



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS

AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

TEMA:

“EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS
ORGÁNICOS MUNICIPALES DEL CANTÓN URCUQUÍ PARA EL
ESCALAMIENTO DE UNA PLANTA DE BIOGÁS”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Energías
Renovables

AUTORES:

JORGE ALEXIS GUAGALANGO VARELA

DIEGO REMIGIO VÁSQUEZ JUMA

DIRECTOR

ING. JUAN CARLOS GARCÍA MONTOYA, PhD.

ABRIL – 2021

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES**

CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

**“EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS
ORGÁNICOS MUNICIPALES DEL CANTÓN URCUQUÍ PARA EL
ESCALAMIENTO DE UNA PLANTA DE BIOGÁS”**

Trabajo de titulación revisado por el Comité Asesor, previo a la obtención del Título de:

INGENIEROS EN ENERGÍAS RENOVABLES

APROBADA:

Juan García MSc, PhD

DIRECTOR

.....
FIRMA

Juan Guamán MSc

ASESOR

.....
FIRMA

Santiago Zárate MSc

ASESOR

.....
FIRMA

IBARRA-ECUADOR

MARZO, 2021



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO		
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1003967237	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Guagalango Varela Jorge Alexis	
DIRECCIÓN:	San Pablo del Lago- Otavalo	
EMAIL:	jorgerhcp1996@gmail.com	
TELÉFONO FIJO:	TELÉFONO MÓVIL:	0984203578

DATOS DE CONTACTO		
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004468953	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Vásquez Juma Diego Remigio	
DIRECCIÓN:	Ibarra	
EMAIL:	diegovasqz41@gmail.com	
TELÉFONO FIJO:	TELÉFONO MÓVIL:	0985774623

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS MUNICIPALES DEL CANTÓN URCUQUÍ PARA EL ESCALAMIENTO DE UNA PLANTA DE BIOGÁS
AUTOR (ES):	Guagalango Varela Jorge Alexis Vásquez Juma Diego Remigio
FECHA: DD/MM/AAAA	25-03-2021
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Energías Renovables
ASESOR /DIRECTOR:	Juan Carlos García Montoya, PhD.

1. CONSTANCIAS

Los autores manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que son los titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 26 días del mes de abril del 2021

LOS AUTORES

Guagalango Varela Jorge Alexis

Vásquez Juma Diego Remigio

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

Guía: FICAYA – UTN

Fecha: Ibarra, a los 31 días del mes de marzo del 2021

JORGE ALEXIS GUAGALANGO VARELA

DIEGO REMIGIO VÁSQUEZ JUMA

“EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS MUNICIPALES DEL CANTÓN URCUQUÍ PARA EL ESCALAMIENTO DE UNA PLANTA DE BIOGÁS”

TRABAJO DE GRADO

Ingenieros en Energías Renovables. Universidad Técnica del Norte. Carrera de Ingeniería en Energías Renovables. Ibarra, **abril 2021. 107 pp.**

DIRECTOR: *Juan Carlos García Montoya, PhD.*

DIRECTOR DE TESIS



Juan Carlos García Montoya, PhD.

AUTORES



Guagalango Varela Jorge Alexis



Vásquez Juma Diego Remigio

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, le damos gracias a Dios por habernos permitido culminar nuestros estudios de tercer nivel, gracias a su bondad e infinita misericordia es que podemos lograr cada objetivo que nos planteamos.

Gracias a nuestros padres quienes con sacrificio han sabido instruirnos como personas con valores, capaces de enfrentar las adversidades que se presentan sin temor alguno y por dejarnos este valioso regalo como lo es la educación superior.

Gracias a nuestros familiares que por su buen ejemplo y todo su apoyo han infundido en nosotros la perseverancia y el orgullo de alcanzar nuestros propósitos.

Un agradecimiento especial para nuestro director de tesis PhD. Juan Carlos García y a nuestros asesores MSc. Juan Guamán y MSc. Santiago Zarate, quienes nos brindaron su valioso tiempo y conocimiento para formarnos como profesionales críticos, comprometidos y responsables.

Gracias al personal del Municipio del Cantón San Miguel de Urcuquí y a su importante disposición y colaboración para que nuestra investigación se pueda llevar a cabo, en especial al Sr. Marco Salas concejal rural del cantón y todo el departamento de gestión ambiental del municipio.

En particular queremos agradecer a nuestros compañeros y amigos quienes han sido de gran ayuda en varias ocasiones, por fortalecer un lazo de compañerismo y camaradería con la que siempre podremos contar.

Jorge Alexis Guagalango Varela
Diego Remigio Vásquez Juma

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a Dios, la vida entera se la debo a Él ; *“sabiduría y ciencia te es dada; y también te daré riquezas, hacienda y gloria, cual nunca hubo en los reyes que han sido antes de ti, ni después de ti habrá tal”*.

2 crónicas 1:12

A mi madre Yolanda Varela quien siempre luchó por darme la educación, este trabajo de ingeniería es fruto de todos sus esfuerzos, sin su compañía y sabiduría no habría llegado hasta aquí.

A mi Padre el Ab. Jorge Guagalango, donde quiera que te encuentres espero que este título de ingeniería cumpla lo que un día imaginaste, el poder dejar tu legado de entrega y amor por la profesión. Te llevo siempre presente.

A mis hermanas Lily e Ibeth sus vidas siempre fueron de bendición, por ser ese ejemplo de crecimiento profesional este logro lo comparto con ustedes.

A Evelyn T. quien ha vivido conmigo valiosos momentos de esta etapa universitaria, por todo eso eres una persona muy importante a quien dedico mi esfuerzo y mis motivos para seguir cosechando éxitos.

Dios bendiga sus vidas
Jorge Alexis Guagalango Varela

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación lo dedico principalmente a mis padres Rocío Juma y Remigio Vásquez, ya que ellos me han ayudado en mis estudios desde el comienzo hasta el final y así lograr una meta muy importante en mi vida.

A mis hermanos y hermanas por contar siempre con su apoyo, especialmente a mi hermana Leonor que me ha ayudado mucho en mi etapa universitaria.

A las personas que nos apoyaron y nos abrieron las puertas para llevar a cabo con éxito esta investigación.

“Si quieres encontrar los secretos del universo, piensa en términos de energía, frecuencia y vibración” Nikola Tesla.

Diego Remigio Vásquez Juma

Índice de Contenidos

RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
Capítulo I.....	1
Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema y justificación	2
1.3 Pregunta directriz	4
1.4 Objetivos de la investigación	5
1.4.1 Objetivo general	5
1.4.2 Objetivos específicos	5
1.5 Hipótesis.....	5
Capítulo II.....	6
Marco Teórico.....	6
2.1 Revisión de Literatura	6
2.1.1 Energía	6
2.1.2 Fuentes de energía no renovable	6
2.1.3 Fuentes de energía renovable	7
2.1.4 Residuos sólidos municipales	11
2.1.5 Digestión Anaerobia.....	14
2.1.6 Biorreactores	16
2.1.7 Producción de biogás	17
2.1.8 Plantas de biogás	18
2.2 Marco Legal	20
2.2.1 Constitución de la Republica del Ecuador 2018	20
2.2.2 Tratados internacionales.....	21
2.2.3 Código Orgánico del Ambiente	21

2.2.4	Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica	21
Capítulo III Metodología.....		22
3.1	Área de Estudio	22
3.2	Métodos	23
3.2.1	Caracterización de residuos orgánicos municipales del Cantón Urcuquí	23
3.2.2	Cuantificación del biogás producido mediante digestión anaeróbica de los residuos orgánicos municipales	29
3.2.3	Experimentación	35
3.2.4	Metodología para determinar el potencial energético de la muestra de residuos orgánicos municipales del cantón Urcuquí.....	37
3.2.5	Análisis de la viabilidad económica en función del diagrama de proceso de la planta de biogás.....	39
Capítulo IV.....		54
Resultados y Discusión		54
4.1	Caracterización de residuos orgánicos municipales del Cantón Urcuquí	54
4.1.1	Densidad de residuos orgánicos	54
4.1.2	Clasificación de residuos.....	54
4.1.3	Curvas de secado y sólidos totales	55
4.1.4	Análisis elemental de residuos orgánicos	56
4.2	Cuantificación del biogás producido mediante digestión anaerobia de residuos orgánicos.....	57
4.2.1	Análisis de varianza para los datos de producción de metano	60
4.2.2	Cuantificación de biometano con un tiempo de retención hidráulica de 35 días utilizando la ecuación modificada de Gompertz.....	61
4.3	Determinación del potencial energético de la muestra de residuos orgánicos	61

4.4	Análisis de viabilidad económica en función del diagrama de proceso de la planta de biogás.....	62
4.4.1	Dimensionamiento de planta de biogás y selección de maquinaria	63
4.4.2	Análisis económico	68
Capítulo V	69
Conclusiones y Recomendaciones	69
5.1	Conclusiones	69
5.2	Recomendaciones	70
Referencias	71
Anexos	82

Índice de tablas

Tabla 1 Tipos de biomasa.....	10
Tabla 2 Componentes principales del biogás	18
Tabla 3 Composición del inóculo comercial.....	34
Tabla 4 Composición del estiércol de ganado.....	34
Tabla 5 Datos para la experimentación	35
Tabla 6 Componentes de prueba de hipótesis	37
Tabla 7 Parámetros de cálculo	41
Tabla 8 Pesos de las muestras de residuos	55
Tabla 9 Análisis elemental de la muestra de residuos orgánicos	57
Tabla 10 Tiempos de retención hidráulica	58
Tabla 11 Producción de metano	60
Tabla 12 Parámetros para el cálculo de la producción de metano	61
Tabla 13 Parámetros de cálculo del potencial energético de biogás	62
Tabla 14 Potencial energético del biometano	62
Tabla 15 Dimensionamiento del biodigestor	63
Tabla 16 Producción de biogás	64
Tabla 17 Datos y resultado del cálculo de calor a la entrada del biodigestor	64
Tabla 18 Parámetros de cálculo de calor generado por la reacción	64
Tabla 19 Cálculo del espesor de las paredes del biodigestor	65
Tabla 20 Cálculo de pérdidas de calor en el biodigestor.....	66
Tabla 21 Tanque de almacenamiento.....	66
Tabla 22 Tanque de mezcla.....	67
Tabla 23 Datos del dimensionamiento del biorreactor.....	68
Tabla 24 Equipos de la planta de biogás	69
Tabla 25 Costos de mano de obra	70
Tabla 26 Requerimientos energéticos de la planta.....	70
Tabla 27 Costos de mantenimiento	71
Tabla 28 Costo de inóculo y aditivos	71
Tabla 29 Ingresos de la planta de biogás	72
Tabla 30 Préstamo.....	72

Tabla 31 Flujo de caja	68
Tabla 32 Indicadores económicos para proyectos.....	69
Tabla 33 Escenario 1, indicadores económicos para proyectos	70
Tabla 34 Escenario 2, indicadores económicos para proyectos	70

Índice de figuras

Figura 1 Conversión de la biomasa.....	11
Figura 2 Diagrama esquemático del proceso de digestión anaerobia.....	15
Figura 3 Conversión de la biomasa en biogás.....	19
Figura 4 Área de estudio	23
Figura 5 a) Peso volumétrico, b) Método de cuarteo, c) Clasificación de residuos	27
Figura 6 Balanza Analógica.....	28
Figura 7 Estufa marca memmer	28
Figura 8 Trituración	29
Figura 9 Construcción del biodigestor	31
Figura 10 Tiras reactivas para medir pH.....	32
Figura 11 Sensor de temperatura Pt100	32
Figura 12 Monitoreo de temperatura	33
Figura 13 Diagrama de procesos de la planta de biogás	40
Figura 14 Número de potencia de la turbina Rushton	49
Figura 15 Número de potencia para impulsor de eje marina	52
Figura 16 Clasificación de residuos orgánicos	55
Figura 17 a) Curva de secado, b) Curva de humedad	56
Figura 18 Producción de biogás.....	58
Figura 19 Variación de pH.....	59
Figura 20 Variación de temperatura.....	60

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Anteproyecto del trabajo de titulación

Nombre de los estudiantes: Jorge Alexis Guagalango Varela,
Diego Remigio Vásquez Juma

RESUMEN

El biogás se obtiene a partir de la descomposición de residuos orgánicos municipales, donde, el gas resultante es una combinación de gas metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). La investigación se lleva a cabo en el cantón Urcuquí provincia de Imbabura, con el objetivo de revalorizar los residuos orgánicos que llegan al relleno sanitario y así evaluar su potencial energético mediante la digestión anaerobia para la producción de biogás. En la primera fase de la investigación se realiza la caracterización de residuos orgánicos y se determina la relación carbono/nitrógeno necesario para la experimentación. La segunda fase consiste en la construcción de reactores batch a escala laboratorio, en la cual se evaluó la producción de biometano a partir de dos diferentes mezclas cuya única variante es el tipo de inóculo. La mezcla S/I 2.2 correspondiente a inóculo de estiércol vacuno demostró mayor productividad en un 9.9% y 10.1% frente a la mezcla S/I 200 de inóculo comercial y reactor testigo, respectivamente. La temperatura de operación se mantuvo constante en un rango mesofílico de 32°C y un pH inicial del sustrato fue de 7. En la tercera y cuarta etapa se determina el potencial energético de los residuos orgánicos del cantón Urcuquí, se elaboró un diagrama de proceso de una planta de biogás con su respectivo dimensionamiento, donde, se escoge los equipos y maquinaria a utilizarse. Por último, se realizó un análisis de viabilidad económica de la planta en tres escenarios diferentes.

ABSTRACT

Biogas is obtained by means of the decomposition of municipal organic waste, where the resulting gas is a combination of methane gas (CH₄) and carbon dioxide (CO₂). The research is carried out in Urcuquí canton, province of Imbabura, with the aim of revaluing the organic waste that arrives at the landfill and thus evaluate its energy potential through anaerobic digestion for the production of biogas. In the first phase of research, the characterization of organic waste was addresses and therefore the carbon/nitrogen ratio necessary for the experimentation was determined. The second phase consisted on the construction of laboratory-scale batch reactors, in which the production of biomethane from two different mixtures was evaluated, the only variant being the type of inoculum. The S/I 2.2 mixture corresponding to cow manure inoculum showed higher productivity of 9.9% and 10.1% compared to the S/I 200 mixture of commercial inoculum and control reactor, respectively. The operating temperature was kept constant in a mesophilic range of 32 °C and an initial pH of the substrate was 7. In the third and fourth stages, the energy potential of the organic waste from the Urcuquí canton was determined, a process diagram of a biogas plant was prepared with its respective sizing, where the equipment and machinery to be used were chosen. Finally, an economic feasibility analysis of the plant was carried out in three different scenarios.

Capítulo I

Introducción

1.1 Antecedentes

Todo asentamiento urbano y rural genera residuos diariamente debido a las actividades sociales, económicas o productivas que realiza, son millones de toneladas en basura que se genera y que resulta difícil de reciclar, tanto por su composición como por su cantidad y por el desequilibrio en la naturaleza causado por el ser humano productor, consumidor y no reciclador (Groppelli & Giampaoli, 2015).

La valorización energética de los desechos orgánicos cautiva la atención de muchos investigadores, especialmente el tratamiento anaeróbico de desechos orgánicos para producción de biogás es una alternativa valiosa (Moreda, 2016). En este contexto la búsqueda de fuentes de energía renovables resulta una tarea obligatoria para todos los países en la actualidad, aunque las ventajas del biogás como combustible alternativo se han reportado desde el siglo XIX, el reavivamiento actual del interés en la producción de biogás, y de la captura de metano, se debe al agotamiento de las reservas de gas natural y al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Achinas et al., 2017).

Las plantas de biogás se han desarrollado y estudiado ampliamente en Alemania, Dinamarca y Australia, en la etapa inicial de su desarrollo se construyeron muchas plantas de biogás en granjas, con el objetivo de satisfacer las necesidades de energía y fertilizantes de la granja mediante el tratamiento de desechos agrícolas como el estiércol de ganado y los desechos de vegetales (Liu et al., 2011).

La digestión anaerobia de sustancias orgánicas es el núcleo de tales proyectos y técnicas (Liu et al., 2011). La materia prima destinada a la transformación de biogás se encuentra en lugares de disposición final de los residuos orgánicos, un claro ejemplo es en Cuenca el Proyecto de Biogás en Pichacay que está ubicado a 21 kilómetros de la ciudad de Cuenca y contempla el abastecimiento de la demanda de energía nacional a través del sistema de biogás

aplicado en el relleno sanitario Pichacay, resultando una potencia de 2 MW. Según el MERNNR (2018), en Ecuador al 2018, la energía bruta producida por fuente biogás fue de 45.52 GWh que representa el 0.16% del total de energía bruta generada.

