla FC, mezcla con mayor concentración de carbohidratos ($R^2=0.92$), Figura 16 parte A, y la menor correlación la tiene la mezcla FL, mezcla con mayor concentración de lípidos (Figura 16 parte C). Al igual que con las mezclas en monosustrato, a mayor correlación de un sustrato con el PBH, menor es su correlación con el PBM, debido a la causa ya descrita.

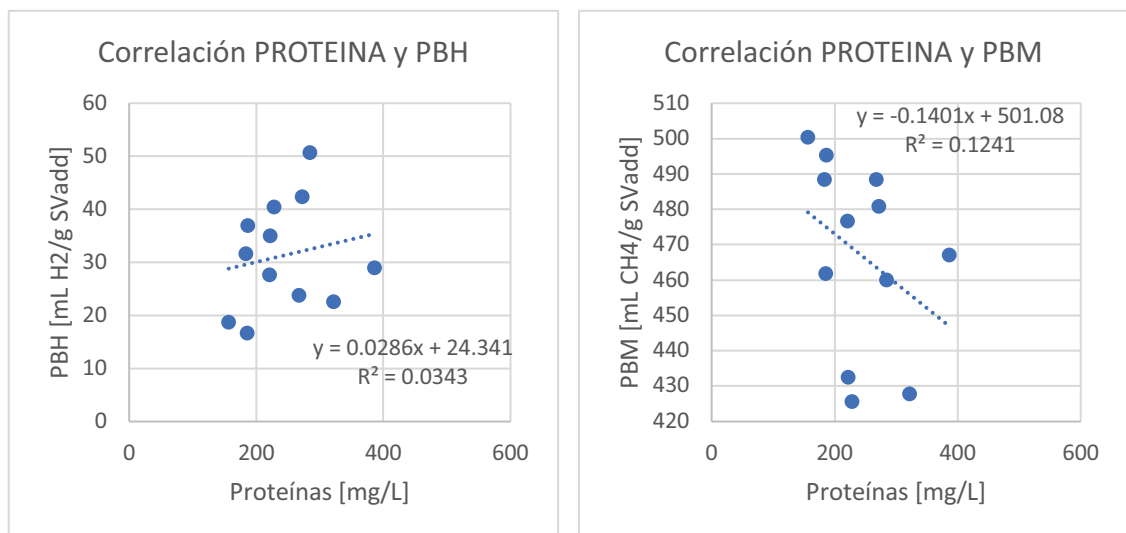
Figura 17.

Correlación entre mezclas de cosustrato FORSU:LP con el PBH y PBM

A) Correlación del contenido de carbohidratos en el cosustrato FORSU: LP con el PBH y PBM.

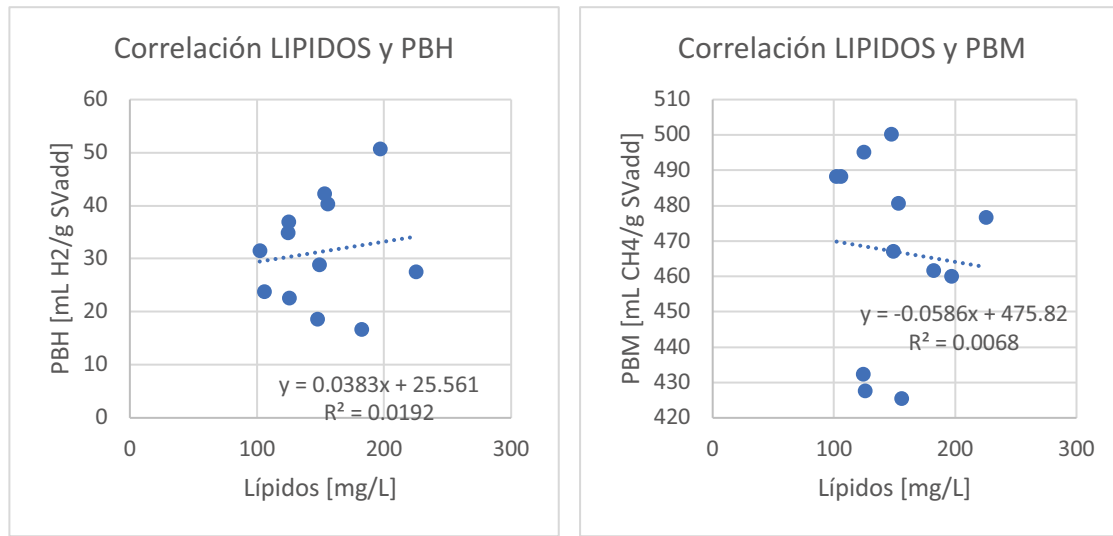


B) Correlación del contenido de proteínas en el cosustrato FORSU:LP con el PBH y PBM.



Continuación de la Figura 17.

C) Correlación del contenido de lípidos en el cosustrato FORSU:LP con la producción de hidrógeno.



Nota. Gráficos con los resultados de correlación en los ensayos de codigestión para a) CARB con PBH y CARB con PBM b) PROTEINA con PBH y PROTEINA con PBM c) LIPIDOS con PBH y LIPIDOS con PBM. Elaboración propia, realizado con Excel.

En cuanto al PBM, las proteínas son las que muestran mayor significancia estadística ($R^2=0.1241$), Figura 16 parte B. Así mismo, se observa que las proteínas y los lípidos, son los sustratos que menor correlación tienen con el PBH ($R^2=0.0343$, $R^2=0.0192$ respectivamente).

Bioquímicamente se conoce la alta relación con la producción de metano y el contenido de los carbohidratos, y la correlación matemática de este estudio, aunque muestra una baja correlación de la variable CARB y el PBM, las variables predictoras PROTEINA y LIPIDOS llevan implícito el comportamiento de CARB.

En torno a la hipótesis de esta investigación, a partir de los resultados expuestos, se puede observar que con respecto a la dependencia de la variación en la concentración de carbohidratos lípidos y proteínas, tanto con y sin proporción de lodos, siempre tuvo una mayor dependencia de los carbohidratos.

5.3.3. Resultados de PBH y PBM con la aplicación de un modelo matemático

Como se ha evidenciado en la revisión bibliográfica de este estudio, la composición de la FORSU es altamente biodegradable y variable en su composición, debido a las condiciones ya citadas. También se hace ver que es necesario conocer su composición fisicoquímica y bromatológica para la realización de estudios con fines de aprovechamiento de residuos como lo es la producción de biocombustibles gaseosos, haciendo los ensayos para determinar el potencial de hidrógeno y metano.

La preparación de estos ensayos, que requieren la caracterización de sustratos y preparación del experimento para determinar el potencial de biogás, suelen tener una duración de aproximadamente 90 días y tienen un alto consumo de recursos monetarios y de tiempo, por lo tanto, se han llevado a cabo estudios con el propósito de desarrollar modelos matemáticos para estimar resultados de forma rápida sin necesidad de llevar a cabo experimentos costosos (Coronado, 2021).

En este estudio se llevó a cabo la aplicación de un modelo matemático para predecir el potencial bioquímico de hidrógeno y de metano. Se utilizaron los resultados de las de la concentración de carbohidratos, lípidos y proteínas de las mezclas de FORSU, así como los potenciales de biohidrógeno y biometano,

obteniendo como resultado las ecuaciones 1 y 2 desarrolladas en la sección 5.3.3 y que se resumen a continuación en la Tabla 24.

Tabla 24.

Ecuaciones desarrolladas a partir de la aplicación de un modelo matemático

Variable respuesta	Ecuación
PBH	$PBH = -0.068526 + (52.716116 * PROP_LODO) + (0.026815 * CARB)$
PBM	$PBM = 712.8811 + (-26.1581 * PBH) + (0.8982 * PBH^2) + (-0.0096 * PBH^3)$

Nota. Esta tabla muestra las ecuaciones para la predicción del PBH y PBM desarrolladas en la sección 5.3.3 de este estudio. Elaboración propia, realizada con Excel.

Sobre los parámetros incluidos en la ecuación del PBH, se puede observar que el modelo, a partir del análisis de varianza, multicolinealidad, y del comportamiento del R^2 y R^2 ajustado, se utiliza únicamente la proporción de lodo (PROP_LODO) y la concentración de carbohidratos (CARB), descartándose la utilización de la concentración de proteínas y lípidos, debido a que se observa que estas variables no tienen un aporte significativo en el modelo y su inclusión sólo haría el modelo más complejo. Así mismo, se observa para la ecuación 1 que el intercepto es negativo, lo que indica que, si la proporción de lodos y la concentración de carbohidratos son cero, entonces no habría producción de hidrógeno.

Con estos mismos resultados experimentales, a través de dichas ecuaciones, se validó el funcionamiento del modelo obteniendo la comparación de los datos experimentales contra los datos proyectados por dichas ecuaciones. Así mismo, se analizó la diferencia entre el resultado experimental y el proyectado

a través del error de porcentaje medio absoluto (*MAPE: Mean Average Percentage Error*, por sus siglas en inglés) y que se muestran a continuación en la Tabla 25.

Tabla 25.

Resultados de PBH proyectados con la Ecuación 1

Sustrato	CARB	PROP_LODO	PBH Ec. 1	PBH Experimental	MAPE
	mg/L	%	mL H ₂ /g SV ad	mL H ₂ /g SV ad	%
FT	1690.00	0	45.25	41.485	9.07 %
FC	2027.00	0	54.29	48.785	11.27 %
FP	775.20	0	20.72	29.465	29.68 %
FL	819.20	0	21.90	29.945	26.87 %
FT_20	997.05	0.2	37.21	42.345	12.13 %
FC_20	1112.58	0.2	40.31	50.745	20.57 %
FP_20	529.42	0.2	24.67	28.935	14.74 %
FL_20	516.80	0.2	24.33	27.605	11.85 %
FT_30	779.70	0.3	36.65	34.975	4.80 %
FC_30	853.83	0.3	38.64	40.385	4.32 %
FP_30	438.30	0.3	27.50	22.625	21.54 %
FL_30	417.33	0.3	26.94	16.685	61.45 %
FT_40	610.24	0.4	37.38	31.575	18.39 %
FC_40	658.51	0.4	38.68	36.985	4.57 %
FP_40	361.67	0.4	30.72	23.835	28.87 %
FL_40	337.92	0.4	30.08	18.675	61.07 %
LP	69.40	1	54.51	64.715	15.77 %
PROMEDIO					21.00 %

Nota. Esta tabla compara el PBH experimental con el PBH a partir del modelo seleccionado para calcular el error promedio porcentual ponderado. *MAPE: Mean Average Percentage Error.* Elaboración propia, realizado con Excel.

De los resultados de validación se puede observar que es posible proyectar el PBH a partir de la ecuación 1 con un error de porcentaje medio absoluto (MAPE, por sus siglas en inglés) del 21 %. La anterior variación puede deberse a la bioquímica de la fermentación, en la que diversas reacciones pueden producir diferentes productos como el H_2 , acetato, butirato, lactato, acetona, etanol, butanol, entre otros, lo que sugiere que la producción de hidrógeno puede suceder solo bajo ciertas condiciones metabólicas y siendo altamente susceptible a variaciones de pH, y por lo tanto tiene alta sensibilidad, dando como resultado mayores variaciones en su producción.

El hecho anterior, también es reflejado en los resultados del estudio de Alibardi y Cossu (2016), quienes obtuvieron un error de porcentaje medio absoluto entre 10 % a 17 % cuando estimaron el PBH de la FORSU a partir de un modelo predictivo, sin embargo, lo atribuyen a la suma de errores experimentales acumulados a lo largo de la preparación del ensayo más que al hecho de que mejorara o empeorara el proceso de fermentación debido a la composición de los sustratos ensayados.

De igual manera, los mismos autores, en otro estudio previo, reportaron para muestras de la FORSU tomadas de febrero a noviembre, una diferencia entre la máxima producción de hidrógeno y la mínima del 200 %, y lo atribuyen a la variabilidad en la composición de los sustratos a lo largo del tiempo (Alibardi y Cossu, 2015).

Así mismo, Costello, Greenfield & Lee (1991) desarrollaron un modelo para la predicción de subproductos de la hidrólisis y acidogénesis; como lo son, concentración de glucosa, ácido butírico, ácido acético, obteniendo diferencias entre los datos experimentales y los resultados del modelo de entre 10 % al 90 %.

Sobre los parámetros incluidos en la ecuación 2 para la predicción del PBM, debido a que el proceso anaeróbico se realizó en dos etapas, el PBM mostró tener una dependencia directa del PBH, por lo tanto, para el desarrollo del modelo para la predicción del PBM, se utilizó regresión polinomial utilizando únicamente el PBH como variable independiente. Para definir el grado del polinomio, se hizo según el comportamiento del R^2 y R^2 ajustado, siendo el modelo más sencillo y preciso, una regresión polinomial de grado tres. Se descartó la utilización de las variables sobre la proporción de lodos y concentración de carbohidratos, lípidos y proteínas para el modelo del PBM debido a que estas ya fueron tomadas en cuenta y están implícitas en el resultado del PBH.

Así mismo, se observa para la ecuación 2 que el intercepto es positivo. Es importante hacer ver que, la aplicación de la ecuación 2 depende de la aplicación de la ecuación 1, donde al mismo tiempo, ambas dependen de que en efecto se haya desarrollado un proceso de digestión anaerobia en dos etapas; lo que es parte fundamental del alcance para la aplicación de este modelo. Dentro de este contexto, el intercepto positivo de la ecuación 2, estaría indicando que, al no producirse hidrógeno en la primera etapa de la digestión anaerobia, aún así, habría disponibilidad de carbohidratos para la generación de metano en la segunda etapa.

Luego se procedió a hacer la validación del PBM. De los resultados de validación, se puede observar que es posible proyectar el PBM a través de la ecuación 2 con un error de porcentaje medio absoluto del 5.13 % (ver tabla 26). Desde el punto de vista bioquímico, en un proceso anaerobio de dos etapas, el proceso tiene mayor estabilidad en la segunda etapa de metanogénesis, y por lo tanto se le puede atribuir que el error de porcentaje medio absoluto del PBM obtenido a través de la ecuación 2 sea menor comparado al error de porcentaje

medio absoluto del PBH. Así mismo, en el estudio de Alibardi y Cossu (2015), atribuyen la baja variabilidad en la determinación del PBM a la separación de la etapa de fermentación.

Tabla 26.

Resultados de PBM proyectados con la Ecuación 2

Sustrato	PBH	PBM Experimental	PBM	MAPE
	Experimental		Ecuación 2	
	mL H ₂ /g SV ad	mL CH ₄ /g SV ad	mL CH ₄ /g SV ad	%
FT	41.49	494.19	485.97	1.66 %
FC	48.79	480.93	456.29	5.12 %
FP	29.47	513.67	475.61	7.41 %
FL	29.95	512.92	476.43	7.11 %
FT_20	42.35	480.83	484.57	0.78 %
FC_20	50.75	460.07	439.97	4.37 %
FP_20	28.94	467.11	474.73	1.63 %
FL_20	27.61	476.73	472.69	0.85 %
FT_30	34.98	432.48	484.73	12.08 %
FC_30	40.39	425.59	487.11	14.45 %
FP_30	22.63	427.75	469.32	9.72 %
FL_30	16.69	461.79	481.76	4.33 %
FT_40	31.58	488.42	479.29	1.87 %
FC_40	36.99	495.29	486.87	1.70 %
FP_40	23.84	488.40	469.30	3.91 %
FL_40	18.68	500.31	474.92	5.07 %
PROMEDIO				5.13 %

Nota. Esta tabla compara el PBM experimental con el PBM a partir del modelo seleccionado para calcular el error promedio porcentual ponderado. MAPE: *Mean Average Percentage Error*. Elaboración propia, realizado con Excel.

Un ensayo adicional se llevó a cabo en este estudio, y que consistió en realizar, para las mezclas de la FORSU en monosustrato, un ensayo de digestión anaerobia en 1 etapa. La diferencia entre el máximo y el mínimo PBM, con el mismo sustrato ensayado en dos etapas, estuvo entre el 426 % y 580 %, reflejando que la separación en dos etapas favorece significativamente la producción de biogás, sin embargo, este mismo hecho, no refleja efecto significativo en el porcentaje de metano contenido en el biogás.

Las gráficas correspondientes a la cinética de reacción biológica para el ensayo en una etapa se muestran en el Apéndice 2. En dichos gráficos, los datos experimentales se ajustan al modelo de Gompertz. La desviación estándar refleja la diferencia entre los triplicados en cada ensayo.

Para la construcción de los gráficos del apéndice 2 se utilizó el reporte generado por el equipo AMPTS, con los registros del volumen y producción de biogás diario a lo largo de todo el tiempo que duró la cinética de reacción biológica.

Dentro de los alcances y limitaciones para la aplicación del modelo constituido por las ecuaciones 1 y 2, cabe resaltar los siguientes aspectos: ambas ecuaciones deben ser aplicadas dentro del marco de digestión anaerobia en dos etapas, la ecuación 2 debe ser aplicada a partir del resultado de la ecuación 1, y el modelo se entrenó a partir de las concentraciones de carbohidratos, lípidos y proteínas de la FORSU con y sin proporción de lodo primario.

Finalmente, con los resultados obtenidos en este estudio, se puede afirmar la comprobación de la hipótesis, ya que se demostró con la aplicación del modelo matemático, que la producción de hidrógeno y metano está en función del efecto de la concentración de carbohidratos, lípidos y proteínas, así como de la

proporción de lodos primarios en codigestión, logrando una predicción de los potenciales de biohidrógeno y biometano con un error aceptable desde el punto de vista bioquímico y en coherencia con el análisis estadístico.

6. ALCANCES Y LIMITACIONES

Los experimentos de digestión anaerobia realizados en este estudio se llevaron a cabo en reactores operados en lote. Lo anterior presenta limitantes en cuanto a la evaluación del comportamiento de algunos parámetros operativos que son indispensables para la operación de un reactor en continuo; siendo esta última, una de las modalidades de reactor anaerobio más aplicado a escala industrial. Por lo anterior, en vistas de realizar investigaciones futuras basados en los resultados de este estudio, se debe llevar a cabo un experimento con reactores en continuo según la recomendación ya dada.

Así mismo, se debe tomar en cuenta que los PBH y PBM obtenidos en este estudio fueron obtenidos a partir de mezclas sintéticas de la FORSU, cuyo proceso de preparación incluyó trituración, donde este último es comúnmente un proceso de pretratamiento que mejora la solubilidad del sustrato y por lo tanto un mejor resultado de PBH y PBM. El aporte de las técnicas de pretratamiento debe ser evaluada en función de los costos que implica su implementación, tanto de inversión como operativos, contra lo que aporta su aplicación a la generación total de energía del sistema.

Finalmente, en este estudio, con el propósito de orientar investigaciones futuras, se inició un ensayo de digestión anaerobia en 3 etapas, donde se ensayó las primeras dos etapas del proceso anaerobio, hidrólisis y fermentación. La etapa de metanogénesis no se ensayó por limitación de tiempo. Los resultados preliminares mostraron que la hidrólisis previa a la fermentación aumentó la fracción soluble de la materia orgánica de un 30 % a un 50 %. Este efecto, en la etapa de fermentación se reflejó en un menor PBH, que podría ser atribuido a la

transformación temprana de materia orgánica a CO₂, sin embargo, se esperaría que, con la mejora de la solubilidad, se aumente la velocidad de absorción del sustrato a través de la pared celular de los microorganismos dentro de la etapa de metanogénesis, permitiendo así, mejorar la productividad energética conjunta del sistema. Sin embargo, más estudios son necesarios sobre este tema.

CONCLUSIONES

1. Se llevó a cabo varios ensayos de digestión anaerobia en una y dos etapas a partir de la FORSU con y sin proporción de lodos primarios. Los resultados sobre el potencial de hidrógeno y metano en dichos ensayos fueron explicados y correlacionados desde el efecto que tuvo la variación de la concentración de carbohidratos, lípidos y proteínas sobre los potenciales de biohidrógeno (PBH) y biometano (PBM). Así mismo, se logró la aplicación de un modelo matemático para predecir el potencial de hidrógeno y metano con un error aceptable desde el punto de vista estadístico y bioquímico.
2. Se determinó experimentalmente el PBH y PBM de la FORSU en monodigestión, lo que permitió observar el efecto de la variación de la concentración de los carbohidratos, lípidos y proteínas en dichos potenciales. El mayor PBH fue para la FORSU con mayor concentración de carbohidratos con 48.8 mL H₂/g SV_{ad}, y el menor para la mezcla de la FORSU con mayor concentración de proteínas con 29.4 mL H₂/g SV_{ad}. En cuanto al PBM, el mayor potencial fue para la mezcla de la FORSU con mayor concentración de proteínas con 513.7 mL H₂/g SV_{ad}, y el menor fue para la mezcla de la FORSU con mayor concentración de carbohidratos con 480.9 con mL H₂/g SV_{ad}.
3. Así mismo, se determinó experimentalmente el PBH y el PBM de la FORSU en codigestión con diferentes proporciones de lodo primario, lo que permitió observar el efecto de la variación de la concentración de carbohidratos, lípidos, proteínas y proporción de lodos sobre dichos

potenciales. El mayor PBH fue para la codigestión de la mezcla de la FORSU con mayor concentración de carbohidratos con 20 % de lodo primario dando como resultado 50.8 mL H₂/g SV_{ad}, y el menor para la codigestión de la mezcla de la FORSU con mayor concentración de lípidos con 30 % de lodo dando un resultado de 16.7 mL H₂/g SV_{ad}. En cuanto al PBM, el mayor potencial fue para la codigestión de la mezcla de la FORSU con mayor concentración de lípidos con 40 % de lodo primario dando un resultado de 500.3 mL H₂/g SV_{ad}, y el menor fue para la codigestión de la mezcla de la FORSU con mayor concentración de carbohidratos con 30 % de lodo primario dando un resultado de 425.6 mL H₂/g SV_{ad}.

4. En cuanto a la correlación de la concentración de carbohidratos, lípidos y proteínas con los PBH y PBM, se observó que, para el PBH, la mayor correlación la tiene la variable CARB ($R^2=0.99$) que corresponde a la mezcla de la FORSU con mayor concentración de carbohidratos. En contraste, para el PBM, la variable CARB muestra la mayor correlación ($R^2=0.98$) de manera inversa al PBH.
5. Los modelos aplicados a partir de los datos experimentales obtenidos en este estudio permiten la predicción del PBH con un error de porcentaje medio absoluto del 21 % y del PBM con un 5.13 %. Ambos errores son razonables considerando la bioquímica de los procesos de digestión anaerobia para el hidrógeno y metano ya expuesta, así como del análisis matemático llevado a cabo. Por tanto, para estudios de prefactibilidad, es posible la utilización de los modelos matemáticos aplicados en este estudio para la predicción del PBH y PBM, dentro de un proceso de digestión anaerobia en dos etapas a partir de la FORSU con una proporción de lodos primarios.

RECOMENDACIONES

1. Tomar la mezcla de la FORSU y proporción de lodos primarios que produjeron más hidrógeno y metano para llevar a cabo un experimento con reactores en continuo y determinar los parámetros operativos como la carga orgánica volumétrica (COV), entre otros, que sean de interés del investigador, y que permitan evaluar la mejor ruta que resulte en la mayor valorización energética conjunta del proceso anaerobio en dos etapas.
2. Evaluar el aporte de la trituración como pretratamiento de la FORSU, en función de los costos que implica su implementación, tanto de inversión como operativos, contra lo que aporta su aplicación a la generación total de energía del sistema.
3. Evaluar los efectos de las distintas variables operativas, así como la variación de la composición de los sustratos y cosustratos, entre otros, son de interés científico en el marco de la digestión anaerobia en 3 etapas.