En 2017, a nivel nacional, según la información declarada por los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales (GADM), un habitante de la zona urbana produce en promedio 0.86 kg al día, en cuanto a la caracterización de residuos para el mismo año, del total de residuos sólidos producidos, el 57% corresponde a residuos orgánicos y el 43% a inorgánicos (INEC, 2017). Según la proyección de producción de residuos sólidos presentada por el Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos – PNGIDS ECUADOR, estimó que para fines de 2017 se generarán 5.4 millones de toneladas métricas de residuos sólidos municipales (RSM) por año a una producción per cápita de 300 kg/año (MAE, 2010).

Es evidente que la generación de residuos sólidos municipales representa un problema ambiental y social que debe ser resuelto, debido a que los sitios de disposición final en su mayoría son vertederos a cielo abierto cuya vida útil se encuentra colapsando, por ello, es necesario solucionar la problemática revalorizando los residuos orgánicos (CEPAL, 2013).

La industria del biogás ha fomentado su desarrollo en las ayudas públicas durante algunos años, sin embargo el avance tecnológico ha permitido hacer rentable este tipo de proyectos tal y como sucede con la energía solar y eólica (AGF, 2019). De este modo las energías renovables pueden ser eficientes y rentables, capaces de competir con las energías tradicionales.

1.2 Planteamiento del problema y justificación

En Ecuador la gestión de RSM se desarrolla de manera continua mediante programas y acuerdos que establecen políticas para mejorar su manejo y disposición final. En el Acuerdo Ministerial No. 52 del “Proceso de Cierre Técnico y Saneamiento de Botaderos de Desechos Sólidos y Viabilidad Técnica” se obliga a los GADs Municipales a cerrar sus botaderos e implementar rellenos sanitarios para la disposición final de residuos sólidos, debido a ello, en la actualidad más de 96

municipios cuentan con rellenos sanitarios o celda emergentes para la disposición final de RSM (INEC, 2017). Sin embargo, este método de disposición final resulta poco atractiva debido a la gran cantidad de gases de efecto invernadero que se emite a la atmosfera, se calcula que el 14% de las emisiones globales de CH₄ se relaciona con rellenos sanitarios (Gonzales, 1997).

Una de las principales preocupaciones ambientales de los rellenos sanitarios es su posible migración de gas de relleno sanitario a la atmósfera (Xie et al., 2019). El metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) son importantes gases de efecto invernadero (GEI) que emiten los rellenos sanitarios, y su potencial de calentamiento global a 100 años es 28 veces y 265 veces respectivamente que la fuerza radiactiva del dióxido de carbono (CO₂) (IPCC, 2014).

En su investigación Scheehle Godwin, D., Ottinger, D., DeAngelo, B, (2006) afirman que los vertederos son la tercera fuente antropogénica más grande de metano. Según Spokas et al., (2006), los flujos de emisión de metano de los rellenos sanitarios pueden ser más de 10000 g/m²/día.

En Imbabura la necesidad de implementar un sistema de aprovechamiento energético de los residuos sólidos municipales es un tema que se establece desde el año 2011, con la finalidad de resolver definitivamente y de manera óptima el tema de los residuos municipales para la producción de energía eléctrica y abonos orgánicos (El Norte, 2011). Sin embargo, es complicado empezar una evaluación de la materia prima cuando no se dispone de una clasificación por tipo de residuo en el lugar de disposición final por lo que se identificó lugares de disposición final que cuentan con clasificación y disposición de residuos orgánicos en rellenos sanitarios.

La presente investigación busca tener una alternativa al tratamiento de residuos sólidos municipales, principalmente los residuos orgánicos. En el Cantón Urcuquí los residuos sólidos inorgánicos son tratados en un relleno sanitario y los residuos orgánicos se tratan mediante la producción de compost. La investigación consiste en utilizar los residuos orgánicos municipales para la generación de energía y elaboración de subproductos como el biol, mediante una planta de biogás.

En la investigación se detalla todos los datos obtenidos sobre la generación de residuos sólidos municipales en el Cantón Urcuquí, se le da prioridad al porcentaje que representan los residuos orgánicos municipales, ya que es el recurso que se utilizará para la generación de bioenergía. La tecnología que se utilizará son biodigestores, que por medio de digestión anaerobia se obtendrá el biogás para la generación eléctrica y biol como biofertilizante.

La disposición final de residuos sólidos del cantón San Miguel de Urcuquí se la realiza en un relleno sanitario, mismo que cuenta con licencia ambiental, emitida por el Ministerio del Ambiente, bajo resolución N° 1767. El municipio cuenta con 3 vehículos recolectores de carga posterior, cabe recalcar que la recolección que se realiza es diferenciada en residuos orgánicos e inorgánicos, con frecuencias interdiarias en todo el cantón con una recolección total de 10.6 toneladas día de residuo de los cuales el 40.3% representan la fracción orgánica (GAD Urcucquí, 2018).

La población del cantón San Miguel de Urcuquí se incrementó en un 8.97%, está mayoritariamente en el sector rural, su población representa el 3.91% de la población de la provincia de Imbabura, el 33.22% está en la parroquia urbana y el 68.72% en el sector rural (INEC, 2010). La estructura demográfica de población se define en base a la clasificación de grupos de edades de un territorio, la mayor población del cantón está en las edades de 19 a 32 años y de 6 a 12 años (INEC, 2010).

El relleno sanitario se encuentra localizado a 6 km de la cabecera cantonal, en la parroquia de Urcuquí, sector barro chupa con un área disponible de 5 ha, el acceso es a través de una vía principal asfaltada Urcuquí Tumbabiro y un tramo de 1000 m lastrado, perteneciente al Cantón Urcuquí, Provincia de Imbabura (GAD Urcuquí, 2014).

1.3 Pregunta directriz

¿Existe el potencial energético necesario en los residuos orgánicos municipales de Urcuquí para producir biogás capaz de generar energía eléctrica?

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 Objetivo general

Evaluar el potencial energético de los residuos orgánicos municipales del Cantón Urcuquí para escalamiento de una planta de biogás.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar los residuos orgánicos municipales del Cantón Urcuquí.
2. Cuantificar el biogás producido mediante digestión anaeróbica de los residuos sólidos orgánicos.
3. Determinar el potencial energético de la muestra de los residuos orgánicos municipales del cantón Urcuquí.
4. Analizar la viabilidad económica en función del diagrama de proceso de la planta de biogás.

1.5 Hipótesis

Los residuos orgánicos municipales generan la cantidad necesaria de biogás para llevar a cabo la implementación de una planta de bioenergía en el cantón Urcuquí.

Capítulo II

Marco Teórico

En este capítulo se expone la información utilizada para el desarrollo de la investigación, se tomó referencias de investigaciones, artículos científicos y estudios con enfoque en evaluación energética de residuos orgánicos y digestión anaeróbica.

2.1 Revisión de Literatura

2.1.1 *Energía*

La energía se define como la “capacidad de realizar un trabajo”, las tareas de este trabajo pueden ser mecánicas, físicas, químicas o eléctricas (Cengel y Boles, 2011). La energía es algo inmaterial y fundamental del universo, así lo cita Kuyper y Morales, (2014). Se perciba o no, la energía es parte importante en la mayoría de los aspectos cotidianos; por ejemplo, la calidad de vida y su sostenibilidad dependen de su disponibilidad, de ahí que es importante tener una buena comprensión de las fuentes energéticas, la conversión de la energía de una forma a otra y las ramificaciones de estas conversiones (Cengel y Boles, 2011).

2.1.2 *Fuentes de energía no renovable*

Son aquellas que existen en la naturaleza en una cantidad limitada, es decir, no se renuevan a corto plazo y por eso se agotan cuando se utilizan (ITC, 2008). Suponen en entorno al 80% de la energía mundial y sobre ellas se ha construido el inseguro modelo energético actual (Kuyper y Morales, 2014).

Los restos de organismos vivos se convierten en combustibles fósiles cuando se compactan en la corteza terrestre durante miles de millones de años, está es la razón por la cual los combustibles fósiles son tan densos en energía, por lo tanto, queda una cantidad finita de combustibles fósiles en la subsuperficie de la Tierra y estas reservas eventualmente se agotarán (Eales, 2012).

Los tres tipos de combustibles no renovables más importantes son:

Carbón. El carbón es una roca sedimentaria orgánica negra o marrón-negra con proporciones variables de hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre, específicamente el carbón es una roca sedimentaria orgánica de fácil combustión, color negro o negro parduzco que normalmente ocurre en estratos de roca como capas o vetas (capas de carbón, vetas de carbón) (Speight, 2019).

Petróleo. El petróleo es un recurso a base de carbono que varía en viscosidad y que es una mezcla extremadamente compleja de compuestos de hidrocarburos, generalmente con cantidades menores de compuestos que contienen nitrógeno y compuestos que contienen azufre, así como cantidades más pequeñas de compuestos que contienen oxígeno (típicamente nafténico derivados ácidos y derivados de fenol) y trazas de constituyentes que contienen metales) (Speight y El-Gendy, 2018).

Gas natural. El gas natural (también llamado gas de pantano) es un combustible fósil gaseoso que se encuentra en los campos de petróleo y gas natural, este gas comúnmente se agrupa con otros combustibles fósiles y fuentes de energía, hay muchas características del gas natural que lo hacen único (Speight, 2019).

2.1.3 Fuentes de energía renovable

Los recursos renovables son recursos naturales que pueden ser recuperados en un periodo corto de tiempo, es decir, la energía renovable es generada a partir de recursos naturales tales como, luz solar, viento, movimiento del agua, biomasa y calor geotérmico (Gorjian, 2017).

Energía eólica. La energía disponible en el viento es básicamente la energía cinética de grandes masas de aire que se mueven sobre la superficie de la tierra, esta energía se la aprovecha gracias a las palas de la turbina eólica que reciben esta energía cinética, para luego transformarla en formas de energía mecánicas o eléctricas, dependiendo de su uso final (Mathew, 2006).

Energía solar PV. La energía fotovoltaica (PV) es la forma más directa de convertir la radiación solar en electricidad y se basa en el efecto fotovoltaico, es

decir, se define como la aparición de un voltaje eléctrico entre dos electrodos unidos a un sistema sólido o líquido al iluminar este sistema (Lotsch et al., 2005).

Energía Solar Térmica. Los sistemas de energía eléctrica solar térmica convierten la energía solar en electricidad al concentrar primero la luz solar entrante, luego convertirla en calor y finalmente convertir el calor en electricidad, debido a este proceso se distingue la tecnología térmica de la energía fotovoltaica que produce electricidad a partir de la luz solar directamente (Holl y DeMeo, 1990).

Hidroenergía. La energía que extrae del agua una central hidroeléctrica y se convierte en electricidad, es energía potencial contenida dentro de la masa de agua como consecuencia de su elevación, por lo tanto, esta energía se libera a medida que el agua fluye cuesta abajo, normalmente se disipa de varias maneras dentro del curso de agua por el que fluye, la tecnología principal de aprovechamiento es una turbina hidráulica que puede extraer algo de esta energía y usarla para producir energía eléctrica (Breeze, 2019).

Energía geotérmica. La energía geotérmica es la energía térmica que se genera y almacena dentro de la Tierra, debido a la diferencia de temperatura entre el núcleo de la Tierra y la superficie de la misma crea un gradiente geotérmico, lo que significa que la energía térmica se conduce continuamente a la superficie, los recursos geotérmicos se producen cuando el flujo de calor a la superficie es alto, lo que permite que la energía se extraiga económicamente para la generación de electricidad o para el uso directo en aplicaciones como la calefacción urbana o los usos agrícolas (Archer, 2020).

Bioenergía. La bioenergía es energía generada a partir de materia orgánica de origen vegetal y animal, como residuos agrícolas y forestales, cultivos energéticos, madera o desechos orgánicos, por ello, la bioenergía se considera una forma de energía renovable baja en carbono, ya que el proceso natural de la fotosíntesis dentro de las plantas bloquea el CO₂ atmosférico en materia orgánica, que cuando se quema muchos años más tarde o en cualquier forma, libera el CO₂ a la atmósfera (Röder y Welfle, 2019).

El material clasificado como biomasa puede incluir madera y derivados de la madera, una variedad de desechos agrícolas y animales, una parte de los desechos urbanos y algunos desechos y subproductos industriales (Breeze, 2019).

Estructura de la biomasa. La biomasa es una mezcla compleja de materiales orgánicos como carbohidratos, grasas y proteínas, junto con pequeñas cantidades de minerales como sodio, fósforo, calcio y hierro, una planta toma agua y nutrientes a través de su raíz desde el suelo y la envía a sus hojas, que producen glucosa utilizando dióxido de carbono de la atmósfera y la luz solar, una parte de este azúcar se convierte para formar nuevos tejidos vegetales (Basu, 2018).

Tipos de biomasa. La biomasa se clasifica en dos grupos con sus respectivas subclasificaciones como se muestra en la tabla 1, donde el comité europeo de normalización publicó dos normas de clasificación y especificación (EN 14961) y garantía de calidad (EN 15234) de biomasa (Basu, 2018). Según su origen, clasificó la biomasa en cuatro grandes categorías:

1. Biomasa leñosa
2. Biomasa herbácea
3. Biomasa de frutas
4. Mezcla y mezclas.

Tabla 1*Tipos de biomasa*

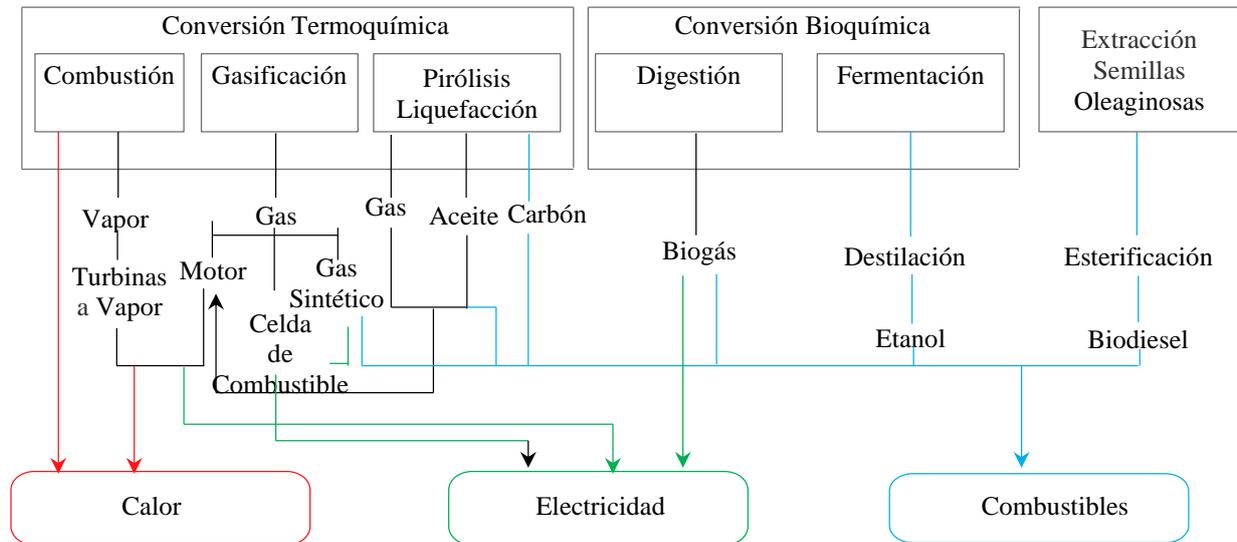
Subclasificación de la biomasa		
Biomasa virgen	Biomasa terrestre	Biomasa forestal
		Pastos
		Cultivos energéticos
Biomasa virgen	Biomasa acuática	Cultivos cultivados
		Algas
		Plantas de agua
Biomasa residual	Residuos Municipales	RSM
		Biosólidos
		Gas de relleno sanitario
	Residuos sólidos agrícolas	Ganado y estiércol
		Residuos de cultivos agrícolas
	Residuos forestales	Corteza, hojas y residuos del piso
	Residuos industriales	Madera de demolición, aserrín
	Aceite usado	

Fuente: (Basu, 2018).

Conversión de la biomasa. La biomasa se puede convertir en varias formas útiles de energía utilizando diferentes procesos de conversión, estos procesos dependen de: el tipo, la cantidad y las características de la materia prima de biomasa, la forma deseada de los requisitos de energía o uso final, las normas ambientales, las políticas, las condiciones económicas y los factores específicos del proyecto, por lo tanto, en la mayoría de las situaciones, es la forma en que se requiere la energía y las materias primas disponibles las que determinan la ruta de proceso adecuada (Adams et al., 2018).

Figura 1

Conversión de la biomasa



Nota: Resumen de las principales vías de conversión de la bioenergía y los vectores energéticos resultantes. Tomado de *Bioenergy* (p.120), por Röder y Welfle, 2019.

2.1.4 Residuos sólidos municipales

Residuos sólidos municipales (RSM), comúnmente conocidos como basura o desperdicios, consiste en artículos cotidianos que se usan y luego se tiran (Sipra et al., 2018). La composición de los residuos municipales consiste en residuos agrícolas, residuos domésticos y otros residuos de residuos comerciales, la composición difiere con factores como la ubicación geográfica, la densidad de población y las fluctuaciones estacionales (Thomas y Soren, 2020). Se puede utilizar una amplia gama de desechos orgánicos de los sectores de alimentos, energía y agua como sustratos tanto para digestión anaerobia como para compost (Lin et al., 2019).