REFERENCIAS

- Algapani, D. E., Qiao, W., Ricci, M., Bianchi, D., M. Wandera, S., Adani, F., & Dong, R. (2019). Bio-hydrogen and bio-methane production from food waste in a two-stage anaerobic digestion process with digestate recirculation [Producción de biohidrógeno y biometano a partir de residuos de alimentos en un proceso de digestión anaeróbica de dos etapas con recirculación de digestato]. *Renewable Energy*, 130, 1108–1115. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.079>
- Alibardi, L., y Cossu, R. (2015). Composition variability of the organic fraction of municipal solid waste and effects on hydrogen and methane production potentials [Variabilidad de la composición de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y efectos sobre los potenciales de producción de hidrógeno y metano]. *Waste Management*, 36, 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.019>
- Alibardi, L., & Cossu, R. (2016). Effects of carbohydrate, protein and lipid content of organic waste on hydrogen production and fermentation products [Effects of carbohydrate, protein and lipid content of organic waste on hydrogen production and fermentation products]. *Waste Management*, 47, 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.049>
- Angelidaki, I., Ellegaard, L., & Ahring, B. K. (1993). A mathematical model for dynamic simulation of anaerobic digestion of complex substrates: Focusing on ammonia inhibition [Un modelo matemático para la simulación dinámica de la digestión anaeróbica de sustratos complejos:

centrándose en la inhibición por amoníaco]. *Biotechnology and Bioengineering*, 42(2), 159–166. <https://doi.org/10.1002/bit.260420203>

Angelidaki, Irini, Ellegaard, L., & Ahring, B. K. (1997). Modelling anaerobic codigestion of manure with olive oil mill effluent [Modelización de la codigestión anaeróbica de estiércol con efluente de almazara]. *Water Science and Technology*, 36(6–7), 263–270. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00531-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00531-3)

Angelidaki, Irini, Ellegaard, L., & Ahring, B. K. (1999). A comprehensive model of anaerobic bioconversion of complex substrates to biogas [Un modelo integral de bioconversión anaeróbica de sustratos complejos en biogás.]. *Biotechnology and Bioengineering*, 63(3), 363–372. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(19990505\)63:3<363::AID-BIT13>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(19990505)63:3<363::AID-BIT13>3.0.CO;2-Z)

Ara, E., Sartaj, M., & Kennedy, K. (2015). Enhanced biogas production by anaerobic co-digestion from a trinary mix substrate over a binary mix substrate [Enhanced biogas production by anaerobic co-digestion from a trinary mix substrate over a binary mix substrate]. *Waste Management and Research*, 33(6), 578–587. <https://doi.org/10.1177/0734242X15584844>

Ariunbaatar, J., Scotto Di Pert, E., Panico, A., Frunzo, L., Esposito, G., Lens, P. N. L., & Pirozzi, F. (2015). Effect of ammoniacal nitrogen on one-stage and two-stage anaerobic digestion of food waste [Efecto del nitrógeno amoniacal en la digestión anaeróbica de residuos de alimentos en una y dos etapas]. *Waste Management*, 38(1), 388–398. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.12.001>

- Baena-Moreno, F. M., le Saché, E., Pastor-Pérez, L., & Reina, T. R. (2020). Membrane-based technologies for biogas upgrading: a review [Tecnologías basadas en membranas para la mejora del biogás: una revisión]. *Environmental Chemistry Letters*, 18(5), 1649–1658. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01036-3>
- Baldi, F., Pecorini, I., & Iannelli, R. (2019). Comparison of single-stage and two-stage anaerobic co-digestion of food waste and activated sludge for hydrogen and methane production [Comparación de la codigestión anaeróbica de una y dos etapas de desechos de alimentos y lodos activados para la producción de hidrógeno y metano]. *Renewable Energy*, 143, 1755–1765. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.122>
- Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T., Siegrist, H., & Vavilin, V. A. (2002). The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1) [El modelo de digestión anaeróbica nº 1 de IWA (ADM1)]. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 45(10), 65–73. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0292>
- Berrocal, M. J. (2017). *Producción de Hidrógeno y Metano mediante Codigestión de Residuos Alimenticios y Lodos de Purga*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Archivo digital. <http://132.248.9.195/ptd2017/noviembre/0768168/Index.html>
- Borowski, S., Boniecki, P., Kubacki, P., & Czyżowska, A. (2018). Food waste co-digestion with slaughterhouse waste and sewage sludge: Digestate conditioning and supernatant quality [Codigestión de residuos de alimentos con residuos de matadero y lodos de depuradora:

acondicionamiento del digestato y calidad del sobrenadante]. *Waste Management*, 74, 158–167.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.12.010>

Bouallagui, H., Lahdheb, H., Ben Romdan, E., Rachdi, B., & Hamdi, M. (2009). Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition [Mejora del rendimiento y la estabilidad de la digestión anaeróbica de residuos de frutas y verduras con la adición de cosustratos]. *Journal of Environmental Management*, 90(5), 1844–1849.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.12.002>

Buitrón, G., & Carvajal, C. (2010). Biohydrogen production from Tequila vinasses in an anaerobic sequencing batch reactor: Effect of initial substrate concentration, temperature and hydraulic retention time [Producción de biohidrógeno a partir de vinazas de Tequila en un reactor discontinuo de secuenciación anaeróbica: efecto de la concentración inicial del sustrato, la temperatura y el tiempo de retención hidráulica]. *Bioresource Technology*, 101(23), 9071–9077.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.127>

Campuzano, R., y González-Martínez, S. (2016). Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production: A review [Características de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y la producción de metano: una revisión]. *Waste Management*, 54, 3–12.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.016>

Cardaña, R., Moreno, G., Bakonyi, P., & Buitrón, G. (2017). Enhancement of methane production from various microalgae cultures via novel ozonation

pretreatment [Mejora de la producción de metano a partir de diversos cultivos de microalgas mediante un novedoso pretratamiento de ozonización]. *Chemical Engineering Journal*, 307, 948–954. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.09.016>

Carrillo-Reyes, J., Buitrón, G., Moreno-Andrade, I., Tapia-Rodríguez, A. C., Palomo-Briones, R., Razo-Flores, E., Aguilar-Juárez, O., Arreola-Vargas, J., Bernet, N., Braga, A. F. M., Braga, L., Castelló, E., Chatellard, L., Etchebehere, C., Fuentes, L., León-Becerril, E., Méndez-Acosta, H. O., Ruiz-Filippi, G., Tapia-Venegas, E. & Zaiat, M. (2020). Standardized protocol for determination of biohydrogen potential [Protocolo estandarizado para la determinación del potencial de biohidrógeno]. *MethodsX*, 7, 1-12. <https://methods-x.com/action/showPdf?pii=S2215-0161%2819%2930330-9>

Chatterjee, B., y Mazumder, D. (2019). Role of stage-separation in the ubiquitous development of Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste: A critical review [Papel de la separación de etapas en el desarrollo ubicuo de la digestión anaeróbica de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos: una revisión crítica]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 439–469. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.026>

Chen, W., Li, T., Ren, Y., Wang, J., Chen, H., & Wang, Q. (2023). Biological hydrogen with industrial potential: Improvement and prospection in biohydrogen production [Hidrógeno biológico con potencial industrial: Mejora y prospección en la producción de biohidrógeno.]. *Journal of Cleaner Production*, 387, 135777. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135777>

Coronado, K. G. (2021). *Tratamiento de Aguas Residuales mediante Sistemas Microalga Bacteria* [Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México]. Archivo digital.
<http://132.248.9.195/ptd2021/agosto/0814216/Index.html>

Costello, D. J., Greenfield, P. F., & Lee, P. L. (1991). Dynamic modelling of a single-stage high-rate anaerobic reactor-I. Model derivation [Modelado dinámico de un reactor anaeróbico de alta velocidad de una sola etapa-I. Derivación del modelo]. *Water Research*, 25(7), 847–858.
[https://doi.org/10.1016/0043-1354\(91\)90166-N](https://doi.org/10.1016/0043-1354(91)90166-N)

Dehkordi, S. M. M. N., Jahromi, A. R. T., Ferdowsi, A., Shumal, M., & Dehnavi, A. (2020). Investigation of biogas production potential from mechanical separated municipal solid waste as an approach for developing countries (case study: Isfahan-Iran) [Investigación del potencial de producción de biogás a partir de residuos sólidos urbanos separados mecánicamente como enfoque para los países en desarrollo (estudio de caso: Isfahán-Irán)]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109586.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109586>

Demirekler, E., y Anderson, G. K. (1998). Effect of sewage sludge addition on the start-up of the anaerobic digestion of ofmsw [Efecto de la adición de lodos de depuradora en el inicio de la digestión anaerobia de las aguas residuales]. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 19(8), 837–843. <https://doi.org/10.1080/09593331908616740>

Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances [Método colorimétrico para la determinación de azúcares y sustancias

afines]. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350–356.
<https://doi.org/10.1021/ac60111a017>

Elalami, D., Carrere, H., Monlau, F., Abdelouahdi, K., Oukarroum, A., & Barakat, A. (2019). Pretreatment and co-digestion of wastewater sludge for biogas production: Recent research advances and trends [Pretratamiento y codigestión de lodos de aguas residuales para la producción de biogás: avances y tendencias recientes en la investigación]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109287.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109287>

Elsamadony, M., & Tawfik, A. (2015). Dry anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal waste with paperboard mill sludge and gelatin solid waste for enhancement of hydrogen production [Codigestión anaeróbica de la fracción orgánica de los residuos municipales con lodos de fábricas de cartón y residuos sólidos de gelatina para mejorar la producción de hidrógeno]. *Bioresource Technology*, 191, 157–165.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.017>

Escamilla-Alvarado, C. (2011). *Integración de un proceso modelo de biorrefinería para la obtención de hidrógeno, metano, enzimas y sacarificados a partir de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos*. [Tesis de doctorado, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional de México]. Archivo digital.
<https://repositorio.cinvestav.mx/handle/cinvestav/1344?show=full>

Forster-Carneiro, T., Pérez, M., & Romero, L. I. (2008). Thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic fraction of municipal solid waste [Digestión anaeróbica termófila de fracción orgánica de residuos sólidos

urbanos clasificada en origen]. *Bioresource Technology*, 99(15), 6763–6770. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.01.052>

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 [Digestión anaeróbica mesófila y termófila de lodos primarios y secundarios. Efecto del pretratamiento a temperatura elevada.]. *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)

Guo, Y., Guo, L., Jin, C., Zhao, Y., Gao, M., & Ji, J. (2022). Comparison of primary and secondary sludge carbon sources derived from hydrolysis or acidogenesis for nitrate reduction and denitrification kinetics : Organics utilization and microbial community shift [Comparación de fuentes de carbono de lodos primarias y secundarias derivadas de hidrólisis o acidogénesis para la cinética de reducción de nitratos y desnitrificación: utilización de compuestos orgánicos y cambio de comunidad microbiana]. *Environmental Research*, 212, 17363-17380. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113403>

Hans, M., & Kumar, S. (2018). Biohythane production in two-stage anaerobic digestion system [Producción de biohitano en un sistema de digestión anaeróbica de dos etapas]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(32), 17363–17380. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.022>

Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., Bougrier, C., Buffière, P., Carballa, M., De Wilde, V., Ebertseder, F., Fernández, B., Ficara, E., Fotidis, I., Frigon, J. C., De Laclos, H. F., Ghasimi, D. S. M.,

- Hack, G., Hartel, M., & Wierinck, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests [Hacia una estandarización de las pruebas de potencial de biometano]. *Water Science and Technology*, 74(11), 2515–2522. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>
- Ja, M., Tutkimuskeskus, E., Heaven, S., Zhang, Y., Arnold, R., Paavola, T., Vaz, F., & Cavinato, C. (2010). *D2.1: Compositional analysis of food waste from study sites in geographically distinct regions of Europe* [D2.1: Análisis compositivo de residuos de alimentos de sitios de estudio en regiones geográficamente distintas de Europa]. 7 Cooperation.
- Kiely, G., Tayfur, G., Dolan, C., & Tanji, K. (1997). Physical and mathematical modelling of anaerobic digestion of organic wastes [Modelización física y matemática de la digestión anaeróbica de residuos orgánicos]. *Water Research*, 31(3), 534–540. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(96\)00175-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00175-3)
- Kleinstreuer, C., y Poweigha, T. (1982). Dynamic simulator for anaerobic digestion processes [Simulador dinámico de procesos de digestión anaeróbica]. *Biotechnology and Bioengineering*, 24(9), 1941–1951. <https://doi.org/10.1002/bit.260240903>
- Lavagnolo, M. C., Giroto, F., Rafieenia, R., Danieli, L., & Alibardi, L. (2018). Two-stage anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste – Effects of process conditions during batch tests [Digestión anaeróbica en dos etapas de la fracción orgánica de residuos sólidos municipales – Efectos de las condiciones del proceso durante las pruebas por lotes]. *Renewable Energy*, 126, 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.039>

- Lee, W., Mo, K., Park, C., Kim, D., Park, S., Lee, D., Kwon, J., Kim, M., & Cui, F. (2022). Co-digestion of food waste and sewage sludge using the combination of a thermal alkali pre-treatment and a two-stage anaerobic digestion system [Codigestión de residuos de alimentos y lodos de depuradora mediante la combinación de un pretratamiento térmico alcalino y un sistema de digestión anaeróbica de dos etapas]. *Chemical Technology and Biotechnology*, 98(3), 591-601. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jctb.7133>
- Li, C., Champagne, P., & Anderson, B. (2011). Evaluating and modeling biogas production from municipal fat, oil, and grease and synthetic kitchen waste in anaerobic co-digestions [Evaluating and modeling biogas production from municipal fat, oil, and grease and synthetic kitchen waste in anaerobic co-digestions]. *Bioresource Technology*, 102(20), 9471–9480. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.103>
- Li, Y., Zhang, R., Liu, G., Chen, C., He, Y., & Liu, X. (2013). Comparison of methane production potential, biodegradability, and kinetics of different organic substrates [Comparación del potencial de producción de metano, biodegradabilidad y cinética de diferentes sustratos orgánicos]. *Bioresource Technology*, 149, 565–569. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.063>
- Liu, Y., Lin, R., Man, Y., & Ren, J. (2019). Recent developments of hydrogen production from sewage sludge by biological and thermochemical process [Desarrollos recientes en la producción de hidrógeno a partir de lodos de depuradora mediante procesos biológicos y termoquímicos]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(36), 19676–19697. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.044>

- Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Farr, A. L., & Randall, R. J. (1951). Protein measurement with the Folin phenol reagent [Medición de proteínas con el reactivo Folin fenol]. *The Journal of Biological Chemistry*, 193(1), 265–275. [https://doi.org/10.1016/s0021-9258\(19\)52451-6](https://doi.org/10.1016/s0021-9258(19)52451-6)
- Mahdy, A., Mendez, L., Ballesteros, M., & González-Fernández, C. (2015). Algalculture integration in conventional wastewater treatment plants: Anaerobic digestion comparison of primary and secondary sludge with microalgae biomass [Integración del cultivo de algas en plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales: comparación de la digestión anaeróbica de lodos primarios y secundarios con biomasa de microalgas]. *Bioresource Technology*, 184, 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.145>
- Malinauskaite, J., Jouhara, H., Czajczyńska, D., Stanchev, P., Katsou, E., Rostkowski, P., Thorne, R. J., Colón, J., Ponsá, S., Al-Mansour, F., Anguilano, L., Krzyżyńska, R., López, I. C., A.Vlasopoulos, & Spencer, N. (2017). Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe [Gestión de residuos sólidos municipales y valorización de residuos en energía en el contexto de una economía circular y el reciclaje energético en Europa]. *Energy*, 141, 2013–2044. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.128>
- Michalopoulos, I., Lytras, G. M., Mathioudakis, D., Lytras, C., Goumenos, A., Zacharopoulos, I., Papadopoulou, K., & Lyberatos, G. (2020). Hydrogen and Methane Production from Food Residue Biomass Product (FORBI) [Producción de hidrógeno y metano a partir de productos de biomasa de residuos alimentarios (FORBI)]. *Waste and Biomass Valorization*, 11(5), 1647–1655. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00550-4>

- Micolucci, F., Gottardo, M., Pavan, P., Cavinato, C., & Bolzonella, D. (2018). Pilot scale comparison of single and double-stage thermophilic anaerobic digestion of food waste [Comparación a escala piloto de digestión anaeróbica termófila de residuos de alimentos en una y dos etapas]. *Journal of Cleaner Production*, 171, 1376–1385. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.080>
- Mishra, S. K., Suh, W. I., Farooq, W., Moon, M., Shrivastav, A., Park, M. S., & Yang, J. W. (2014). Rapid quantification of microalgal lipids in aqueous medium by a simple colorimetric method [Cuantificación rápida de lípidos de microalgas en medio acuoso mediante un método colorimétrico sencillo]. *Bioresource Technology*, 155, 330–333. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.077>
- Muradov, N. Z., y Veziroğlu, T. N. (2008). Green path from fossil-based to hydrogen economy: An overview of carbon-neutral technologies [El camino verde desde la economía basada en fósiles a la del hidrógeno: una visión general de las tecnologías neutras en carbono]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(23), 6804–6839. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.08.054>
- Nelson, D. L., y Cox, M. M. (2013). *Lehninger Principles of Biochemistry* [Principios de bioquímica de Lehninger]. Addison-Wesley.
- Njuguna, A., Mbohwa, C., Ntuli, F., Belaid, M., Seodigeng, T., Catherine Ngila, J., & Kinuthia, C. (2018). Waste to energy bio-digester selection and design model for the organic fraction of municipal solid waste [Modelo de selección y diseño de biodigestores para la conversión de residuos en energía para la fracción orgánica de residuos sólidos municipales].

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 1113–1121.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.051>

Noyola, A., Morgan-Sagastume, J. M., & Güereca, L. P. (2013). *Selección de Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Guía de apoyo para Ciudades Pequeñas y Medianas*. Universidad Nacional Autónoma de México.
<http://proyectos2.iingen.unam.mx/LACClimateChange/docs/Guia.pdf>

Ogunjuyigbe, A. S. O., Ayodele, T. R., & Alao, M. A. (2017). Electricity generation from municipal solid waste in some selected cities of Nigeria: An assessment of feasibility, potential and technologies [Generación de electricidad a partir de residuos sólidos municipales en algunas ciudades seleccionadas de Nigeria: una evaluación de viabilidad, potencial y tecnologías]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 149–162.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.177>

Ornelas-Ferreira, B., Lobato, L. C. S., Colturato, L. F. D., Torres, E. O., Pombo, L. M., Pujatti, F. J. P., Araújo, J. C., & Chernicharo, C. A. L. (2020). Strategies for energy recovery and gains associated with the implementation of a solid state batch methanization system for treating organic waste from the city of Rio de Janeiro - Brazil [Estrategias de recuperación energética y ganancias asociadas a la implementación de un sistema de metanización discontinua de estado sólido para el tratamiento de residuos orgánicos de la ciudad de Río de Janeiro - Brasil]. *Renewable Energy*, 146, 1976–1983.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.049>

Reutelshofer, T., & Guzmán, L. F. (2015). *Guía para la toma de muestras de agua residual*. In PERIAGUA.

Righetti, E., Nortilli, S., Fatone, F., Frison, N., & Bolzonella, D. (2020). A Multiproduct Biorefinery Approach for the Production of Hydrogen, Methane and Volatile Fatty Acids from Agricultural Waste [Un enfoque de biorrefinería multiproducto para la producción de hidrógeno, metano y ácidos grasos volátiles a partir de residuos agrícolas]. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 5239–5246. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01023-3>

Santiago, S. G., Morgan-Sagastume, J. M., Monroy, O., & Moreno-Andrade, I. (2020). Biohydrogen production from organic solid waste in a sequencing batch reactor: An optimization of the hydraulic and solids retention time [Producción de biohidrógeno a partir de residuos sólidos orgánicos en un reactor discontinuo secuencial: una optimización del tiempo de retención hidráulica y de sólidos]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(47), 25681–25688. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.224>

Schievano, A., Tenca, A., Lonati, S., Manzini, E., & Adani, F. (2014). Can two-stage instead of one-stage anaerobic digestion really increase energy recovery from biomass? [¿Puede la digestión anaeróbica en dos etapas en lugar de una sola etapa aumentar realmente la recuperación de energía de la biomasa?]. *Applied Energy*, 124, 335–342. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.024>

Seadi, T. Al, Lukehurst, C., Saedi, T. Al, Lukehurst, C., Seadi, T. Al, & Lukehurst, C. (2012). *Quality management of digestate from biogas plants used as fertiliser* [Gestión de la calidad del digestato procedente de plantas de

biogás utilizado como fertilizante]. IEA Bioenergy. http://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/publi-task37/digestate_quality_web_new.pdf

Sharma, P., y Melkania, U. (2017). Biochar-enhanced hydrogen production from organic fraction of municipal solid waste using co-culture of *Enterobacter aerogenes* and *E. coli*. [Producción de hidrógeno mejorada con biocarbón a partir de fracción orgánica de residuos sólidos urbanos mediante cocultivo de *Enterobacter aerogenes* y *E. coli*]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(30), 18865–18874. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.171>

Siegrist, H., Renggli, D., & Gujer, W. (1993). Mathematical modelling of anaerobic mesophilic sewage sludge treatment [Modelización matemática del tratamiento de lodos de depuradora mesófilos anaeróbicos.]. *Water Science and Technology*, 27(2), 25–36. <https://doi.org/10.2166/wst.1993.0070>

Sierra, R., Smith, A., Granda, C., & MT, H. (2008). Producing fuels and chemicals from lignocellulosic biomass [Producción de combustibles y productos químicos a partir de biomasa lignocelulósica]. *Chemical Engineering Progress*, 104(8), S10–S18. <https://www.cheric.org/research/tech/periodicals/view.php?seq=988141>

Silva, F. M. S., Mahler, C. F., Oliveira, L. B., & Bassin, J. P. (2018). Hydrogen and methane production in a two-stage anaerobic digestion system by co-digestion of food waste, sewage sludge and glycerol [Producción de hidrógeno y metano en un sistema de digestión anaeróbica de dos etapas mediante codigestión de residuos de alimentos, lodos de depuradora y

glicerol]. *Waste Management*, 76, 339–349.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.039>

Tarazona, Y., Vargas, A., Quijano, G., & Moreno-Andrade, I. (2022). Influence of the initial proportion of carbohydrates, proteins, and lipids on biohydrogen production by dark fermentation: A multi-response optimization approach [Influencia de la proporción inicial de carbohidratos, proteínas y lípidos en la producción de biohidrógeno por fermentación oscura: un enfoque de optimización de respuestas múltiples]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(70), 30128–30139.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.193>

Thiele, J. H., & Zeikus, J. G. (1988). Control of Interspecies Electron Flow during Anaerobic Digestion: Significance of Formate Transfer versus Hydrogen Transfer during Syntrophic Methanogenesis in Flocs [Control del flujo de electrones entre especies durante la digestión anaeróbica: importancia de la transferencia de formiato versus la transferencia de hidrógeno durante la metanogénesis sintrófica en flóculos]. *Applied and Environmental Microbiology*, 54(1), 20–29.
<https://doi.org/10.1128/aem.54.1.20-29.1988>

Tyagi, V. K., Fdez-Güelfo, L. A., Zhou, Y., Álvarez-Gallego, C. J., Garcia, L. I. R., & Ng, W. J. (2018). Anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW): Progress and challenges [Codigestión anaeróbica de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORMS): Avances y desafíos]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 380–399. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.051>