Los residuos sólidos municipales tienen como particularidad que su composición y características varían de acuerdo con la zona o región en la que se han generado. Estas variaciones se dan debido a la condición social de los habitantes entre ellos cabe destacar:

- ✓ Estatus social de sus habitantes.
- ✓ Estilo de vida.

- ✓ Tipo de alimentación.
- ✓ Tipo y abundancia de recursos naturales.

Del contenido de residuos sólidos municipales puede destacarse como fracción relevante la presencia de residuos orgánicos, dichos residuos orgánicos pueden descomponerse de forma rápida, siendo la causa de olores desagradables, otras fracciones presentes en los RSM son: papel y cartón, vidrio, plástico, textiles, cerámicas y cenizas (Bernal et al., 2016).

Disposición final de residuos sólidos municipales.

Relleño Sanitario. El relleno sanitario es un método para deshacerse de los desperdicios en la tierra sin crear molestias ni riesgos para la salud o seguridad pública, utilizando los principios de ingeniería para confinar los desperdicios en el área práctica más pequeña, para reducirlos al volumen práctico más pequeño y para cubrirlos con una capa de la tierra al final de la operación de cada día o en intervalos tan frecuentes como sea necesario (Rao et al., 2017). Debido a los beneficios económicos y sociales, la mayoría de las naciones consideran el relleno sanitario como el tratamiento más viable para los desechos sólidos municipales en comparación con otras inversiones más altas en tratamientos alternativos (Thomas y Soren, 2020).

Incineración. Este método se utiliza para convertir los compuestos orgánicos sólidos en residuos y en forma gaseosa (Moharir et al., 2019). El proceso de incineración que destruye los desechos orgánicos altamente tóxicos y peligrosos difiere de la incineración de RSM, donde a menudo se produce energía, en general, las incineraciones a baja temperatura (hasta 850 °C) y alta temperatura (1200 °C) utilizan energía para oxidar los desechos que contienen carbono y agua a CO₂, vapor de H₂O y gases de HCl y NO_x (Artiola, 2019). El proceso implica la combustión de los residuos, lo que resulta en reducciones de alrededor del 70% en masa y el 90% en volumen (Dhir et al., 2018). Las dioxinas y los furanos son una clase de compuestos clorados que son altamente tóxicos emitidos por las fuentes de combustión, en particular los incineradores de RSM (Barros, 2018).

Pirólisis. La gasificación en ausencia de oxígeno, es decir, el uso de una fuente externa de energía, se llama pirólisis (Klinghoffer y Castaldi, 2013). Pirólisis de la biomasa es un proceso de degradación térmica que se produce a temperaturas entre 350 °C y 600 °C en ausencia de oxígeno, debido a que es un proceso endotérmico requiere una energía térmica subcontratada, por ende, los productos del proceso de pirólisis se clasifican en tres categorías: biochar, bio-oil y gas (Adhikari et al., 2018).

Compostaje. El compostaje es la transformación biológica controlada de desechos orgánicos en condiciones aeróbicas, es decir, en presencia de oxígeno, por microorganismos indígenas como bacterias, actinomicetos, levaduras y hongos (Mortier et al., 2016). Generalmente se desarrolla a través de las fases mesofílica (25–40 °C), termofílica (40–65 °C) y enfriamiento y maduración (10–40 °C), cada una de las cuales está dominada por diferentes grupos de microbios (Lin et al., 2019). El compostaje tiene una tasa de descomposición rápida y la degradación de la materia orgánica es completa, además, los patógenos, los huevos y las semillas de plantas presentes en los desechos pueden ser eliminados de manera efectiva por las altas temperaturas durante la fase termofílica para hacer que el compost sea inocuo (Wong et al., 2017).

Biorrefinería. La biorrefinería utiliza una variedad de materias primas renovables como la biomasa lignocelulósica para producir combustibles y una amplia variedad de sustancias químicas precursoras y materiales de base biológica, similares a la refinería de petróleo moderna (Tan et al., 2011). Por otro lado, la biorrefinería también se puede categorizar según la materia prima individual, como la biorrefinería a base de maíz, la biorrefinería a base de madera, la biorrefinería a base de bosques, la biorrefinería a base de palma, la biorrefinería a base de algas, etc. (KS et al., 2017). En una biorrefinería de biogás no hay separación de componentes por separado en la refinación primaria; en cambio, una gran proporción de los ingredientes orgánicos y componentes de la biomasa se eliminan (con la notable excepción de la lignina), produciendo biogás en bruto (Lindorfer y Frauz, 2015).

2.1.5 Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia (DA) es un proceso que convierte los desechos orgánicos (aguas residuales y desechos sólidos) en biogás a través de una serie de reacciones biológicas (Xu et al., 2018). El biogás producido a través de digestión anaerobia podría ser valorizado energéticamente en una instalación combinada de calor y energía para la generación simultánea de calor y electricidad (Borja y Rincón, 2017).

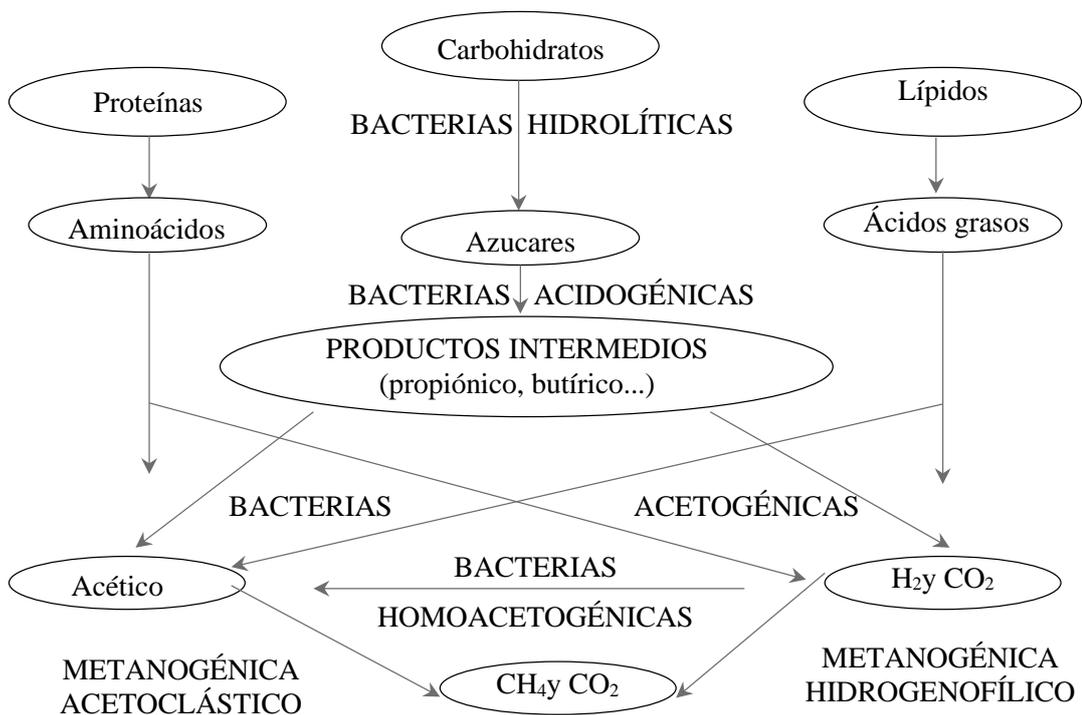
De acuerdo con (Groppelli & Giampaoli (2015), la digestión anaeróbica es un proceso en el cual se producen interacciones tan estrechas que, por ejemplo, la actividad de los organismos metanogénicos influye decididamente sobre los productos de las primeras etapas, el proceso de digestión anaerobia se puede dividir en las siguientes etapas:

- La hidrólisis es una función clave en la degradación de sustratos complejos donde grandes biomoléculas que son bloques de construcción en proteínas, grasas y carbohidratos se reducen a mono u oligómeros que pueden ser absorbidos y digeridos por los microorganismos anaerobios, donde las bacterias que realizan la hidrólisis en DA son comunes y diversas, los phyla Bacteroidetes y Firmicutes (incluidas las especies de Clostridia) cubren la mayoría de ellos (Ometto et al., 2019).
- La acidogénesis donde los oligo y monómeros (azúcares, aminoácidos y lípidos) se fermentan en acetato, dióxido de carbono e hidrógeno, así como otros ácidos y alcoholes orgánicos donde estas transformaciones son generalmente rápidas, lo que puede conducir a la acumulación de ácidos grasos volátiles, los organismos activos en la acidogénesis típicamente pertenecen a los phyla Bacteroidetes, Firmicutes, Chloroflexi y Proteobacteria (Ometto et al., 2019).
- En general, la acetogénesis es la creación de acetato, un derivado del ácido acético, a partir de fuentes de carbono y energía por los acetógenos, por lo tanto los acetógenos catabolizan muchos de los productos creados en la acidogénesis en ácido acético, CO₂ y H₂, que son utilizados por los metanógenos para crear metano (Kirk y Gould, 2020).

- La metanogénesis constituye la etapa final de la digestión anaerobia en la que los metanógenos crean metano a partir de los productos finales de la acetogénesis, así como a partir de algunos de los productos intermedios de la hidrólisis y la acidogénesis (Kirk y Gould, 2020).

Figura 2

Diagrama esquemático del proceso de digestión anaerobia



Nota: Diagrama esquemático de los diferentes pasos involucrados en los procesos de digestión anaeróbica. Tomado de *Biogás Producción* (p.3), por Borja y Rincón, 2017.

Parámetros para la digestión anaerobia. La operación exitosa del proceso de digestión anaerobia (DA) requiere el mantenimiento de factores ambientales y parámetros del proceso dentro de la zona de confort de diversas comunidades microbianas en el sistema DA (Nguyen et al., 2019).

pH. El pH es uno de los parámetros operativos más importantes debido a una amplia gama de pH óptimo de diferentes grupos microbianos en el proceso de

DA, por ejemplo, el pH óptimo para la hidrólisis y la acidogénesis está entre 5.5 y 6.5, mientras que los metanógenos muestran la mayor actividad en el rango de pH de 7.8 a 8.2, el rango de pH neutro de 6.8–7.4 es ideal para el sistema DA de cultivo mixto (Nguyen et al., 2019). Según Uçkun Kiran et al. (2016), debido a la compleja composición de la biomasa, es difícil alcanzar un estado estable durante la DA, debido a las etapas de la DA, la metanogénesis ocurre en el rango de pH entre 6 y 8.5 con un rango de pH óptimo de 7.0 – 8.0, se inhibe dramáticamente cuando el pH disminuye por debajo de 6.0 o aumenta por encima de 8.5.

Temperatura. La temperatura es uno de los parámetros clave que afectan la digestión anaerobia porque influye en el crecimiento microbiano, las actividades enzimáticas, las características del sustrato y, en consecuencia, el rendimiento de metano (Nguyen et al., 2019). Aunque la DA convencional se realiza a temperaturas mesofílicas de 35 - 37 °C (Forster-Carneiro et al., 2008), la DA termofílica tiene las ventajas de una tasa de crecimiento específica más alta, un metabolismo más rápido, una mayor capacidad de carga y, en consecuencia, da como resultado un mayor rendimiento de metano (Kim y Oh, 2011).

Nutrientes. El rendimiento de los digestores alimentados con sustratos deficientes en nutrientes, como materias primas lignocelulósicas, residuos agrícolas, puede mejorarse enormemente mediante la digestión conjunta con sustratos ricos en nutrientes como estiércol animal o desechos de alimentos para ajustar el carbono al nitrógeno (C / N) al rango óptimo de 20-30 (Nguyen et al., 2019). La relación C / N de la materia prima debe estar bien equilibrada, se ha informado que una relación C / N de 20-30 es ideal para la digestión anaerobia (Gómez et al., 2006).

2.1.6 Biorreactores

Debido a la naturaleza altamente sólida de los residuos orgánicos, hay muy pocos sistemas de biodigestores que puedan aplicarse para la digestión anaerobia (Khanal et al., 2019a). Basado en el contenido de sólidos totales en el proceso de digestión, el proceso de DA se divide en digestión húmeda (ST <15%) y digestión seca o estado sólido de DA (ST de 20% a 40%) (Khanal et al., 2019).

El reactor de tanque de agitación continua (RTAC) es, con mucho, el sistema de biorreactor de digestión anaerobia más adoptado para la digestión de residuos orgánicos debido a que los sustratos se alimentan de forma continua o semicontinua y el contenido del reactor se mezcla utilizando un mezclador mecánico y, en algunos casos, mediante la recirculación de biogás, el contenido de sólidos totales puede variar entre el 1% y el 10%, el tiempo de retención hidráulico varía de 20 a 50 días en este biodigestor (Khanal et al., 2019).

El digestor de tapón es un tanque largo y rectangular de hormigón o un tubo de polietileno recubierto de hormigón duro o en el que la mezcla se produce principalmente en dirección lateral y no hay mezcla en dirección longitudinal, por lo cual, el digestor Plug-flow es ideal para materias primas de alto contenido en sólidos totales, como el estiércol de ganado con un contenido de ST de 12% y 15%, operado a 15 a 30 días de tiempo de retención hidráulico (Khanal et al., 2019).

2.1.7 Producción de biogás

El biogás es el producto definitivo de las bacterias que se alimentan de materia prima biodegradable (la etapa de metanogénesis de la digestión anaeróbica es realizada por las arqueas, un microorganismo en una rama claramente diferente del árbol de vida filogenético a las bacterias), y es principalmente metano y dióxido de carbono, con una pequeña cantidad de hidrógeno y rastro de sulfuro de hidrógeno (Bhatia, 2014).

Tabla 2*Componentes principales del biogás*

Componentes	Fórmula molecular	Biogás
Metano	CH ₄	50-75%
Dióxido de carbono	CO ₂	25-50%
Nitrógeno	N ₂	0 (-5%)
Vapor	H ₂ O	2-7%
Amoniaco	NH ₃	<1000ppm
Hidrógeno	H ₂	<10,000ppm
Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	<10,000ppm
Oxígeno	O ₂	0 (-2%)
Otros Componentes		0-100ppm

Nota: Concentraciones usuales de distintos componentes del Biogás. Tomado de *Biogas* por (Bhatia, 2014).

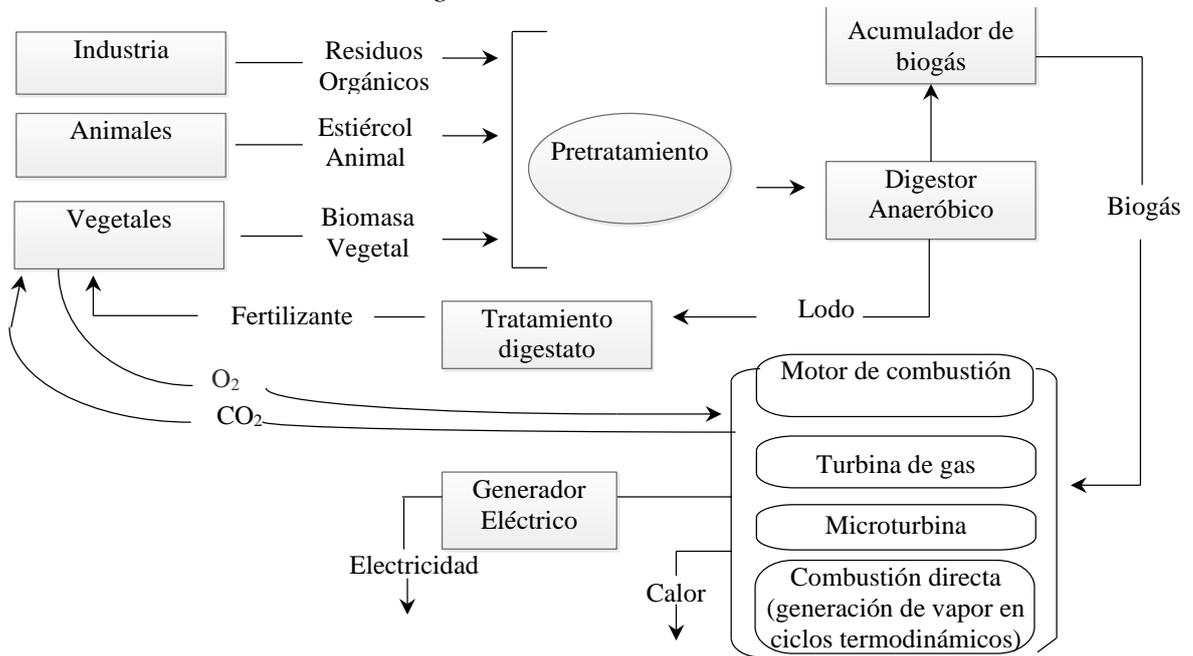
2.1.8 Plantas de biogás

Una planta de biogás es un proyecto sistemático que integra la producción de biogás, la utilización de recursos y el control de la contaminación, la digestión anaerobia de sustancias orgánicas es el núcleo de tales proyectos y técnicas (Liu et al., 2011). Las materias primas para las plantas de biogás se pueden obtener de abundantes recursos, incluidos los desechos agrícolas, los cultivos energéticos, los desechos domésticos y el exceso de lodo, el estiércol del ganado es siempre la principal materia prima para la producción de biogás (Liu et al., 2011).