- Wan, C., Zhou, Q., Fu, G., & Li, Y. (2011). Semi-continuous anaerobic co-digestion of thickened waste activated sludge and fat, oil and grease [Codigestión anaeróbica semicontinua de lodos activados residuales espesados y grasas, aceites y grasas]. *Waste Management*, 31(8), 1752–1758. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.025>
- Wang, J., y Yin, Y. (2018). Fermentative hydrogen production using various biomass-based materials as feedstock [Producción fermentativa de hidrógeno utilizando diversos materiales basados en biomasa como materia prima]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 284–306. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.033>
- Xiao, B., Qin, Y., Wu, J., Chen, H., Yu, P., Liu, J., & Li, Y. Y. (2018). Comparison of single-stage and two-stage thermophilic anaerobic digestion of food waste: Performance, energy balance and reaction process [Comparación de la digestión anaeróbica termófila de residuos de alimentos en una y dos etapas: rendimiento, balance energético y proceso de reacción]. *Energy Conversion and Management*, 156, 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.092>
- Yue, L., Cheng, J., Hua, J., Dong, H., Zhou, J., & Li, Y. Y. (2020). Improving fermentative methane production of glycerol trioleate and food waste pretreated with ozone through two-stage dark hydrogen fermentation and anaerobic digestion [Mejora de la producción fermentativa de metano de trioleato de glicerol y residuos de alimentos pretratados con ozono mediante fermentación de hidrógeno oscuro en dos etapas y digestión anaeróbica]. *Energy Conversion and Management*, 203, 112225. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112225>

- Yusuf, R. O., y Oyewumi, M. O. (2008). Qualitative Assessment of Methane Generation Potential for Municipal Solid Wastes: A Case Study [Qualitative Assessment of Methane Generation Potential for Municipal Solid Wastes: A Case Study]. *Environmental Research Journal, Medwell Journals*, 2(4), 138–144.
- Zahedi, S., Solera, R., Micolucci, F., Cavinato, C., & Bolzonella, D. (2016). Changes in microbial community during hydrogen and methane production in two-stage thermophilic anaerobic co-digestion process from biowaste [Changes in microbial community during hydrogen and methane production in two-stage thermophilic anaerobic co-digestion process from biowaste]. *Waste Management*, 49, 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.016>
- Zhang, B., Zhang, L., Zhang, S, Shi, H, & Cai, W. (2005). The influence of pH on hydrolysis and acidogenesis kitchen wastes [La influencia del pH en la hidrólisis y acidogénesis de los residuos de cocina]. *Environmental Technology*, 26(3), 329–340.
- Zhang, J., Loh, K. C., Li, W., Lim, J. W., Dai, Y., & Tong, Y. W. (2017). Three-stage anaerobic digester for food waste [Digestor anaeróbico de tres etapas para residuos de alimentos]. *Applied Energy*, 194, 287–295. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.116>
- Zhou, P., Elbeshbishy, E., & Nakhla, G. (2013). Optimization of biological hydrogen production for anaerobic co-digestion of food waste and wastewater biosolids [Optimización de la producción biológica de hidrógeno para la codigestión anaeróbica de residuos de alimentos y biosólidos de aguas residuales]. *Bioresource Technology*, 130, 710–718.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.069>

Zhu, H., Parker, W., Basnar, R., Proracki, A., Falletta, P., Beland, M., & Seto, P. (2008). Biohydrogen production by anaerobic co-digestion of municipal food waste and sewage sludges [Producción de biohidrógeno mediante codigestión anaeróbica de residuos de alimentos municipales y lodos de depuradora]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(14), 3651–3659. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.04.040>

APÉNDICES

Apéndice 1.

Curvas de PBH y PBM ajustadas al modelo de Gompertz.

Figuras con la cinética de reacción para el PBH y el PBM a partir de las mezclas de la FORSU por ensayo de digestión anaerobia en 2 etapas.

- ETAPA 1: Fermentación

- A. Ensayo 1

Monodigestión

Nombre Reporte AMPTS: 1C_H (Primer ensayo de Hidrógeno)

pH: 5, T: 37 C°

Duración: 1d

- ETAPA 2: Metanogénesis

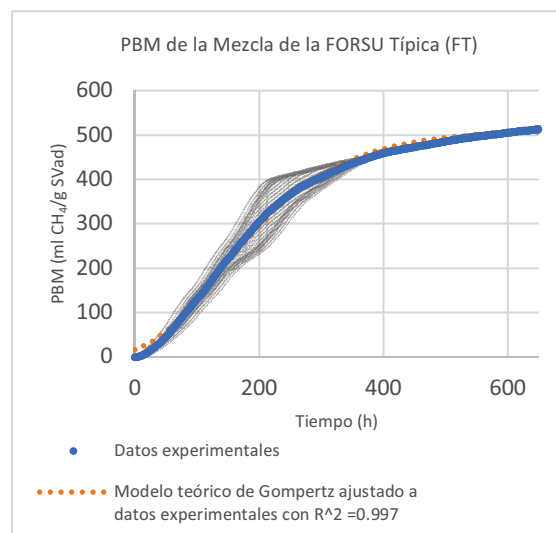
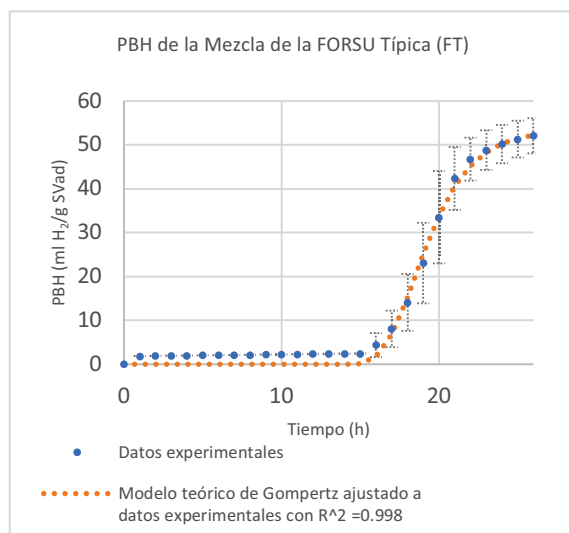
- B. Ensayo 1

Monodigestión

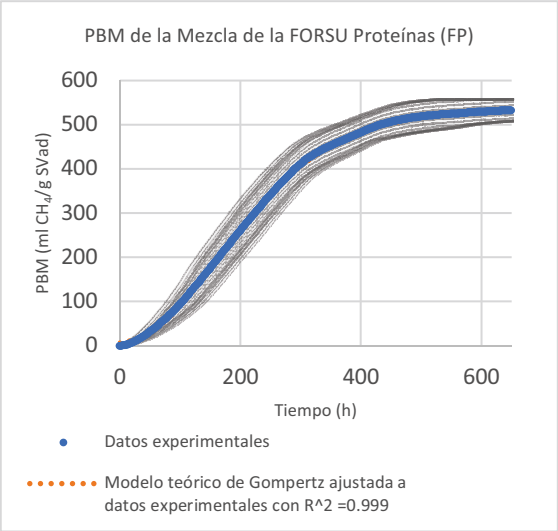
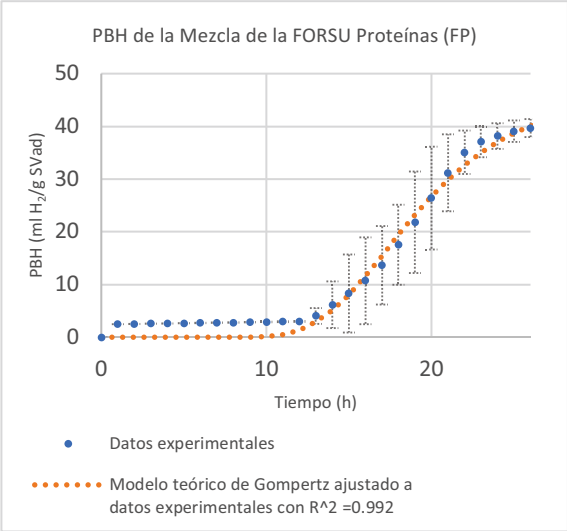
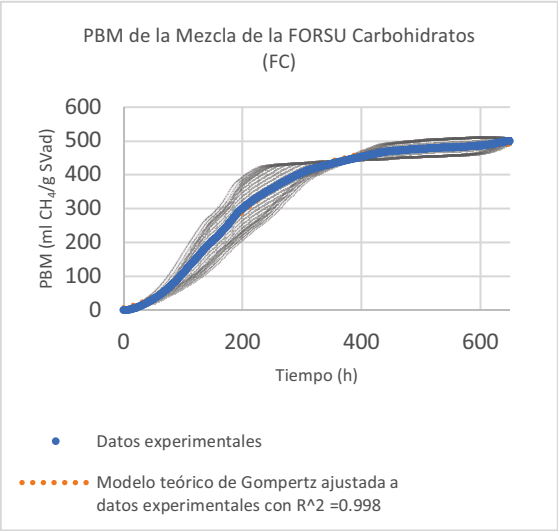
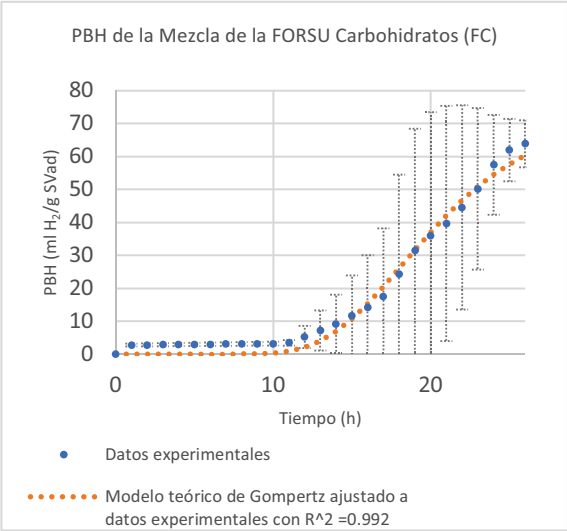
Nombre Reporte AMPTS: 1C_M_V2 (Primer ensayo de Metano)