La unidad de digestión es el corazón de una planta de biogás; aquí es donde tiene lugar la actividad microbiana y la materia orgánica se transforma en biogás, por otro lado, la unidad de digestión se compone de uno o varios digestores, incluidos los sistemas de alimentación, agitación y calentamiento (Bachmann, 2013).

Figura 3

Conversión de la biomasa en biogás



Nota: Ciclo de generación de energía a partir de biomasa. Tomado de *BIOMASS: SOME BASICS AND BIOGAS* (p.3), por Fardin et al., 2018.

Características de la materia prima para producción de biogás.

Idoneidad y disponibilidad. Los sustratos utilizados en la práctica para la producción de biogás se seleccionan en función de su idoneidad y disponibilidad, donde la idoneidad se define por una serie de características y parámetros tales como el contenido de materia orgánica fácilmente digerible, potencial de metano, tamaño de partícula, contenido de materia seca, pH, relación C:N, el contenido de macro y microelementos, etc (Nielsen y Popiel, 2013). La disponibilidad significa que la materia prima es de fácil acceso para los operadores de plantas de biogás y se puede suministrar en cantidades suficientes de forma renovable (Nielsen y Popiel, 2013).

Digestibilidad. La digestibilidad es el principal parámetro de alimentación de digestión anaerobia, con influencia directa en la producción de metano, y se refiere a la capacidad del sustrato para descomponerse a través de la DA, la digestibilidad de cierto material depende de su contenido de compuestos fácilmente digeribles como azúcares simples (Holm-Nielsen & Oleskowicz-Popiel, 2013).

Impurezas. Junto con la materia prima suministrada, varios componentes no deseados pueden suministrarse accidentalmente a la planta de biogás, donde los problemas comunes son la reducción del volumen activo del digestor (causado por la sedimentación de arena en el fondo del digestor), la falla del proceso a través de la formación de espuma, la separación de fases y las capas flotantes, o incluso daños a la maquinaria, como bombas, causadas por impurezas metálicas u otros componentes perturbadores (Holm-Nielsen & Oleskowicz-Popiel, 2013).

2.2 Marco Legal

Para establecer el marco legal en la presente investigación se debe conocer la normativa vigente que establece leyes para el manejo y aprovechamiento sostenible de recursos energéticos, así como también para la producción, generación y transmisión de energía obtenida por fuentes renovables. En este sentido se toma en cuenta la siguiente estructura legal.

2.2.1 Constitución de la República del Ecuador 2018

El desarrollo de la presente investigación está fundamentado en la Constitución Política de la República del Ecuador del año 2018, misma que reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, promoviendo en el sector público y privado, el uso de tecnologías limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto estableciendo que la soberanía energética no se alcanzará en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afectará el derecho al agua. En este marco es el estado quien reserva el derecho de administrar, regular, controlar y gestionar los sectores estratégicos, de conformidad con los principios de sostenibilidad ambiental, precaución, prevención y eficiencia.

Los gobiernos autónomos descentralizados desarrollarán programas de uso racional del agua, y de reducción reciclaje y tratamiento adecuado de desechos sólidos y líquidos. Se incentivará y facilitará el transporte terrestre no motorizado, en especial mediante el establecimiento de ciclo vías. Art.14, Art 15, Art 313, Art 413 y Art 415.

2.2.2 Tratados internacionales

El protocolo de Kioto, un acuerdo internacional legalmente vinculante para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en todo el mundo, entró en funcionamiento el 16 de febrero de 2005. El Protocolo comparte los objetivos, principios e instituciones de la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático (UNFCCC), y la refuerza significativamente a través del compromiso individual y legalmente vinculante de los países desarrollados para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero.

El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) definido en el artículo 12 del Protocolo de Kioto dispone para los países desarrollados la posibilidad de realizar proyectos que reduzcan emisiones en otros países menos favorecidos, a cambio de Reducciones Certificadas de Emisiones (RCEs). Estos RCEs generados en este tipo de proyectos pueden ser usados para ayudar a los países desarrollados a alcanzar sus objetivos en el Protocolo de Kioto. El artículo 12 también remarca que estos proyectos son para asistir a los países más desfavorecidos a alcanzar un desarrollo sostenible y contribuir así al objetivo último de la UNFCCC (ONU, 1998).

2.2.3 Código Orgánico del Ambiente

El Código Orgánico del ambiente en sus artículos 5 y 8 considera el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías alternativas no contaminantes, renovables, diversificadas y de bajo impacto ambiental, además Mejor tecnología disponible y mejores prácticas ambientales.

2.2.4 Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica

El objetivo 5 del artículo 2 de la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica, dictamina desarrollar mecanismos de promoción por parte del Estado, que incentiven el aprovechamiento técnico y económico de recursos energéticos, con énfasis en las fuentes renovables. La promoción de la biomasa tendrá preminencia en la de origen de residuos sólidos.

Capítulo III

Metodología

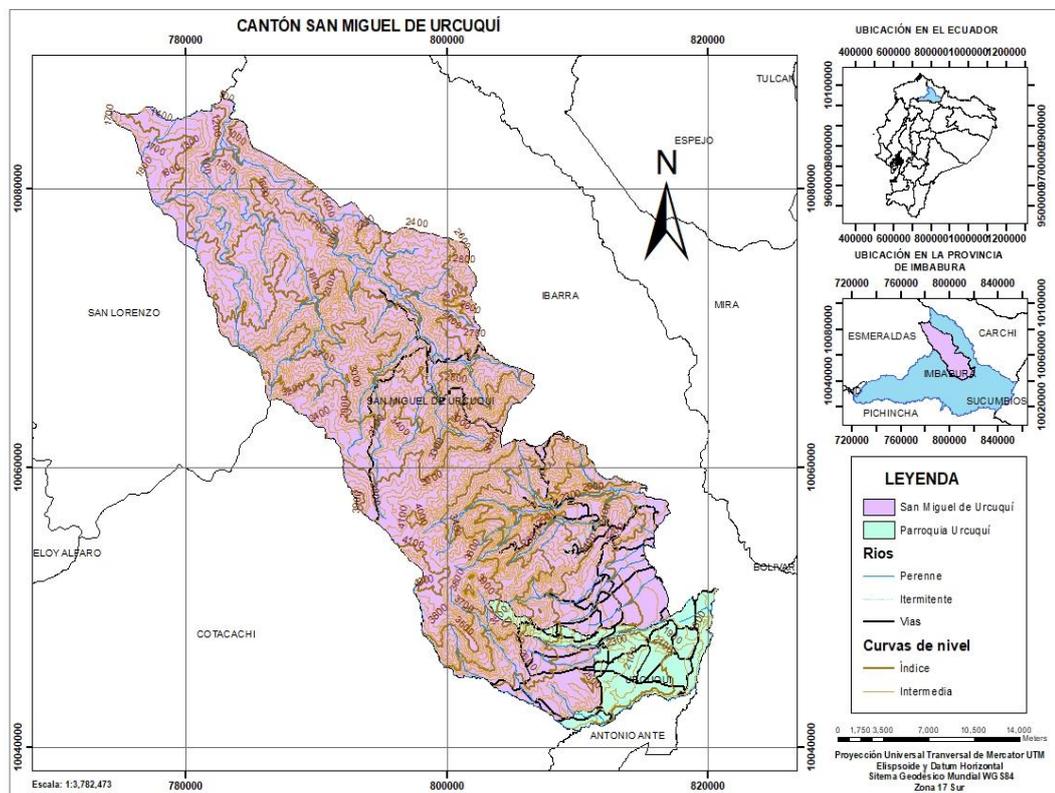
A continuación, se detalla los procesos que se llevaron a cabo para cumplir con los objetivos propuestos, así como también el uso de materiales y equipos que se emplearon durante el desarrollo de la investigación.

3.1 Área de Estudio

El Cantón Urcuquí se encuentra ubicado al noroccidente de la provincia de Imbabura a 20 km de la capital provincial Ibarra y 152 km de la capital ecuatoriana Quito, con una superficie territorial de 757 km²; Urcuquí tiene como coordenadas geográficas de latitud norte 0° 25' 13" y longitud oeste 78° 11' 50", su temperatura promedio oscila entre 14 °C a 19 °C, y se encuentra a 2 320 msnm; Urcuquí limita al este y al norte con el cantón Ibarra, al sur y suroeste con los cantones Antonio Ante y Cotacachi y al oeste con la provincia de Esmeraldas. De acuerdo con su topografía, se encuentra entre 1600 msnm y 3180 msnm (GAD Urcuquí, 2014).

Figura 4

Área de estudio



Nota: Mapa base del cantón Urcuquí realizado en el programa ArcGIS.

3.2 Métodos

Acorde con las características del tema de investigación, sus objetivos, la pregunta directriz, se seleccionaron los procesos y técnicas metodológicas que se describen a continuación.

3.2.1 Caracterización de residuos orgánicos municipales del Cantón Urcuquí

Como Sakurai (2000) lo menciona, al aplicar una metodología en la caracterización “es esencial conocer la cantidad de basura a recoger y disponer, y sus características tales como densidad, composición, humedad y potencial energético, con el objetivo de diseñar técnicamente los sistemas de recolección, transporte y disposición final de la misma” (p.1).

Modelo estadístico para muestreo de residuos orgánicos. Partir con un número fiable de experimentos es primordial al empezar la caracterización de RSM orgánicos, debido a que no se puede establecer una población (peso total de RSM orgánicos) en una investigación de campo se puede estimar el número de experimentos proponiendo un error admisible del 6% y un nivel de confianza del 99%, como lo establece Cabrera & Jaramillo (1995) en la ecuación (1). En la fase de campo existe una alta probabilidad de que se pueda ingresar al relleno sanitario, por lo que se valora con 80% a la probabilidad de éxito (p) y un 20% de probabilidad de fracaso (q).

$$n = \frac{\sigma * Z^2}{E^2} \quad (1)$$

Donde:

n: número de muestras

σ : varianza = p*q

Z: nivel de confianza deseado = 99%

E: límite aceptable de error muestral = 6%

Método de cuarteo, peso volumétrico y caracterización de subproductos. El muestreo y toma de datos se realiza en función de las rutas de los camiones recolectores de RSM orgánicos los días que estos llegan al relleno sanitario son; ruta 1, lunes, miércoles y viernes; ruta 2, lunes y viernes, todas las rutas llegan al relleno sanitario los días indicados en horarios de la tarde (GAD Urququí, 2018). Con el fin de tomar muestras de las dos rutas la fase de campo se realizó martes, jueves y sábado.

Bioseguridad normas de protección. Es importante tomar en cuenta que la caracterización de residuos orgánicos es un proceso que involucra el contacto y manipulación de residuos que pueden ser tóxicos, por tanto, acatar mediadas de bioseguridad es responsabilidad de los investigadores. Las normas establecidas por el Ministerio de Salud Pública del Ecuador (MSP) son:

- ✓ Protegerse mediante vacunas contra tétanos y hepatitis B.
- ✓ Trabajar con equipo de protección: mandil o terno de 2 piezas, gorro o casco, mascarilla, guantes, botas.
- ✓ No comer, beber, fumar o maquillarse durante el trabajo.
- ✓ En caso de corte o microtraumatismo, lavar la herida con agua y jabón y acudir al médico de emergencia.
- ✓ Lavar y desinfectar el equipo de protección personal.
- ✓ Tomar un baño de ducha una vez terminada la jornada diaria.
- ✓ Acudir inmediatamente a urgencias en caso de exposición a desechos.

Prueba de densidad. Para determinar la densidad de la basura se aplica la metodología descrita en la norma NMX-AA019-1985 del peso volumétrico “in situ”:

1. Se prepara un tambor de alrededor de 100 litros que servirá para el muestreo y una balanza de pie.
2. Se pesa el tambor y se mide su volumen.
3. Se pone la basura en el tambor sin hacer presión y se remece de manera que se llenen los espacios vacíos en el mismo.
4. Se pesa una vez lleno y por diferencia se obtiene el peso de la basura.
5. Se obtiene la densidad de la basura al dividir su peso en kilogramos entre el volumen del tambor en metros cúbicos.

$$\text{Densidad de la basura } D(\text{kg/m}^3) = \frac{\text{Peso de la basura en kg}}{\text{Volumen del tambor en m}^3} \quad (2)$$

Método de cuarteo. Para evaluar la composición de residuos sólidos que ingresan al relleno se procede con el método de cuarteo aplicando la norma NMX-AA-015-1985, que consiste en tomar una muestra proveniente de los residuos orgánicos y verterla formando una esfera grande, de esta se extraen dos cuartos, se realiza otra circunferencia similar a la anterior de la cual se extraen otros dos cuartos y así las veces que sea necesario hasta obtener una muestra manejable (Rendón, 2012). Con las porciones opuestas (A y C) se determina el peso volumétrico y se

extrae una muestra para análisis y la clasificación de subproductos se realiza con las porciones (B y D) (NMX-AA-015-1985).

Cuantificación de subproductos. Con los lotes A y B productos del cuarteo se procede a clasificar y cuantificar los residuos de acuerdo con la norma NMX-AA-022-1985 que cuantifica en peso los diferentes componentes de los residuos sólidos en este caso se clasifica en 5 tipos de residuos; residuos de frutas, residuos de huerta, residuos de comida, residuos amiláceos y otros. La suma de los residuos da la totalidad de la muestra ecuación (3) y el peso de cada fracción de residuos dará como resultado el porcentaje por tipo de residuo ecuación (4).

$$WT = \sum_{i=1}^{\infty} Wi \quad (3)$$

$$\%i = \frac{Wi}{WT} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

WT= Peso total de la muestra

Wi= Equivalente al peso de cada tipo de residuo

%i= Porcentaje en peso de cada fracción de residuos en la muestra.

Figura 5

a) Peso volumétrico, b) Método de cuarteo, c) Clasificación de residuos



Nota: Se muestra el método del cuarteo, también los recipientes y equipo utilizado para obtener el peso volumétrico, además las medidas de seguridad como son: guantes, mascarilla y un overol.

Preparación de la muestra para deshidratación por el método de estufa.

Antes de que la muestra de residuos orgánicos sea enviada al laboratorio para el análisis elemental, se debe pretratarla mediante el proceso de reducción de diámetro, secado y triturado.

Se obtuvo dos lotes de cada muestra y se determinó que cada muestra debe pesar 500 g como base para calcular el porcentaje de humedad perdida al final del proceso de secado por el método de estufa.

Figura 6

Balanza Analógica



Nota: Pesaje de residuos sólidos orgánicos reducidos a un tamaño de 2cm.

Deshidratación de RSO por el método de estufa. Antes de introducir los 500 g de muestra, se programa la estufa a una temperatura de 140 °C. Cuando la estufa alcanzó la temperatura deseada, se introdujo la muestra y en periodos de 45 minutos se pesa la caja con la muestra y se determina el porcentaje de humedad perdida, se repitió esta actividad hasta conseguir peso constante, es decir, cuando entre dos pesajes consecutivos la diferencia es menor al 0.01% (NMX-AA-016-1985).

Figura 7

Estufa marca memmert



Nota: Equipo utilizado para deshidratar la muestra.

Preparación de muestras para análisis elemental. El análisis elemental es una técnica instrumental utilizada para la determinación de los porcentajes de carbono, hidrógeno, nitrógeno, fósforo, potasio, en muestras en estado sólido de diferente naturaleza (orgánica e inorgánica). La preparación de muestras de residuos sólidos orgánicos (RSO) se realizó de acuerdo con los requerimientos del personal del laboratorio de la Universidad Central del Ecuador, para lo cual se realizó el triturado y tamizado en una trituradora de cuchillas marca FRITCH, el tamizado se realizó con una malla de 0.5 mm y se obtuvo un total de 80 g por muestra, de los cuales 60 g fueron destinados para el análisis elemental.

Figura 8

Trituración



Nota: Trituración de la muestra y pesaje en una balanza digital de precisión.

3.2.2 *Cuantificación del biogás producido mediante digestión anaeróbica de los residuos orgánicos municipales*

Los métodos de cuantificación de los gases producidos en la digestión anaerobia pueden ser volumétricos o manométricos, en este tipo de ensayos es importante que se mida la concentración de dichos gases (Cleves et al., 2016).

Diseño experimental. En el diseño experimental que es de un factor, se realizaron tres experimentos manteniendo constante la cantidad de sustrato, temperatura y a un pH neutro, el inóculo es el único factor influyente sobre la variable respuesta.