pH: 7.5, T: 37 C°

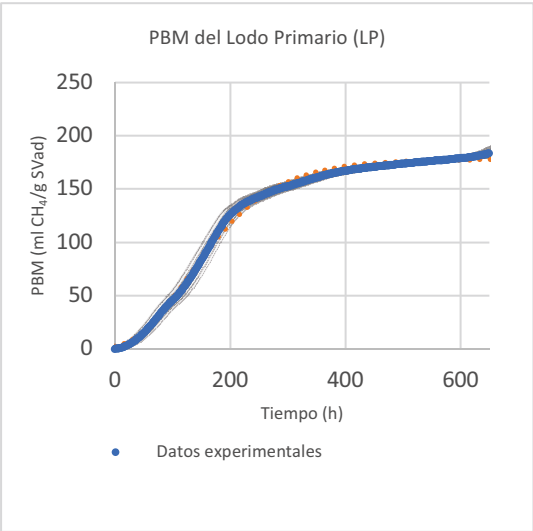
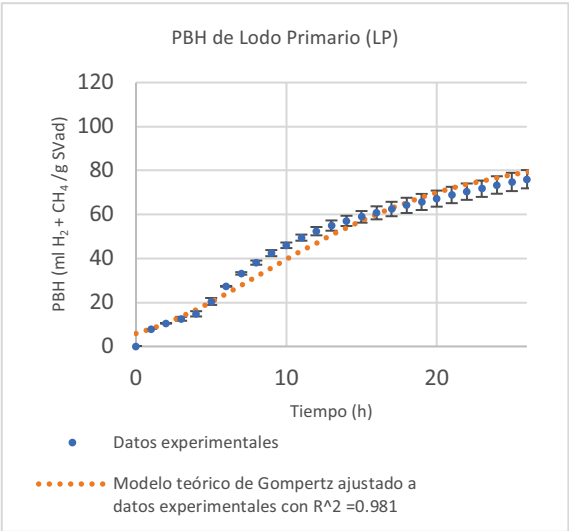
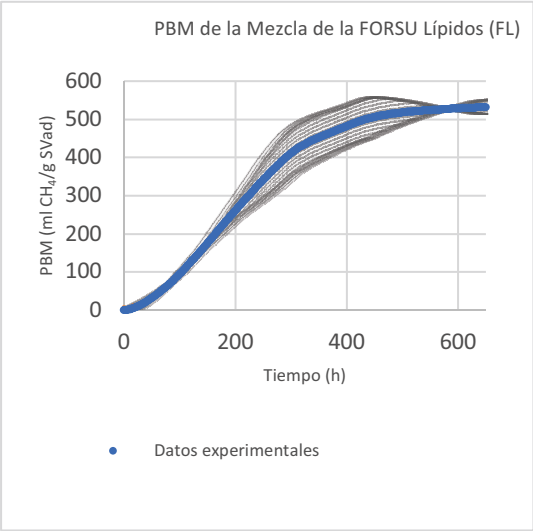
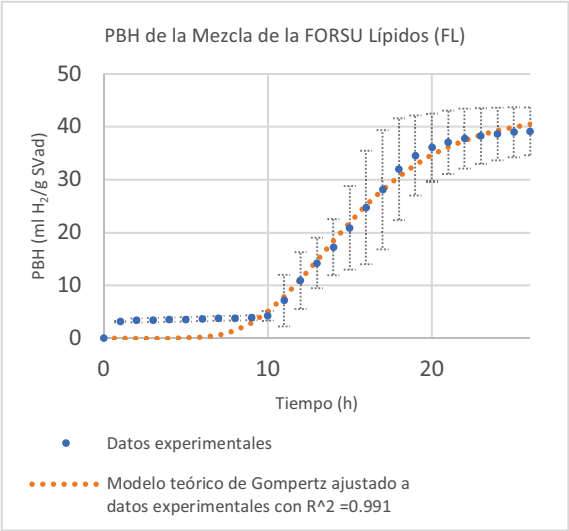
Duración: 27d



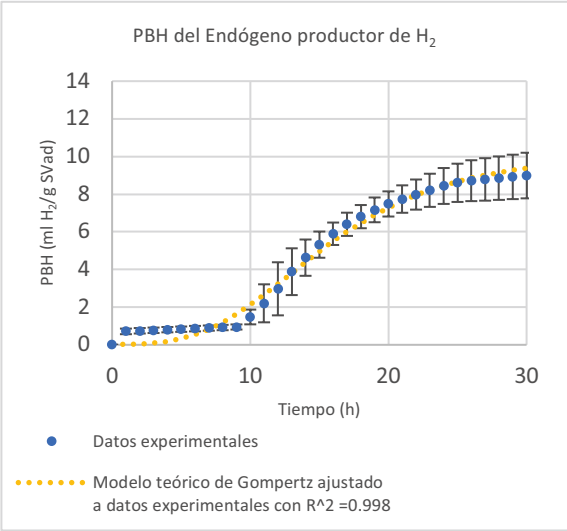
Continuación del Apéndice 1.



Continuación del Apéndice 1.



Continuación del Apéndice 1.



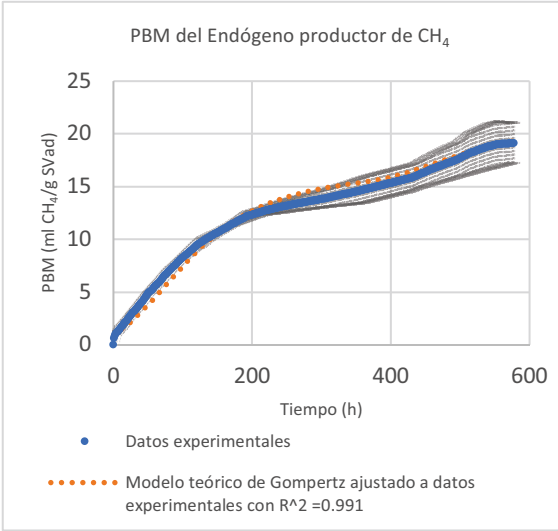
C. Ensayo 2

Codigestión (80/20)

Nombre Reporte AMPTS: 3C_H (Tercer ensayo de Hidrógeno)

pH: 5, T: 37 C°

Duración: 1d



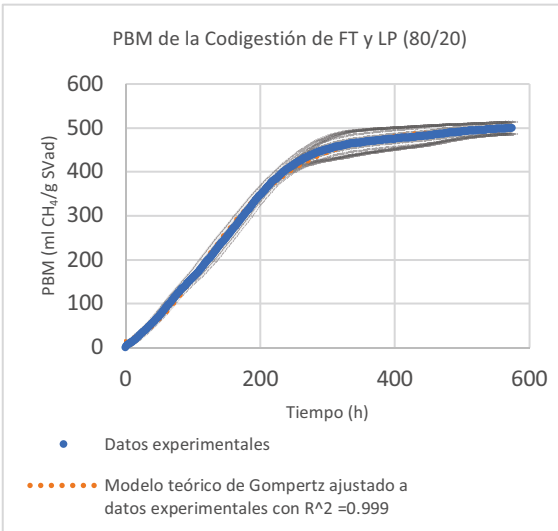
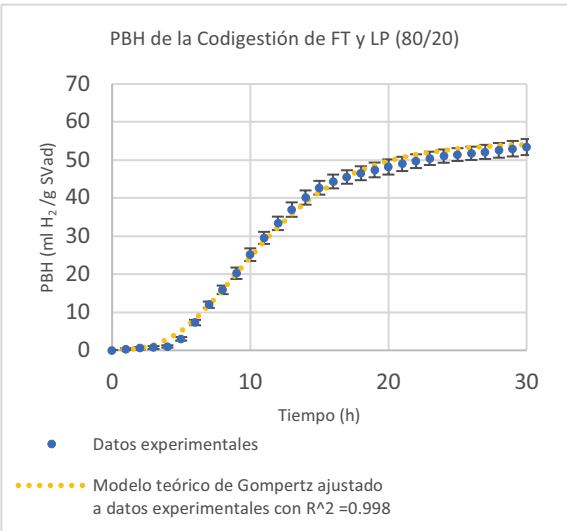
D. Ensayo 2

Codigestión (80/20)

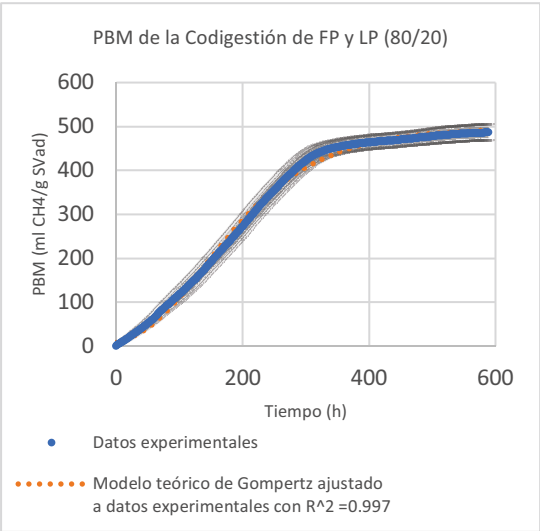
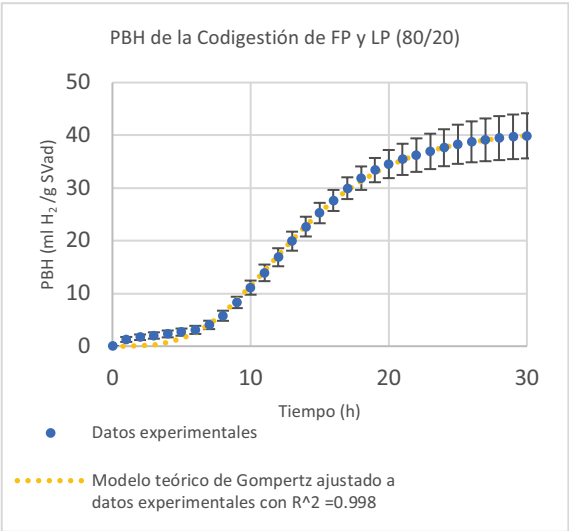
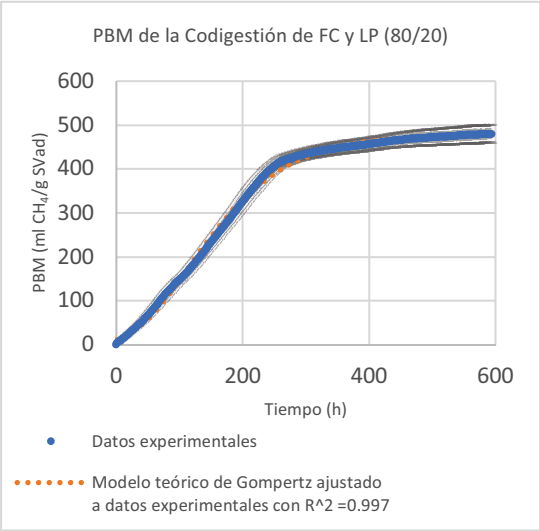
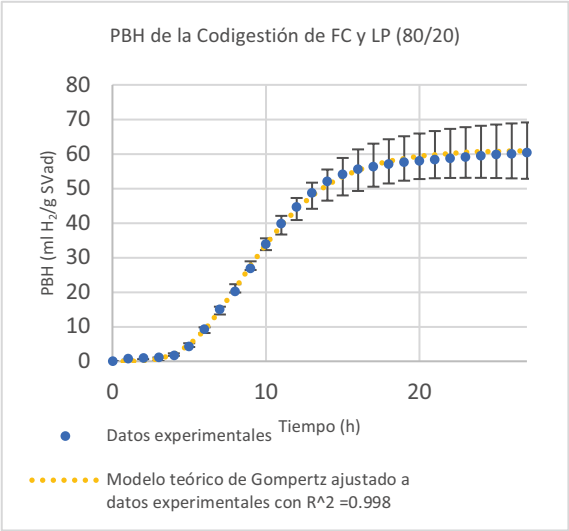
Nombre Reporte AMPTS: 3C_M (Tercer ensayo de Metano)

pH: 7.5, T: 37 C°

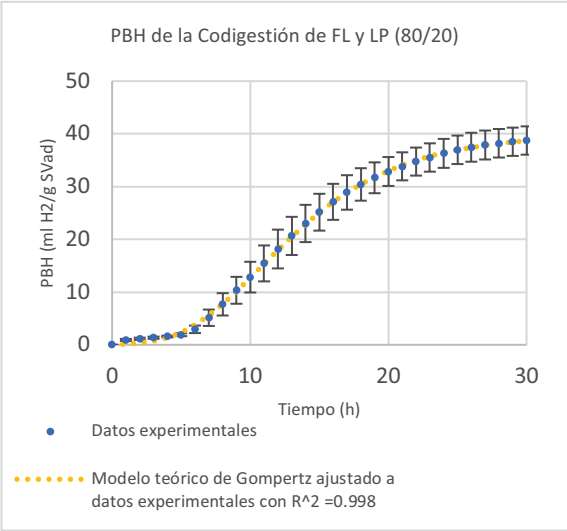
Duración: 24d



Continuación del Apéndice 1.



Continuación del Apéndice 1.



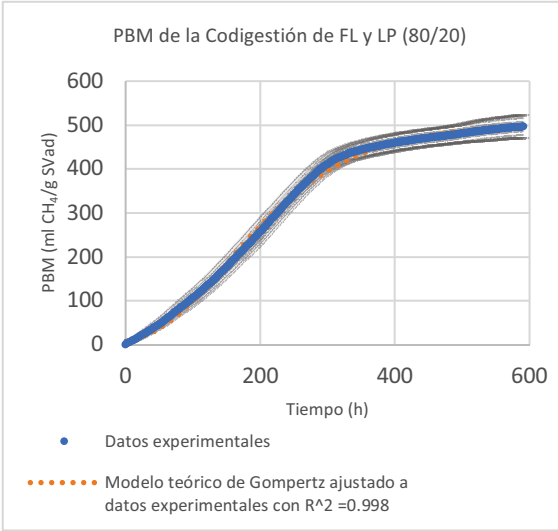
E. Ensayo 3

Codigestión (70/30)

Nombre Reporte AMPTS: 4C_H (Cuarto ensayo de Hidrógeno)

pH: 5, T: 37 C°

Duración: 1d



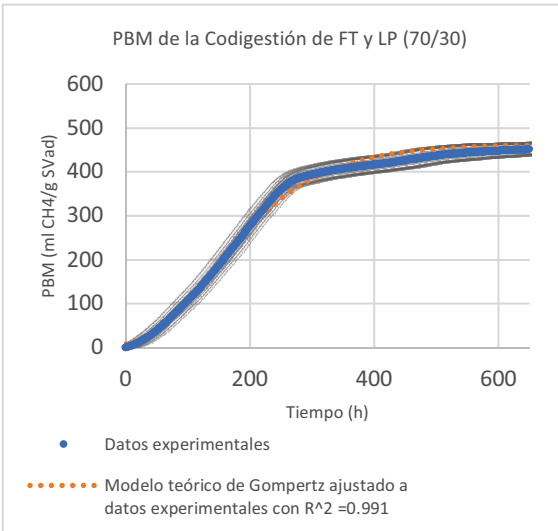
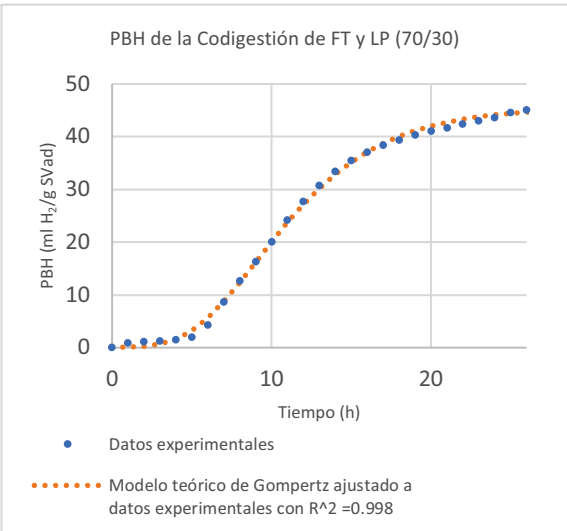
F. Ensayo 3

Codigestión (70/30)

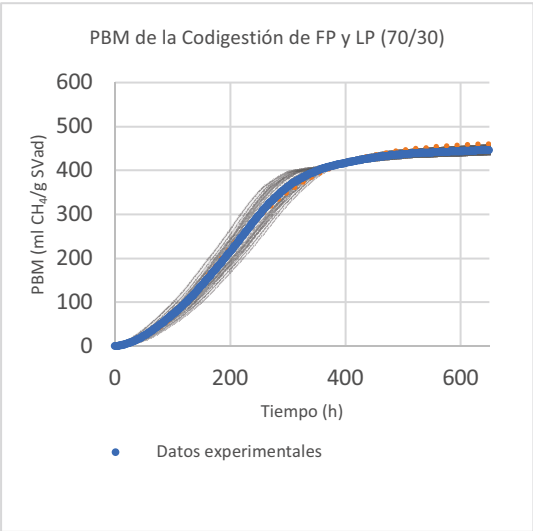
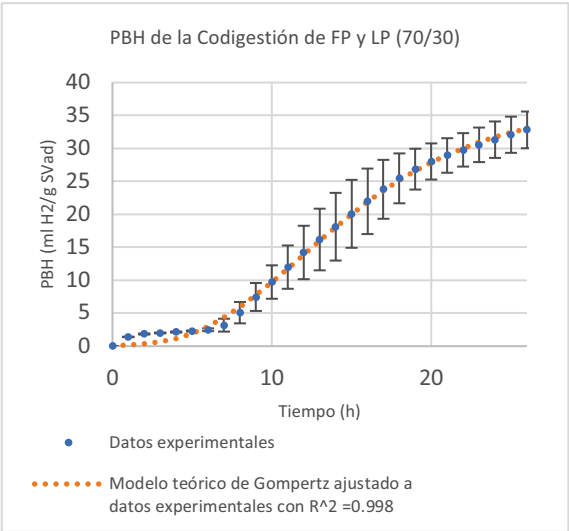
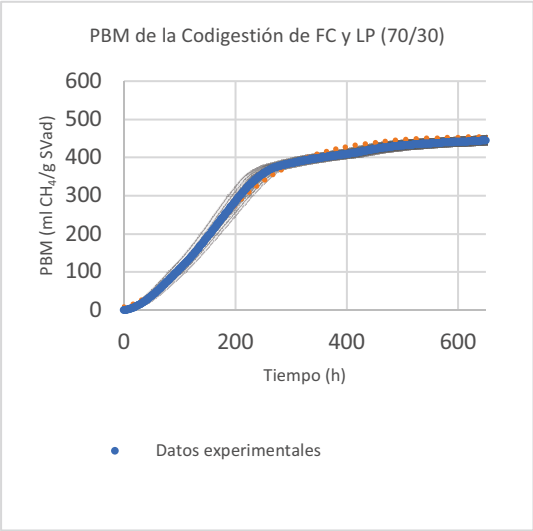
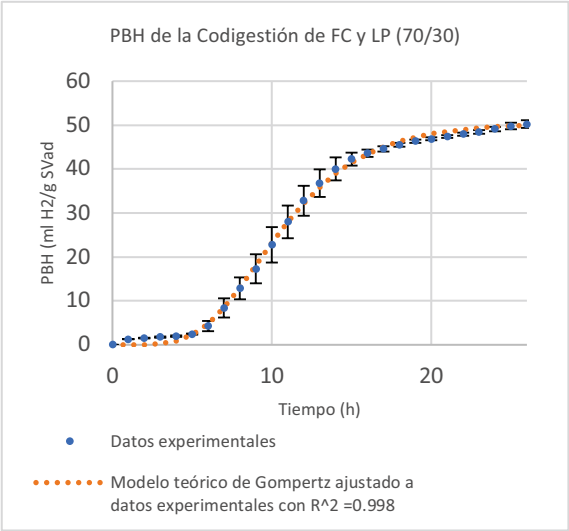
Nombre Reporte AMPTS: 4C_M (Cuarto ensayo de Metano)

pH: 7.5, T: 37 C°

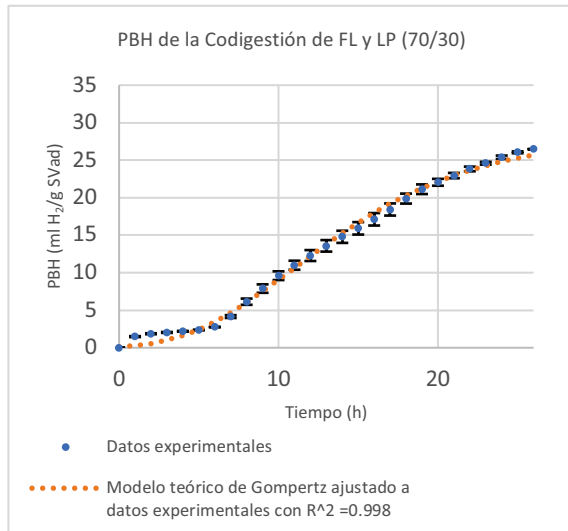
Duración: 27d



Continuación del Apéndice 1.



Continuación del Apéndice 1.



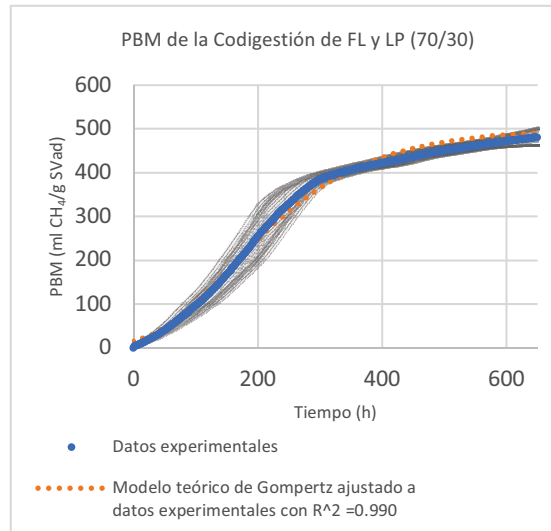
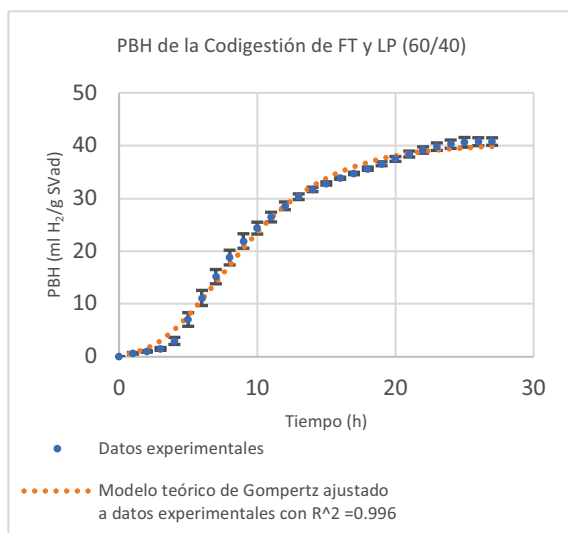
G. Ensayo 4

Codigestión (60/40)

Nombre Reporte AMPTS: 5C_H (Quinto ensayo de Hidrógeno)

pH: 5, T: 37 C°

Duración: 1d



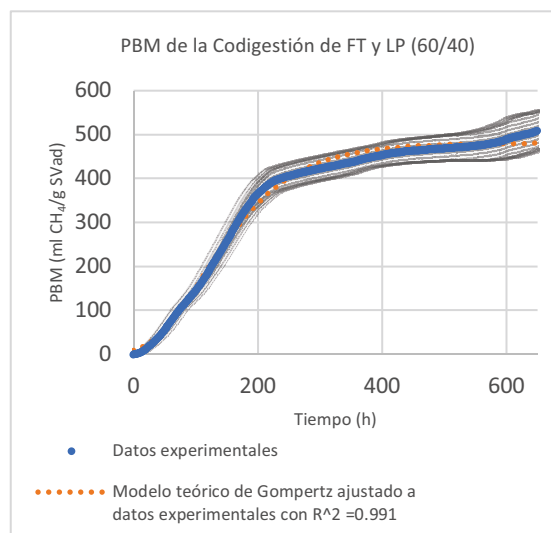
H. Ensayo 4

Codigestión (60/40)