Para definir el experimento se diseña 3 biodigestores tipo Batch a escala laboratorio, las proporciones de mezcla son; en el biodigestor N°1 se introduce sustrato + pull de bacterias comerciales con una relación sustrato inóculo (S/I 200); en el biodigestor N°2 se introduce sustrato + estiércol de vaca (S/I 2.2) y en el biodigestor N°3 se introduce sustrato únicamente.

Biodigestor Batch construcción y funcionamiento. Un biorreactor batch es aquel en el que la alimentación se realiza a intervalos. Los reactantes se introducen al inicio del experimento donde permanecen de manera hermética durante el tiempo necesario hasta completar la digestión en ausencia de oxígeno, los productos se retiran al finalizar el experimento. Este proceso se cumple en dos etapas. Primero la proliferación bacteriana y luego la producción de biogás.

El diseño y construcción del biodigestor tipo batch se plasma en un prototipo de prueba para la elección de materiales que garanticen la hermeticidad y correcto funcionamiento. El reactor prototipo es un volumen de control que se compone del sistema de entrada de materia prima, el sistema de monitoreo de parámetros como la temperatura y salida de biogás.

En la construcción del reactor batch (Figura 9) se empleó un recipiente de polietileno de 6 litros que funciona como biorreactor, luego el gas es conducido por medio de una manguera hasta un recipiente de 500 ml invertida que contiene 300 ml de hidróxido de potasio al 5% (KOH) el cual cumple la función de absorber el CO₂. La presión de biogás producido tendrá una interacción sobre el hidróxido de potasio contenido en el recipiente de almacenamiento que desplazará al KOH en una pipeta graduada de 50 ml, de esta manera se puede cuantificar el metano producido.

Figura 9

Construcción del biodigestor



Nota: Construcción del biodigestor y sistema de medición y monitoreo de biogás.

Monitoreo de pH. Para un funcionamiento óptimo, el valor pH de la muestra debe mantenerse en un rango entre 6.5 a 7.5 (Hernández, 2012), esto es neutral a ligeramente alcalino, un pH mayor a 8 indicará una acumulación excesiva de compuestos alcalinos, un pH menor a 6 indica una descompensación entre la fase acidogénica y metanogénica pudiéndose en consecuencia bloquear esta última (Groppelli & Giampaoli, 2015).

Figura 10

Tiras reactivas para medir pH



Monitoreo de temperatura. Los comportamientos de las bacterias dentro del biodigestor están dictados por la temperatura de la mezcla, el proceso se lleva a cabo satisfactoriamente en un rango de 10 °C a 37 °C para la flora bacteriana mesofílica (Groppelli & Giampaoli, 2015).

Se utilizó un sensor de temperatura de salida lineal resistente en ambientes líquidos sin presentar fallos ya que tiene recubrimiento de acero inoxidable, el modelo es (Figura 11) Pt100 3 Hilos -50a300 °C M8 5 cm De Bulbo Sensor Temperatura.

Figura 11

Sensor de temperatura Pt100

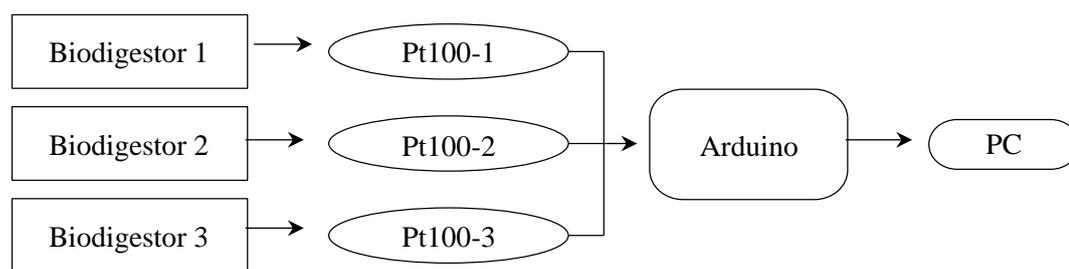


Agitación. Para un proceso mesofílico del reactor batch la remoción de la materia orgánica requiere que sea leve y es suficiente un movimiento intermitente realizado con algún elemento mecánico.

Instrumentación electrónica del biodigestor. La instrumentación del biodigestor consiste en sensores de temperatura (Pt100) introducidos en contacto con la materia orgánica que envían datos a un Arduino y este se conecta a la computadora, donde se observa los valores de temperatura en tiempo real, la temperatura que se mantiene en el biodigestor es de 32 °C constante y el pH se lo controla mediante cintas paramétricas de pH, es decir se realiza las mediciones al inicio y final de la digestión, el pH de inicio es de 7.0.

Figura 12

Monitoreo de temperatura



Nota: En este sistema se utilizó 3 sensores Pt100 y un Arduino que envía la información a la PC.

Generación de biogás a partir de RSO con inóculo comercial. En este experimento se utilizó 4 500 ml de mezcla para trabajar, de los cuales el 22.2% (1 000ml) son residuos orgánicos, el 77.7% (3 945ml) es agua debido a que si el alimento principal son residuos vegetales la relación materia orgánica/agua debe ser 1:3 (Hernández, 2012), el inóculo que se utilizó representa el 0.1% (5 ml) de inóculo comercial un biofertilizante que contiene microorganismos muy importantes degradadores de la materia orgánica presente en el suelo tabla 3 (residuos de cosecha, materiales en descomposición, etc.).

Tabla 3*Composición del inóculo comercial*

Composición	
Azospirillum brasilense	Cincuenta y seis millones *
Azospirillum lipoferum	Cincuenta y seis millones *
Lactobacillus Acidophilus	Ciento cuarenta millones *
Bacillus subtilis	Cien millones *
Bacillus lincheniformis	Cien millones *
Bacillus micoides	Cien millones *
Pseudomona fluorescens	Cincuenta millones *
Pseudomona putida	Cincuenta millones *
Sacharomyces cerevisae	Ciento cuarenta mil *
Ingredientes aditivos: c.s.p	1 litro
pH en solución al 10%	6.0

Nota: Hoja técnica del inóculo comercial con microorganismos del suelo, por IBO, (s.f)

Generación de biogás a partir de RSO con inóculo estiércol de vaca. En el experimento 2 se utilizó 4 500 ml de mezcla para trabajar, de los cuales el 22.2% (1 000 ml) son residuos orgánicos y el 67.8% (3 050 ml) es agua, el inóculo utilizado es extraído de un biodigestor con estiércol de ganado que se obtuvo en el estadio de la Universidad Técnica del Norte, la proporción de inóculo que utilizado es de 10% (450 ml). La composición del estiércol se muestra en la tabla 4.

Tabla 4*Composición del estiércol de ganado*

Fuente	Tipo	Sustancia orgánica	N%	P ₂ O ₅ %	K ₂ O %
Bovino	Líquido	5	1.0	0.1	1.6
Bovino	Sólido	8	0.4	0.2	0.1
Bovino	Mezcla	10	0.6	0.2	0.1

Generación de biogás a partir de RSO. En el experimento 3 se utilizó 4 500ml de mezcla para trabajar, de los cuales el 22.2% (1 000 ml) son residuos orgánicos y 77.8% (3 500 ml) es agua, en este experimento no se utiliza ningún tipo de inóculo, debido a que es la muestra testigo.

3.2.3 Experimentación

La experimentación se la realiza con las condiciones que se muestra en la tabla 5, se ejecuta 3 experimentos con periodos de duración de 1 mes cada uno, es decir, un tiempo total de experimentación de 3 meses, esto se realiza para validar los datos de producción de biogás estadísticamente.

Tabla 5

Datos para la experimentación

Variable	Experimentos		
	1(S/I 200)	2(S/I 2.2)	3
Mezcla (ml)	4 500	4 500	4 500
Agua (ml)	3 945	3 050	3 500
Materia orgánica (ml)	1 000	1 000	1 000
Inóculo (ml)	5 (inóculo comercial)	450 (estiércol-vaca)	-
Temperatura (°C)	32	32	32
pH	7.0	7.0	7.0

Medición y cuantificación de biogás. La duración del ensayo dependerá de la biodegradabilidad del sustrato y de la temperatura a la que está sometido, por lo tanto, no es posible establecer un periodo fijo; sin embargo, se reporta que aproximadamente a los 30 días inicia la fase de estabilización de la producción de CH₄ (Labatut et al., 2010) y aproximadamente el 90% de la producción teórica se genera entre 30 y 60 días.

Para determinar la capacidad de biodegradabilidad metanogénica se midió el volumen de solución desplazado en la probeta durante el tiempo de retención, por lo general la lectura de volumen se realiza dos veces por día. Estos valores servirán para remplazarlos en la ecuación modificada de Gompertz (5), esta

ecuación ha sido ampliamente utilizada por varios autores para modelar la producción de biogás y/o metano de diferentes sustratos (Luisina et al., 2018).

$$M_t = P * \exp\left(-\exp\left(\frac{R_m}{P_m}\right)(\lambda - t) * e^1 + 1\right) \quad (5)$$

Donde:

P_m : Producción acumulada de CH₄ (ml) en función de un tiempo t.

t: Tiempo de retención.

M_t : Producción acumulada máxima de CH₄ (ml).

R_m : Tasa de producción máxima o velocidad de producción máxima de CH₄ (ml/día).

λ : Tiempo de la fase de latencia para comenzar la evolución de CH₄ (día).

e: Constante de Euler (2.71828).

Análisis estadístico. Se presenta información experimental orientativa, que permite establecer el modelo estadístico en función de los factores que intervienen en el proceso de biodigestión anaeróbica, los dos factores principales son; Factor 1, el biodigestor, que es el factor constante en este caso un reactor Batch; Factor 2, el inóculo o bacterias fermentativas, variable que se usa durante el proceso de digestión en el bloque experimental B2. La variable respuesta será en volumen de biogás obtenido en los dos bloques experimentales, los datos se validan mediante una t-student.

T-student. En probabilidad y estadística, la distribución t-student es una distribución de probabilidad que estima la media de una población normalmente distribuida cuando el tamaño de la muestra es pequeño. Las muestras para experimentación de biodigestión son 3 por tanto el método t-student es adecuado. Cuando la varianza poblacional no es conocida, sabemos que la podemos estimar con la varianza muestral, siendo la distribución de la estadística de prueba una t-student, con grados de libertad n-1.

Tabla 6*Componentes de prueba de hipótesis*

Hipótesis			
Nula	$H_0 = \mu = \mu_0$		
Alternativa	$H_1: \mu < \mu_0$	$H_1: \mu > \mu_0$	$H_1: \mu \neq \mu_0$
Estadística de Prueba	$T = \frac{\hat{\mu} - \mu_0}{S/\sqrt{n}}$		
R. Rechazo	$\{T: T < t_{n-1, \alpha}\}$	$\{T: T > t_{n-1, 1-\alpha}\}$	$\{T: T > t_{n-1, 1-\alpha/2}\}$

Nota: Prueba de hipótesis, por Rohen, 2012.

3.2.4 Metodología para determinar el potencial energético de la muestra de residuos orgánicos municipales del cantón Urucuquí

De acuerdo con los estudios realizados en el DIAGNÓSTICO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS NO PELIGROSOS 2018, en Urucuquí, la producción per cápita de residuos sólidos fue de 0.63 kg/hab/día cuando el número de habitantes era de 16 974 y se tuvo una producción de residuos sólidos de 10.6 t/día. En la actualidad según la proyección de población al 2020 en base al Censo de Población y Vivienda 2010, el número de habitantes en el cantón San Miguel de Urucuquí es de 17 540 habitantes, tomando en cuenta la producción per cápita de residuos sólidos y realizando los respectivos cálculos se obtiene que la producción de residuos sólidos es de 11 050.2 kg/hab/día o 11.05 t/día de los cuales el 40.3% son residuos orgánicos que representa 4.45 t/día.

Para la producción de metano se tomará en cuenta los porcentajes correspondientes a desechos de huerta, residuos amiláceos, desechos de fruta y residuos de comida ya que son los residuos que mayor cantidad de biogás genera por cada kg de sólido fresco, es decir el 88.7% de residuos orgánicos será destinado a la producción de biogás (CH₄) de ahí se tiene el total de residuos orgánicos disponibles igual a 3.9 t/día, al año se produciría 1 440.71 t.

Una vez obtenida la materia orgánica disponible podemos calcular la cantidad de biogás que se producirá anualmente, a partir de la materia orgánica inicial y su respectiva producción de biogás mediante la siguiente ecuación:

$$M_w(m^3) = \frac{M_i(m^3) * RO_d}{RO_o} \quad (6)$$

Donde:

$M_w(m^3)$: m³ de biogás.

$M_i(m^3)$: Producción inicial de biogás m³.

RO_d : Materia orgánica disponible.

RO_o : Materia orgánica inicial.

Valoración energética del biogás resultante. Revisando literatura publicada por (Velasco, 2009), el contenido energético del biogás depende de la proporción que contenga de CO₂ y CH₄. El contenido energético del metano puro es 38 MJm⁻³ a condiciones normales de presión y temperatura y el del CO₂ nulo, si el biogás contiene un volumen V% de metano, el contenido energético del biogás valdrá: 38×(V/100) MJm⁻³, de modo que si V fuera 50%, entonces el contenido energético del biogás sería:

$$38 \times (50/100) = 19 \text{ MJm}^{-3}.$$

Con la siguiente ecuación es posible calcular la cantidad de energía que se puede obtener con la totalidad de biogás que produce con toda la materia orgánica disponible y su respectivo inóculo.

$$E_w(MJ) = \frac{M_w(m^3) \times C_e(MJ)}{1m^3 \text{ de biogás}} \quad (7)$$

Donde:

$E_w(MJ)$: Cantidad de energía (MJ).

$M_w(m^3)$: m³ de biogás producido.

C_e : Contenido energético del metano.

Cantidad de energía eléctrica que se puede obtener. Usando el factor de conversión 1 MJ = 0.2778 kwh se determina la cantidad de energía eléctrica que se puede producir mediante el biogás (metano) obtenido de la biodigestión anaeróbica de los residuos orgánicos mediante la ecuación (8).

$$EEw(kwh) = Ew(MJ) \times \frac{0.2778 \text{ kwh}}{1MJ} \quad (8)$$

Donde:

$EEw(kwh)$: Cantidad de energía eléctrica

La ecuación (9) evalúa la capacidad de generación de energía eléctrica, asumiendo eficiencias de captura del sistema de generación de biogás y de conversión de energía térmica a eléctrica, donde η_c es la eficiencia de captura de biogás asumiendo un 85%, η la eficiencia de la conversión de energía térmica a eléctrica (30%) y f_{cap} , factor de capacidad que representa la disponibilidad total del sistema (90%). La ecuación queda de la siguiente manera:

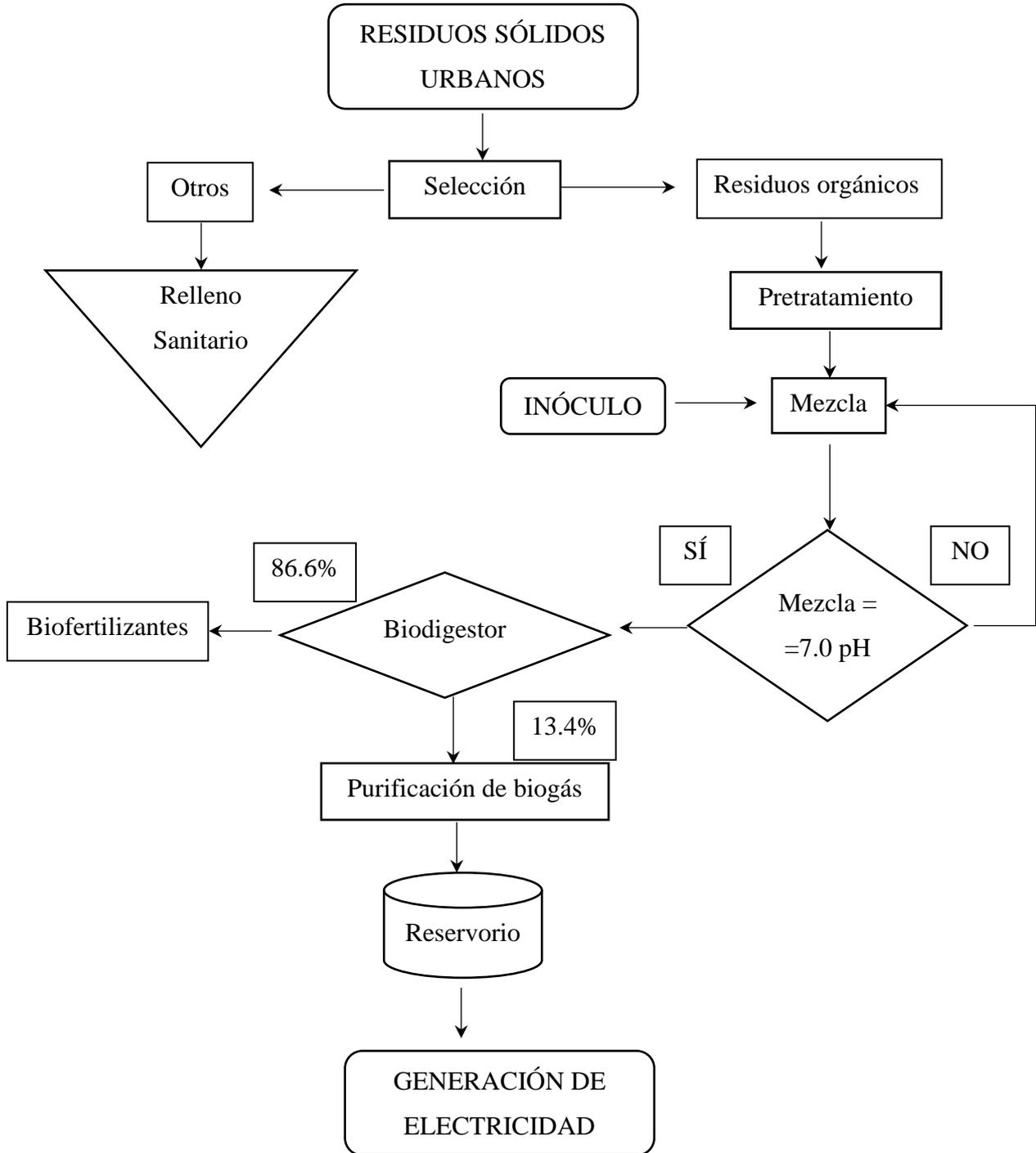
$$EE = EE_{año} * \eta_c * \eta * f_{cap} \quad (9)$$

3.2.5 Análisis de la viabilidad económica en función del diagrama de proceso de la planta de biogás

El análisis de viabilidad económica comprende el layout de la planta de biogás, dimensionamiento del biodigestor, selección de equipos complementarios y análisis económico.

Figura 13

Diagrama de procesos de la planta de biogás



Parámetros iniciales para el dimensionamiento del biodigestor. El dimensionamiento del biodigestor se realiza con los datos obtenidos en la experimentación, y con los datos reales de residuos orgánicos disponibles en el relleno sanitario del cantón Urcuquí, mediante ecuaciones de diseño recopiladas de Chiriboga, (2010). En la tabla 7 se presenta los parámetros de cálculo para el dimensionamiento.

Tabla 7

Parámetros de cálculo

Parámetro	Abreviación	Valor	Unidades
Flujo másico de residuos orgánicos	m _o	3947.0	kg/día
Flujo másico de estiércol	m _e	1776.2	kg/día
Sólidos totales de residuos orgánicos	ST	0.3	g/g de muestra original
Tiempo de latencia	λ	10.0	días
Carga orgánica suministrada	Co	57.3	kgST/m ³
Densidad de residuos orgánicos	ρ _o	222.2	kg/m ³
Densidad de estiércol	ρ _e	1000.0	kg/m ³
Densidad mezcla	ρ _m	1000.0	kg/m ³

Se empieza calculando el flujo másico de sólidos totales que ingresa al reactor mediante la ecuación (10).

$$\dot{m}_{ST} = \dot{m}_o * Co_{ST} * \frac{1}{\rho_m} \quad (10)$$

Donde:

Co_{ST} = Concentración de sólidos totales (kgSTm⁻³)

El volumen mínimo de reacción en el biodigestor se calcula con el factor anteriormente calculado y se interpreta con la ecuación (11).

$$V_{reac} = \frac{\dot{m}_{ST}}{Co_{ST}} \quad (11)$$

Se calcula el caudal mínimo diario con la ecuación (12).

$$Q_{min} = \frac{V_{reac}}{\lambda} \quad (12)$$

El caudal mínimo de agua que debe ingresar al biodigestor se calcula con la ecuación 13.

$$Q_{minH2O} = V_{A/R} - V_{reac} \quad (13)$$

Donde:

$V_{A/R}$ = Volumen de la mezcla reactiva (m³/día)

Para poder operar, un biodigestor industrial necesita que el valor del porcentaje de sólidos totales sea igual o menor al 5%, este valor se determina de la siguiente manera.

$$\%ST = \frac{\dot{m} ST}{V_{mezcla total}} * 100 \quad (14)$$

Balance de masa y energía. El cálculo de balances se realiza a partir del flujo de entrada de materia prima y sirve para dimensionar las etapas de pretratamiento, el reactor anaerobio y los equipos de agitación que intervienen en cada etapa. Los parámetros necesarios se calculan de la siguiente manera:

Se inicia con el cálculo de porcentaje de sólidos totales de la materia orgánica

$$\%ST = \frac{\dot{m} ST}{\dot{m} o} \quad (15)$$

Posteriormente se calcula el porcentaje de sólidos totales que ingresaran al biodigestor el mismo que se reduce debido a la mezcla con agua.

$$\%ST_{bio} = \frac{\dot{m} ST}{\dot{m} o + \dot{m} H2O} \quad (16)$$

El volumen real del reactor resulta de la suma de los flujos másicos como se muestra en la ecuación (17).

$$V_{real} = \left(Q_{minH_2O} + V_{\frac{A}{R}} \right) + \left(0.2 * \left(Q_{minH_2O} + V_{\frac{A}{R}} \right) \right) + \left(0.25 * \left(Q_{minH_2O} + V_{\frac{A}{R}} \right) \right) \quad (17)$$

El caudal de alimentación se calcula con la ecuación (18).

$$Q_{bio} = \frac{V_{Real}}{\lambda} \quad (18)$$

Para el balance de energía se define un espacio de control basado en el diseño de un intercambiador de calor para un biorreactor a escala realizado por (Montesinos, s/f). El balance de energía general está dado por la ecuación (19) donde se desea obtener el calor que se requiere para mantener el sistema con un balance de energía igual a cero.

$$0 = Q_{Elevación} + Q_{reacción} + Q_{pérdidas} + Q_{bombas} \quad (19)$$

El calor necesario para elevar la temperatura que ingresa al reactor es producto entre el caudal Q_{bio} , la densidad ρ_m , la capacidad calorífica del biol $C_p = 4187 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ y la diferencia de temperaturas ($T_e = 17 \text{ }^\circ\text{C}$ y $T_s = 35 \text{ }^\circ\text{C}$)

$$Q_{Elevación} = Q_{bio} * \rho_m * C_p * T_e \quad (20)$$

La reacción que se lleva a cabo en el reactor es una reacción exotérmica, la misma que brinda un aporte de calor que se puede determinar con la siguiente ecuación.

$$Q_r = r(-\Delta H_r)Q_{bio} \quad (21)$$

Donde r es la velocidad de reacción ($1 \text{ mol/m}^3\cdot\text{s}$), ΔH_r es la entalpía de reacción equivalente a -145 (J/mol) .

Para el cálculo de las pérdidas de energía en el digestor es necesario calcular el coeficiente global de transferencia de calor del tanque. El espesor del tanque de hormigón armado puede ser calculado según, Comité ACI. (2001)

$$e = \frac{C * E_s + f_s - n f_c}{12 * f_c * f_s} * T \quad (22)$$

Donde e es el espesor del tanque en (in), C es el coeficiente de contracción igual a 0.0003, E_s es el módulo de elasticidad del acero igual a 29 000 000 (psi), f_s es el esfuerzo permisible en el acero igual a 18 000 (psi), f_c es el esfuerzo permisible en el concreto igual a 400 (psi) que en este caso se define como el 10% del esfuerzo de compresión (f_c ') descrito en la norma ACI 350, n es el cociente entre las elasticidades E_s y E_c igual a 8 y T es la tensión en el anillo de concreto del tanque en (lb/in), Comité ACI. (2001)

El anillo de tensión del taque se puede estimar de la siguiente manera

$$T = \frac{P * D_{digest}}{2} \quad (23)$$

Donde P es la relación entre la densidad del residuo, la altura del líquido en el digestor y la gravedad.

Para calcular el coeficiente global de transferencia de calor se utiliza la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{U_{Digest}} = \frac{1}{\frac{D_{ext-digest}}{D_{digest}} * \frac{1}{h_0} + \frac{D_{ext-digest}}{k_h} * \ln\left(\frac{D_{digest} + e}{D_{digest}}\right) + \frac{D_{ext-digest}}{k_p} * \ln\left(\frac{D_{digest} + e}{D_{digest}}\right) + \frac{1}{h_\infty}} \quad (24)$$

Donde h_0 es el coeficiente de transferencia de calor por convección dentro del tanque en (W/m² K), $D_{ext-digest}$ es el diámetro externo del digestor en (m), k_h la conductividad térmica del hormigón igual a 1.63 (W/m K) (OVACEN, 2014), k_p la conductividad térmica del poliestireno igual a 0.04 (W/m K) (IVE, 2014) y h_∞ el coeficiente de transferencia de calor por convección en el exterior del tanque en (W/m² K)

Para la estimación de h_∞ y h_0 es necesario el uso de correlaciones con números adimensionales. Para h_0 , la correlación del número de Nusselt es para un tanque agitado y se describe como:

$$Nu_0 = h_0 \frac{D_{digest}}{k_{res}} = 0.36 * \left(\frac{D_{digest}^2 * N_{mix} * \rho m}{\mu} \right)^{\frac{2}{3}} * (Pr)^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (25)$$

Donde el término con la potencia de valor 2/3 es el número de Reynolds modificado, Pr es el número de Prandtl, μ la viscosidad del fluido en el seno de la placa, μ_w la viscosidad en la pared las que se suponen iguales. Además, se asume que el residuo posee propiedades físicas similares a las del agua las que no cambiarían de sobremanera en este rango de temperaturas. Luego μ , la viscosidad del residuo es igual a 0.000798 kg/m s a 30 °C, Cp (su capacidad calorífica) es de 3.99 [kJ/kg K] k_{res} y su conductividad térmica igual a 0.66 W/m K, (Young, 1992).

Para calcular el número de Prandtl se utiliza la ecuación (26):

$$Pr = \frac{Cp * \mu}{k_{res}} \quad (26)$$

El cálculo del coeficiente de transferencia por convección del lado del residuo se determina de la siguiente manera:

$$h_0 = \frac{Nu_0 * k_{res}}{D_{digest}} \quad (27)$$

En cuanto al coeficiente de transferencia de calor por convección en el exterior del tanque se utiliza la correlación para flujo al exterior de un cilindro, ya que existe convección forzada de aire (se asume velocidad de aire = 2 m/s), de manera que Nusselt se calcula como:

$$Nu_{\infty} = 0.027 * Re^{0.0805} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad (28)$$

Donde el número de Reynolds es igual a:

$$Re = \frac{D_{ext-digest} * \rho_{aire} * v_{aire}}{\mu_{aire}} \quad (29)$$

Entonces, h_{∞} se calcula:

$$h_{\infty} = \frac{Nu_{\infty} * k_{res}}{D_{ext-digest}} \quad (30)$$

Luego reemplazando datos las pérdidas de calor en el digestor están dadas por la siguiente ecuación:

$$Q_{pérdidas} = U_{Digest} * A_{Tdigest} * (\Delta T) \quad (31)$$

Descripción de etapas de la planta de biogás.

Materia prima. Los residuos orgánicos municipales que llegan al relleno sanitario del Cantón Urcuquí pasan por un método de selección, donde se remueve objetos plásticos, cartón, vidrio, etc.

Almacenamiento y pretratamiento. Previo al ingreso al reactor, la materia prima es almacenada en un tanque cuyas dimensiones dependen del flujo de entrada su respectiva densidad y un tiempo de autonomía de dos días que garantice la operación del biodigestor frente a cualquier falla que se presente en la disposición de la materia prima. El tanque se dimensiona con la ecuación (32).

$$V_{tnk} = \frac{\dot{m}_o}{\rho_o} * \tau \quad (32)$$

Donde:

V_{tnk} : Volumen del tanque de almacenamiento (m³)

τ : tiempo de autonomía (2 días)

Por otra parte, como el contenido de sólidos totales en la materia orgánica supera el 10% es correcto admitir que en la fase de pretratamiento se pueda incluir un molino de martillos, esta etapa busca obtener una mejor disponibilidad de sustrato antes de ingresar al reactor.

Mezcla. El siguiente paso es la mezcla con el inoculo (estiércol de ganado), residuo orgánico y agua de río. La razón de mezcla se la determina en base a literatura y a la experimentación obtenida en los reactores discontinuos. Una vez obtenida la mezcla se controla el pH, que es el parámetro más importante para obtener una buena digestión anaerobia, el pH debe ser neutro.

Al igual que el tanque de almacenamiento, primero se debe calcular el volumen, considerando el flujo masico de materia prima con 6% de sólidos totales y reduciéndola al 1% de sólidos totales incluyendo la cantidad de agua que debe ingresar, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$V_{mix} = \frac{\dot{m}_o + \dot{m}_{H_2O} + \dot{m}_e}{\rho_m} * \tau \quad (33)$$

Donde:

τ : tiempo de resistencia (3 horas o 0.12 días)

Utilizando un factor de seguridad de 20% del volumen final queda:

$$V_{mix} = V_{mix} * 1.2$$

El agitador implica el dimensionamiento de su potencia según el volumen del tanque. Se supone un tanque cilíndrico con un diámetro y altura iguales por lo que:

$$V_{mix} = \frac{\pi * D_{mix}^3}{4} \quad (34)$$

Utilizando una turbina Rushton, se sabe que el diámetro del agitador es un tercio del diámetro del tanque, por lo que:

$$Da_{mix} = \frac{D_{mix}}{3} \quad (35)$$

Para el cálculo de la potencia se utiliza la siguiente ecuación

$$Np = \frac{P_{mix} * g_c}{\rho_m * N_{mix}^3 * Da_{mix}^5} \quad (36)$$

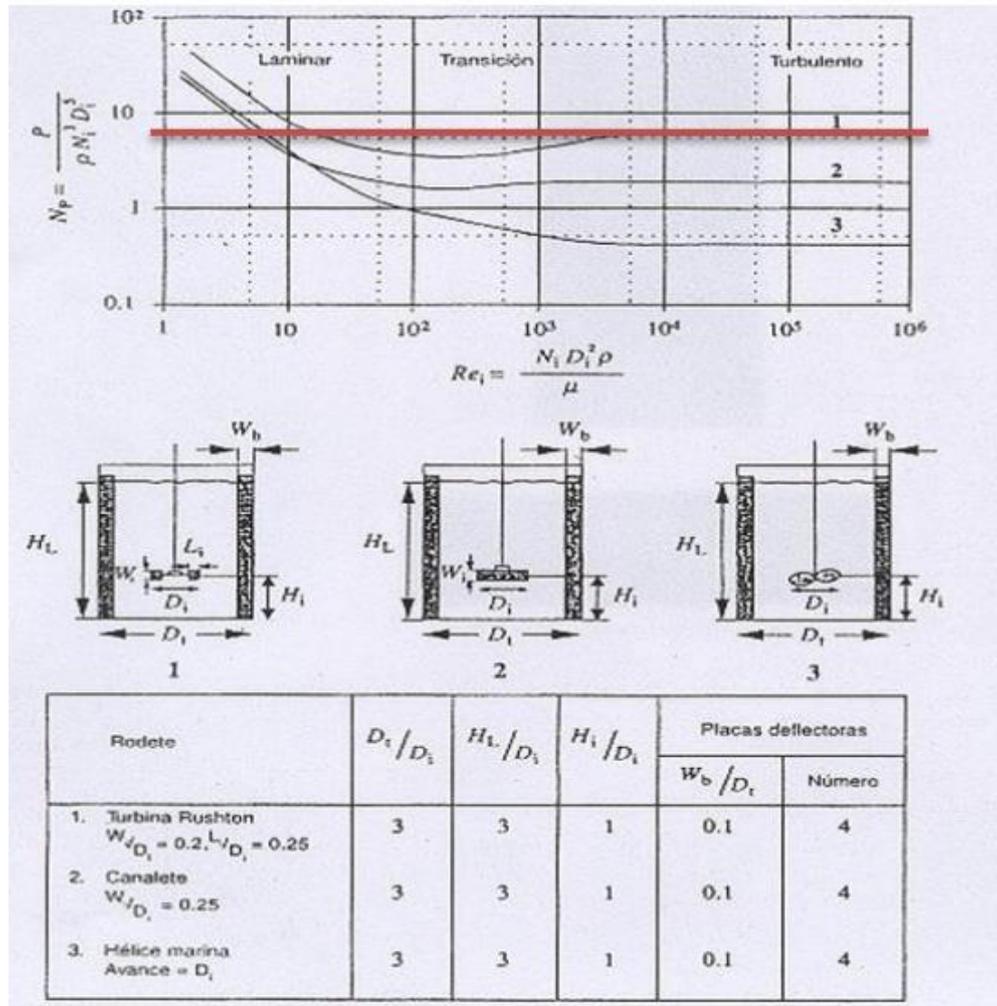
Para asegurar una buena agitación se requiere un régimen turbulento dentro del tanque (Carrasco J.L, 2015). Así, utilizando la Figura 14, se tiene que Np es 8 para una turbina Rushton en régimen turbulento.