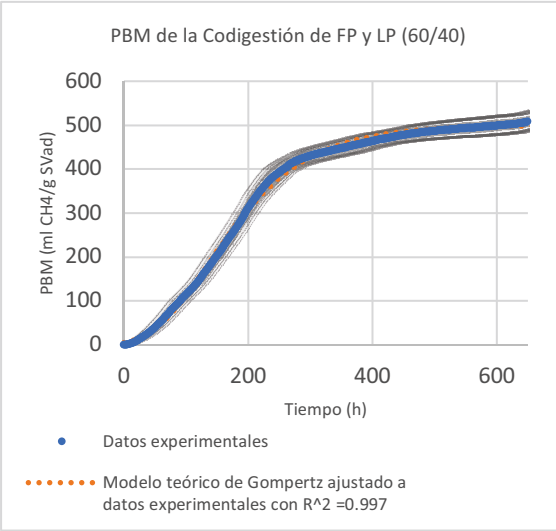
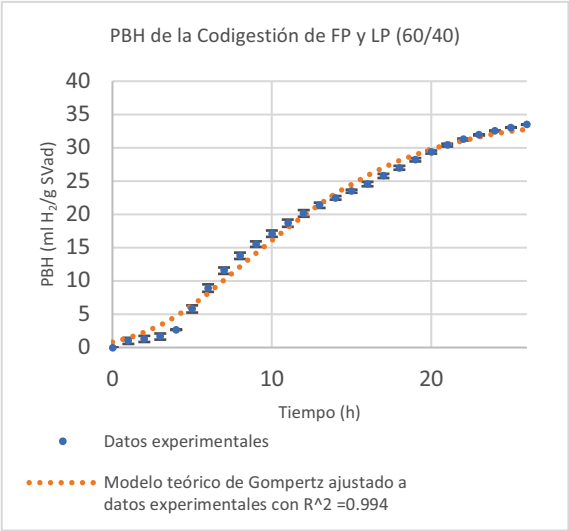
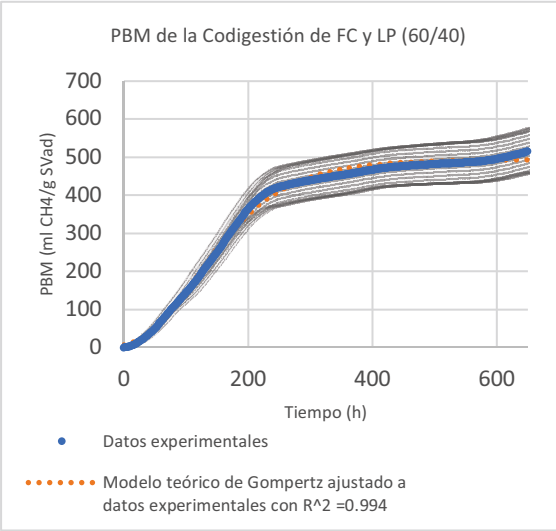
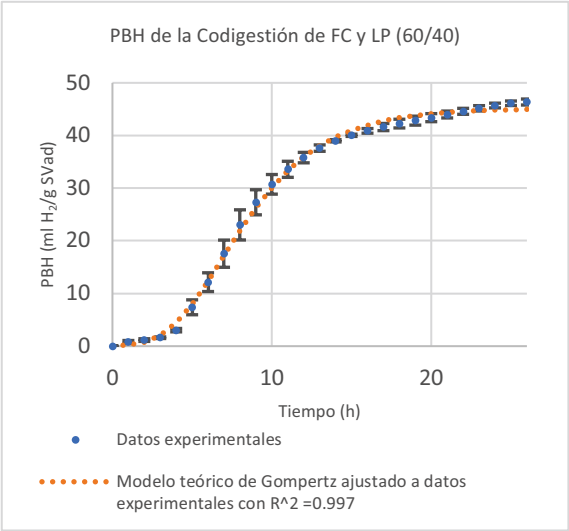
Nombre Reporte AMPTS: 5C_M (Quinto ensayo de Metano)

pH: 7.5, T: 37 C°

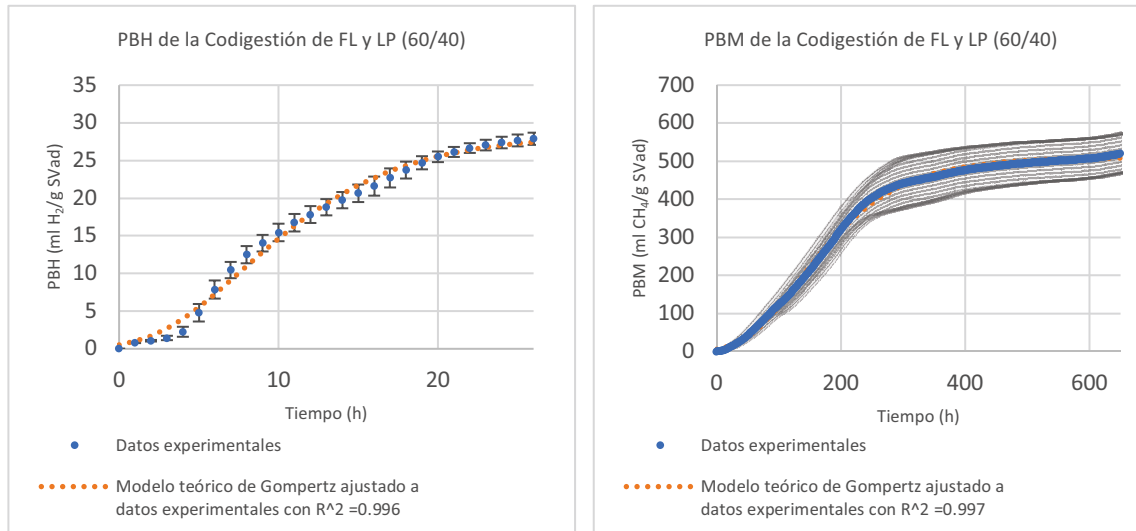
Duración: 27d



Continuación del Apéndice 1.



Continuación del Apéndice 1.



Nota. Figuras con la cinética de reacción para el PBH y el PBM a partir de las mezclas de la FORSU por ensayo de digestión anaerobia en 2 etapas. Elaboración propia.

Apéndice 2.

PBM para cada mezcla de la FORSU en una etapa de digestión anaerobia

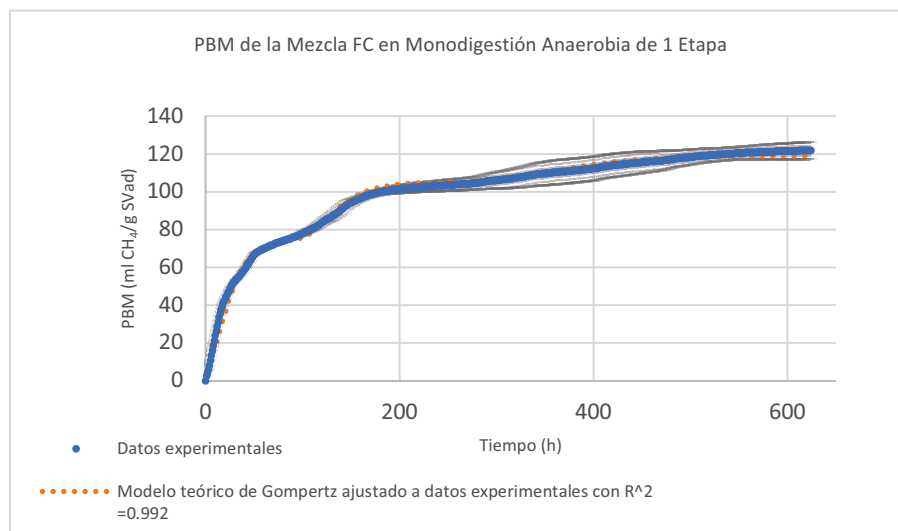
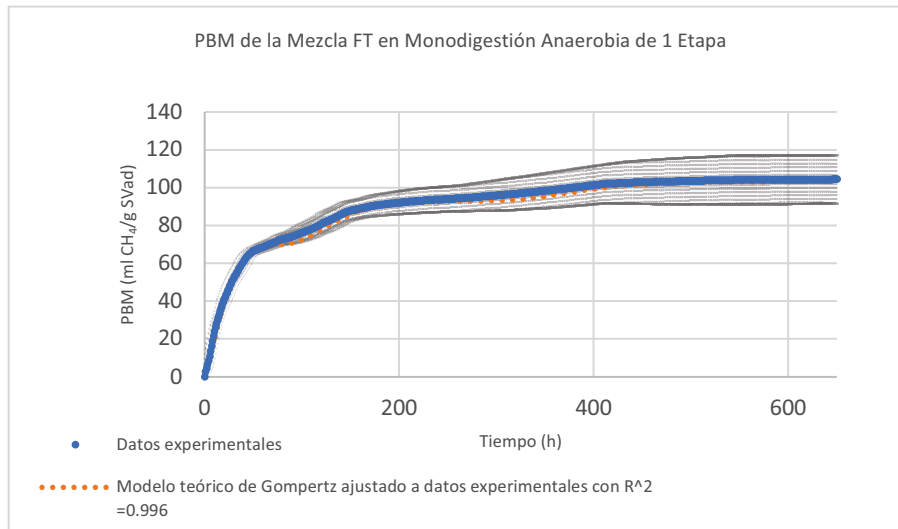
A. Ensayo 5

Monodigestión

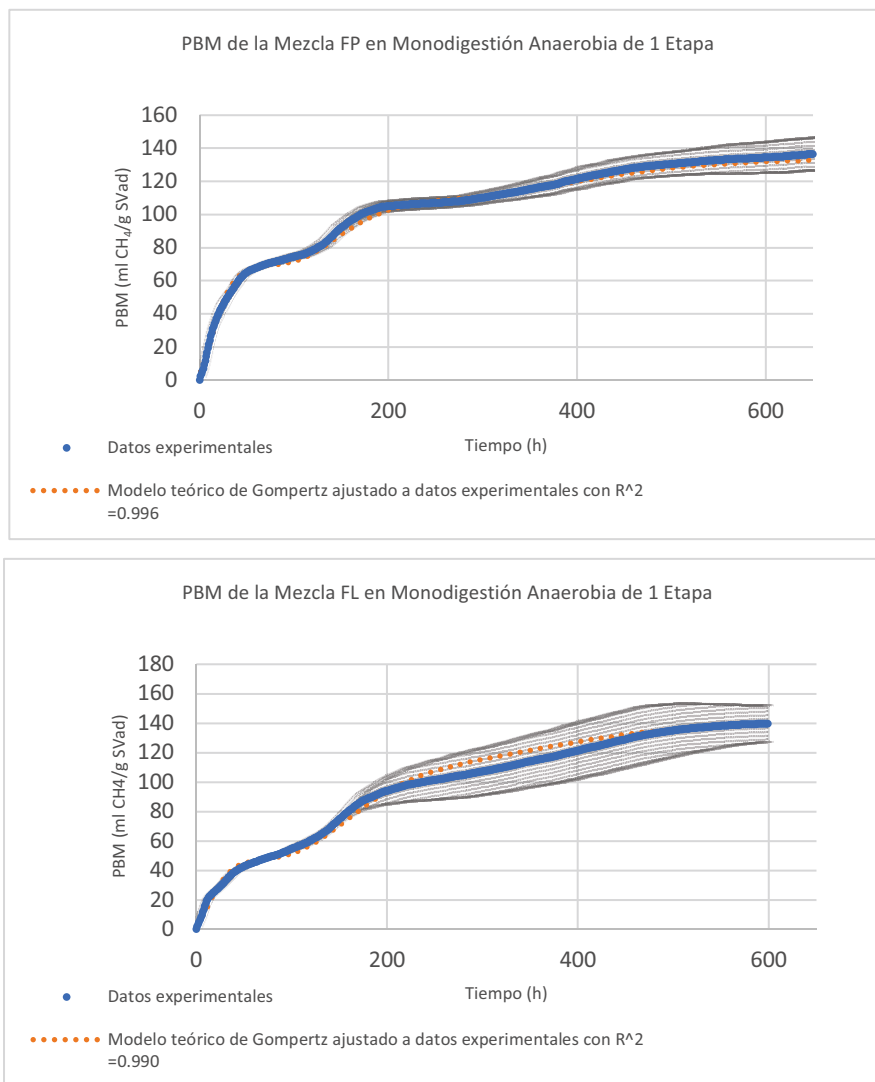
Nombre Reporte AMPTS: 6C_1ET (Digestión Anaerobia en una Etapa)

pH: 7.5, T: 37 C°

Duración: 27d



Continuación del Apéndice 2.



Nota. Figuras con la cinética de reacción para el PBH y el PBM a partir de las mezclas de la FORSU por ensayo de digestión anaerobia en 1 etapa. Elaboración propia.