Entonces se tiene para la potencia, donde Np es el numero de potencia, P_{mix} es la potencia del agitador en (kgf*m/f), g_c es un factor de conversión igual a 9.8 (kg*m/kgf*s²), ρ_m la densidad del fluido en (kg/m³) y N_{mix} son las revoluciones por segundo iguales a 1.

$$P_{mix} = \frac{N_{mix}^3 * Da_{mix}^5 * \rho_m * Np}{g_c} \quad (37)$$

Figura 14

Número de potencia de la turbina Rushton



Fuente: (Rushton, J.H., Costich, E.W. and Everett, 1950a).

Digestión. Posteriormente, se introduce la mezcla en el biodigestor discontinuo y se controla la temperatura para un menor tiempo de retención, en la experimentación la temperatura de trabajo fue de 32 °C. Al ser un reactor de mezcla completa el tiempo de retención de sólidos y el de líquidos se igualan y el volumen del reactor se puede definir con la siguiente ecuación.

$$V_{digest} = V_{real} * THR \quad (38)$$

Donde, V_{real} es el volumen real del biodigestor, para encontrar el valor THR se puede usar la siguiente ecuación la cual realiza un balance entre (μ) constante de crecimiento de organismos en el reactor (1/días) y (K) constante adimensional de inhibición por la baja en la disponibilidad de sustrato.

$$THR = \frac{1}{\mu} + \frac{K}{\mu} * \left(\frac{S_{in} - S_{out}}{S_{out}} \right) \quad (39)$$

Los valores de (μ) y de (K) son calculados mediante las ecuaciones (40), (41) extraídas de literatura. Yetilmezsoy (2012), menciona que para el cálculo de (μ) se relaciona la temperatura en un rango de 20 °C a 60 °C, de esta manera se obtiene la ecuación (39):

$$\mu = 0.013 * T + 0.129 \quad (40)$$

Donde T es la temperatura del digestor igual a 30°C

Por su parte, Hashimoto (1982), establece la ecuación para determinar la constante adimensional K describiendo la relación entre K y la concentración de sustrato entrante en el reactor (S_{in}). Para estiércol de vaca los valores son los siguientes:

$$K = 0.8 + 0.016 * \exp(0.060 * S_{in}) \quad (41)$$

El agitador del digestor se calcula de igual manera como se trabajó para obtener la agitación para el tanque de mezcla, primero el diámetro, asumiendo una geometría cilíndrica y una relación de 0.50 entre altura y diámetro se puede calcular el diámetro del digestor como:

$$D_{digest} = \sqrt[3]{\frac{V_{digest} * 4}{\pi * 0.5}} \quad (42)$$

Si se utiliza una hélice marina como agitador, se conoce generalmente que el diámetro del agitador es un tercio del diámetro del tanque (Lienqueo, 2013). Por tanto:

$$D_{a\ digest} = \frac{D_{digest}}{3} \quad (43)$$

Como el diámetro del agitador es mayor a 3 metros y la potencia crece de manera exponencial a la quinta directamente proporcional al diámetro, se divide al diámetro del agitador entre tres, para tener un mayor número de agitadores de menor potencia, en este caso en número de agitadores necesarios es:

$$n = \frac{D_{a \text{ digest}}}{3} \quad (44)$$

Así el diámetro de cada impulsor queda definido como:

$$D_{a \text{ digest}} = \frac{D_{a \text{ digest}}'}{n} \quad (45)$$

Para calcular la potencia se tiene la ecuación, donde Np es el número de potencia, P_{mix} es la potencia del agitador en (kgf*m/f), g_c es un factor de conversión igual a 9.8 (kg*m/kgf*s²), ρ_m la densidad del fluido en (kg/m³) y N_{mix} son las revoluciones por segundo iguales a 1.

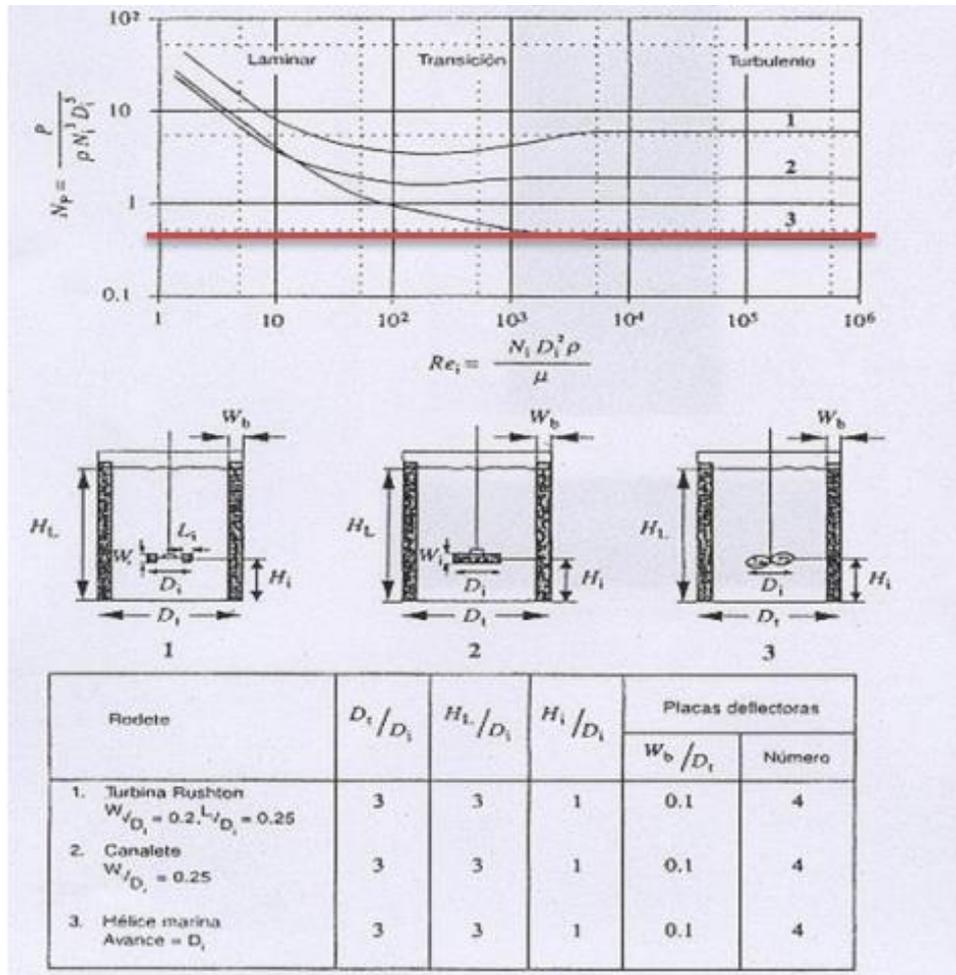
$$P_{mix} = \frac{N_{mix}^3 * D_{a_{mix}}^5 * \rho_m * Np}{g_c} \quad (46)$$

Como el número de impulsores es dos, se multiplica por la potencia de cada uno para conocer la potencia necesaria en el reactor:

$$P_{digest} = P_{mix} * n \quad (47)$$

Figura 15

Número de potencia para impulsor de eje marina



Fuente: (Rushton, J.H., Costich, E.W. and Everett, 1950b)

Cuando se termina el proceso de digestión anaerobio se obtiene dos productos, que son el biogás como primer producto y el digestato como segundo producto, el biogás pasa por un proceso de purificación para eliminar las impurezas y dejar solo metano (CH₄) que es el principal producto para obtener energía eléctrica o generar calor térmico. Con el segundo producto que es el digestato se realiza un tratamiento para producir biofertilizante líquido y sólido.

Indicadores de evaluación de proyectos. El análisis económico de la planta comprende el estudio de los costos de producción e inversión para tratar 3.9 toneladas diarias de residuos orgánicos. La producción de energía eléctrica que es capaz de producir la planta será necesario para realizar un análisis de costo/beneficio.

Valor actual neto (VAN). Este indicador nos permite saber si un proyecto de inversión es rentable mediante la siguiente fórmula:

$$VAN = \sum_{n=1}^N \frac{Q_n}{(1 + TIR)^n} - I = 0 \quad (48)$$

Donde Q_n es el flujo de caja en el periodo n , n es el número de periodos, I es el valor de la inversión inicial

Tasa interna de retorno (TIR). El TIR nos permite saber la viabilidad de un proyecto, es decir la tasa interna de retorno mide el porcentaje de viabilidad que tiene un proyecto y se calcula a partir de la fórmula del VAN.

$$TIR = \sum_{T=0}^N \frac{Fn}{(1 + i)^n} = 0 \quad (49)$$

Capítulo IV

Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante el tiempo de ejecución del proyecto investigativo, en base a cada uno de los objetivos específicos propuestos.

4.1 Caracterización de residuos orgánicos municipales del Cantón Urcuquí

Utilizando la ecuación (1) para una muestra sin un universo definido, el número de experimentos se distribuye para la cantidad de residuos, en este caso (295.84) se divide para 67.18 kg de residuos orgánicos que corresponden a una cantidad permisible según la norma NMX-AA-015-1985 del método de cuarteo, de esta manera $4.38 \sim 5$ es el número de veces que se realizará la toma de muestra.

4.1.1 Densidad de residuos orgánicos

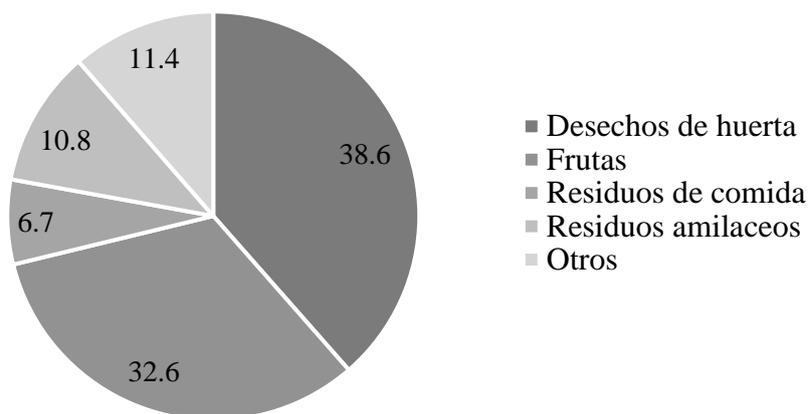
Los resultados obtenidos de caracterización en la fase de campo permitieron determinar la densidad promedio de los residuos sólidos orgánicos que es de 437.5 kg/m³, valor que varía desde 401.5 kg/m³ hasta 469.2 kg/m³.

4.1.2 Clasificación de residuos

En la tabla 8 se indica los resultados obtenidos de la clasificación de residuos sólidos orgánicos en cinco grupos de productos, como son; desechos de huerta, frutas, residuos de comida, residuos amiláceos, otros. Los residuos con mayor generación son los desechos de huerta con una media de generación de 38.6%, seguido por desechos de fruta con 32.6%, los residuos de comida mantienen un bajo porcentaje de producción de 6.7% del total de residuos sólidos orgánicos del relleno sanitario del cantón Urcuquí. De acuerdo con los datos obtenidos en la tabla 8 los resultados de generación de residuos sólidos orgánicos se representan en la figura 16.

Tabla 8*Pesos de las muestras de residuos*

Subproducto	Promedio		Desviación estándar
	kg	%	kg
Desechos de huerta	13.25	38.57	1.10
Desechos de frutas	11.20	32.61	2.01
Residuos de comida	2.3	6.70	0.74
Residuos amiláceos	3.7	10.77	0.96
Otros	3.9	11.35	2.48
Total	34.35	100	

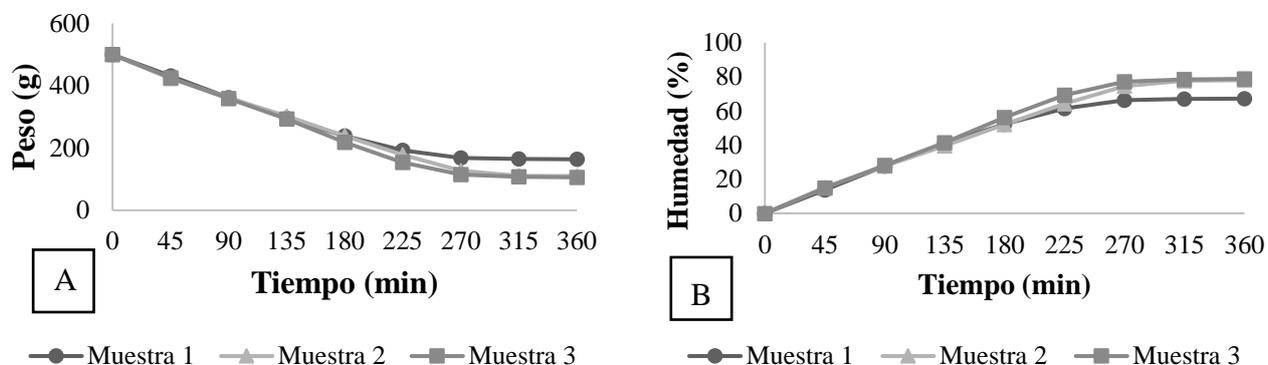
Figura 16*Clasificación de residuos orgánicos*

4.1.3 Curvas de secado y sólidos totales

Las curvas de secado y humedad de las muestras de residuos orgánicos se presentan en la figura 17, donde se evidencia la disminución del peso de la muestra conforme se seca a una temperatura constante de 140 °C en periodos de 45 min, donde el peso inicial es de 500 g y este se va reduciendo aproximadamente 390-300 g, llegando a un peso seco final medio de 110 g.

Figura 17

a) Curva de secado, b) Curva de humedad



Por otro lado, la curva de humedad que muestra la cantidad de sólidos totales en las muestras de residuos orgánicos, la figura 17, representa el porcentaje de humedad que va perdiendo la muestra conforme se la somete a temperatura constante de 140 °C. Se observa una pérdida media de humedad del 74.7%, es decir que la cantidad de sólidos totales es de 25.3%, por tanto se necesita un pretratamiento de residuos antes de ser sometidos a digestión (Carrasco J.L, 2015).

4.1.4 Análisis elemental de residuos orgánicos

El resultado del análisis elemental de la muestra de residuos orgánicos se desglosa en la tabla 9, se observa el contenido de nitrógeno, carbono, hidrogeno y azufre, siendo el de mayor contenido el Carbono con 34.8% seguido por el hidrogeno con 3.45%. La prueba T a través de los resultados de las medias permitió obtener una relación carbono nitrógeno (C/N): 21.80 la cual se encuentra dentro del rango de 20:1 a 30:1 aceptables para procesos óptimos de biodigestión según (Alcayaga et al. 1999).

Tabla 9*Análisis elemental de la muestra de residuos orgánicos*

Elementos	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
C	9	26.44	42.04	34.84	4.12
N	9	1.22	1.88	1.61	0.24
H	9	1.82	8.17	3.45	1.91
S	9	0.22	0.29	0.25	0.03
C:N	9	19.15	23.68	21.77	1.71
N válido	9				

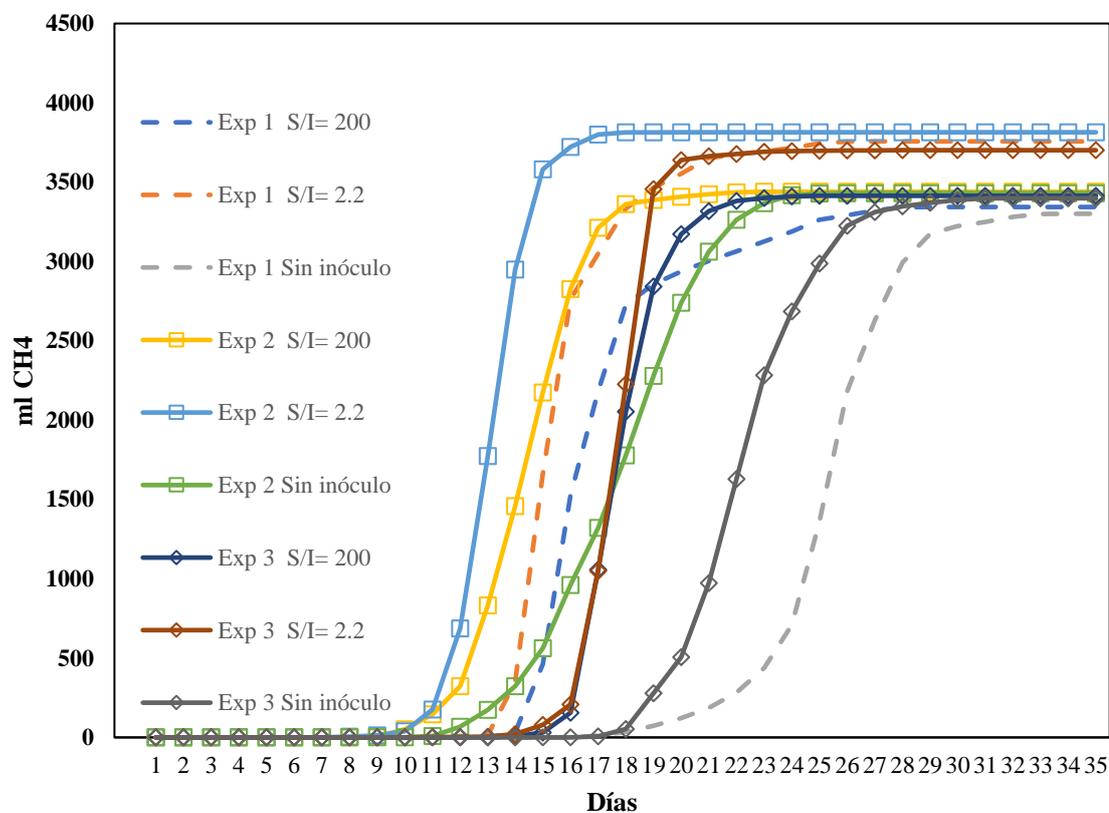
4.2 Cuantificación del biogás producido mediante digestión anaerobia de residuos orgánicos

En los 35 días que se llevó a cabo el proceso de digestión anaerobia en tres biorreactores con dos tipos distintos de inóculo y un testigo a condiciones preestablecidas, se obtuvo que la producción acumulada de biometano a partir de la mezcla 90% de residuos orgánicos más 10% de inóculo de estiércol de vaca con relación S/I de 2.2 fue de 14.56 ml CH₄/gST, el reactor con relación S/I de 200 con inóculo comercial produjo 13.17 ml CH₄/gST, mientras que el reactor sin inóculo generó 13.09 ml CH₄/gST.

La producción de metano del reactor con S/I 2.2 de inóculo de estiércol de vaca es superior al reactor S/I 200 de inóculo comercial y al reactor testigo en un 9.9% y 10.1% respectivamente, los resultados se respaldan con los criterios establecidos por Cleves et al, (2016) donde menciona que en la digestión anaerobia es importante tanto la calidad como la cantidad de inóculo disponible, siendo recomendable emplear un inóculo activo con el fin de reducir el tiempo para la estabilización de los sustratos. Se observó también que la relación S/I influye en la fase de latencia ya que para los reactores con S/I 2.2 el tiempo de latencia fue de entre 6 a 11 días, para la relación S/I 200 fue de 8 y 13 días y para el reactor testigo de entre 10 y 16 días. Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por (Chen & Hashimoto, 1996) quienes afirman que para relaciones S/I bajas que corresponden a concentraciones menores de sustrato, el tiempo de latencia es más corto.

Figura 18

Producción de biogás



El tiempo de retención hidráulica (THR) puede ser modificado para los sustratos dependiendo del tiempo de inhibición en la producción de biogás, en la tabla 10 se muestran los datos estadísticos descriptivos del tiempo en que cesa la producción de biogás, con estos resultados se puede definir que el tiempo de retención hidráulica para el sustrato S/I 2.2 es de 22 días.

Tabla 10

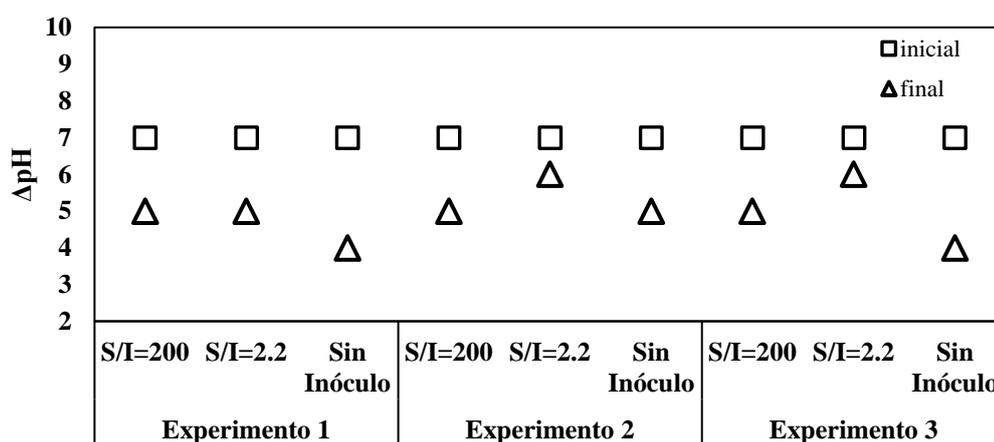
Tiempos de retención hidráulica

Reactores	N	Media	Desviación estándar	Varianza
Reactor1	3	30.00	3.60	1.30
Reactor2	3	22.33	4.04	1.63
Reactor3	3	29.00	3.00	9.00
N válido	3			

Los niveles pH en los reactores muestran una variación de pH neutro al inicio y pH ácido al final de los 35 días. La figura 19 muestra que el pH inicial en todos los reactores es de 7 óptimo para la digestión, durante los 35 días se puede evidenciar la producción de ácidos que finalmente inhiben la fase metanogénicas y finaliza con un pH por debajo de 6. El reactor con relación S/I 2.2 termina el proceso con un pH de 5.7, este pH debido a que durante la digestión se produce ácidos que en parte son transformados en metano y otra parte se sigue acumulando hasta detener la producción de metano, esto quiere decir que no todos los ácidos formados son transformados.

Figura 19

Variación de pH

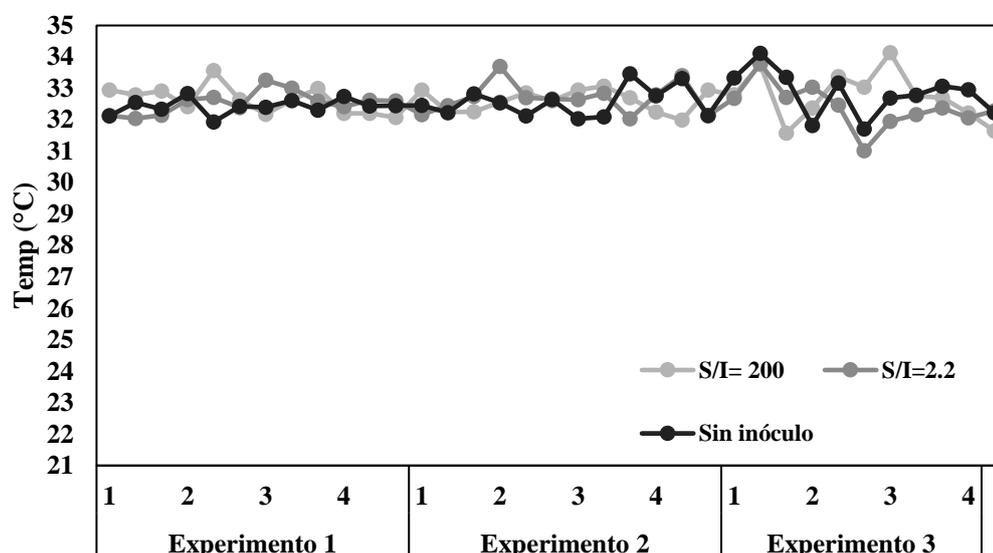


Mientras que los reactores con S/I 200 y sin inóculo finalizan con pH igual a 5 y 4.3 respectivamente en estos casos los niveles de pH inhiben completamente la producción de metano debido a que los niveles de pH son los más bajos por ende los niveles de ácidos son los más altos.

En cuanto a la temperatura, durante toda la experimentación se mantuvo a 32 °C que se encuentra dentro de un rango mesofílico, a estas condiciones de trabajo, la mayor producción de metano se manifiesta a los 16 días con una producción de 7.95 mlCH₄gST⁻¹, estos datos son similares a lo aportado por Kim y Oh, (2011) quienes obtuvieron la más alta producción de metano a los 20 días a una temperatura de operación de 34 °C.

Figura 20

Variación de temperatura



4.2.1 Análisis de varianza para los datos de producción de metano

Según el análisis de varianza descrito en la tabla 11 entre los datos de producción de metano, el nivel de significancia $p=0.00$ indica que los grupos son distintos, por tanto, el valor que se usará como referencia para cálculos posteriores es el de mayor producción de metano que es el reactor con relación S/I= 2.2 con inóculo de estiércol de vaca que alcanzó una producción media acumulada de metano de 3 757.3 ml CH₄ además trabajar con este tipo de inóculo tiene otras ventajas como la relativa facilidad de obtención de inóculo y menor costo de adquisición.

Tabla 11

Producción de metano

Reactor	Media (ml CH ₄)	Desviación estándar	Desv. Error	Sig.
S/I 200	3 398.7	49.9	28.8	.000
S/I 2.2	3 757.3	56.2	32.4	
Testigo	3 376.7	67.5	38.9	
Total	3 510.9	191.8	63.9	

Nota: 95% del intervalo de confianza para la media

4.2.2 *Cuantificación de biometano con un tiempo de retención hidráulica de 35 días utilizando la ecuación modificada de Gompertz*

Para el cálculo de la cantidad de biometano que se puede obtener en un tiempo de retención hidráulica de 35 días, se ajustan los datos de producción acumulada de biometano correspondientes a la producción del biorreactor S/I 2.2 y todos los parámetros cinéticos descritos en la tabla 10, a la ecuación modificada de Gompertz, ecuación (5). Con esto se obtiene que la cantidad de biometano que se puede obtener es de 21 072.7 $mlCH_4$, por lo tanto, para estimación del potencial energético de los residuos orgánicos del cantón Urcuquí se utilizará el valor de producción del reactor S/I 2.2.

4.3 **Determinación del potencial energético de la muestra de residuos orgánicos**

Considerando el relleno sanitario y los datos otorgados por el departamento de gestión ambiental del municipio del cantón Urcuquí, con una cantidad de 3.9 t/día de residuos orgánicos que ingresan como materia prima y sus correspondientes flujos máscicos de agua e inóculo de estiércol de vaca se obtiene el total de la mezcla de materia orgánica disponible. Parámetros como, producción inicial de biometano y materia orgánica original son tomados de la experimentación. La tabla 12 contiene parámetros de cálculo del potencial energético.

Tabla 12

Parámetros para el cálculo de la producción de metano

Parámetro	Abreviación	Valor	Unidades
Producción acumulada de metano	P_m	3 757.3	ml CH_4
Velocidad máxima de producción de metano	R_m	244.9	ml CH_4 día ⁻¹
Fase de latencia	λ	9	
Tiempo de retención hidráulica	THR	35	
Constante de Euler	e	2.71828	
Producción acumulada máxima de metano	M_t	21 072.7	ml CH_4

El potencial de biometano obtenido mediante la ecuación (6), dio como resultado $82.25 \text{ m}^3/\text{día}$. La valoración energética del biometano se realizó mediante la ecuación (7) que indica la cantidad de energía que se puede obtener y la ecuación (8) para la conversión a energía eléctrica utilizando el factor de conversión 0.2778 kWh/MJ . Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 13.

Tabla 13

Parámetros de cálculo del potencial energético de biogás

Parámetro	Abreviación	Valor	Unidades
Producción inicial de metano	M_i	0,0211	m^3
Materia orgánica disponible	RO_d	17564,2	kg
Materia orgánica original	RO_o	4,5	kg
Contenido energético del metano	Ce	38	MJ/m^3

Para obtener los resultados finales de producción anual de energía eléctrica se evaluó la capacidad de generación de energía eléctrica. Mediante la ecuación (9) se obtiene que la energía neta es:

$$EE = 72\,732.1 \text{ kWh/año}$$

Tabla 14

Potencial energético del biometano

Parámetro	Abreviación	Valor	Unidades
Potencial de metano	Mw	82.25	$\text{m}^3/\text{día}$
Cantidad de energía	Ew	3 125.49	MJ
Energía eléctrica	EEw	868.26	kwh
Energía eléctrica al año	$EEw/\text{año}$	316 915.52	kwh

4.4 Análisis de viabilidad económica en función del diagrama de proceso de la planta de biogás

Para realizar el análisis económico de la planta de biogás se requiere conocer los costos de inversión y producción que son necesario para llevar a cabo el tratamiento de 3.9 toneladas de residuos orgánicos que llegan al relleno sanitario a

diario, por tanto, se dimensiona las etapas relevantes de una planta de biogás, para obtener los valores inversión fija y demás costos.

4.4.1 Dimensionamiento de planta de biogás y selección de maquinaria

Mediante la ecuación (14) se determinó el porcentaje de sólidos totales y con la ecuación (11) y (13) se calcula el volumen de la mezcla que ingresa diariamente al reactor y se dimensiona el biodigestor con una cabeza de gas del 20% del fluido diario que ingresa más un factor de seguridad del 25%. La tabla 15 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 15

Dimensionamiento real del biodigestor

Parámetro	Abreviación	Valor	Unidades
Flujo masico de solidos totales	\dot{m} ST	328.1	kgST/día
Volumen mínimo de reacción	V_{reac}	5.7	m ³ /día
Caudal diario mínimo	Q_{min}	0.6	m ³ /día
Caudal mínimo de agua	Q_{minH2O}	2.9	m ³ /día
Porcentaje de sólidos totales	%ST	1.9	
Volumen de mezcla reactiva	V_{mezcla}	31.4	m ³
Volumen del reactor	$V_{Reactor}$	34.3	m ³
Volumen cabeza de gas	V_{Gas}	8.8	m ³
Volumen de seguridad	V_{Seg}	6.9	m ³
Volumen real del reactor	V_{real}	49.9	m ³

Para el tratamiento de la mezcla reactiva en el relleno sanitario se necesita un reactor de 49.9 m³ por TRH.

Balance de masa y energía. Los resultados del balance de masa se presentan en la tabla 16, donde se determina que la producción de biogás es de 82.25 m³/día.

Tabla 16*Producción de biogás*

Parámetro	Abreviación	Valor	Unidades
Sólidos totales de la mezcla	%ST	0.08	kg/kg muestra
Sólidos totales al biodigestor	%ST _{bio}	0.02	kg/kg muestra
Caudal de alimentación	Q _{bio}	2.45	m ³ /día
Caudal de biogás producido	Q _m	82.25	m ³ /día

Para el balance de energía se consideró que los equipos se comportan de manera adiabática, con excepción del reactor donde se realiza el análisis de pérdida y ganancia de energía. Los datos y resultados del cálculo del calor de elevación de la materia prima al ingresar al reactor se determinan mediante la ecuación (20) y se presentan en la tabla 17.

Tabla 17*Datos y resultado del cálculo de calor a la entrada del biodigestor*

Parámetro	Abreviación	Valor	Unidades
Capacidad calorífica de biol	Cp	4187	J/kg*K
Temperatura de entrada	Te	292.2	K
Caudal de entrada	Q _{bio}	2.4	m ³ /día
Temperatura de salida	Ts	303.2	K
Calor de elevación	Q _{Elevación}	1305.3	watt

Mediante la ecuación (21) se determina el calor que gana el reactor debido a la reacción de digestión. La tabla 17 contiene los parámetros y resultados del cálculo de calor generado por la reacción.

Tabla 18*Parámetros de cálculo de calor generado por la reacción*

Parámetro	Abreviación	Valor	Unidades
Velocidad de reacción	r	1	mol/m ³ *s
Entalpía de reacción	-ΔH _r	-145	J/mol
Volumen de reacción	Q _{bio}	2.4	m ³
Calor de reacción	Q _r	355.2	watt

Los datos y resultados del cálculo del espesor de las paredes del digestor se muestran en la tabla 19.

Según la norma ACI, para tanques con una altura mayor a 10 ft, 3.05 m se sugiere que el espesor del tanque sea al menos 0.305 m. Como el espesor dimensionado es menor a lo indicado, se tomará el valor sugerido por la norma para continuar con el dimensionamiento.

Tabla 19

Cálculo del espesor de las paredes del biodigestor

Parámetro	Abreviación	Valor	Unidades
Altura del líquido	Hl	3.8	m
P	P	24 883.6	kgf/ m ²
Anillo de tensión	T	94 930.9	kgf/m
Espesor del tanque	e	1.4	in

Finalmente, remplazando los datos en la ecuación (24) el coeficiente global de transferencia de calor es igual a:

$$U_{Digest} = 7.1 \frac{W}{m^2} * K \quad (50)$$

Entonces el calor aportado por las bombas es:

$$Q_{bombas} = 12.9kW$$

La tabla 20 detalla los parámetros y resultados de cálculo de pérdidas de calor por las paredes del digestor.

Tabla 20*Cálculo de pérdidas de calor en el biodigestor*

Parámetro	Abreviación	Valor	Unidad
Espesor del tanque recomendado	e	0.305	m
Diámetro externo del tanque	$D_{ext-digest}$	12.72	m
Prandtl	Pr	4.8	
Nusselt lado del residuo	Nu_0	11 633.9	
Coefficiente de transferencia lado del residuo	h_0	634.1	watt/ m ² *K
Reynolds	Re	1 850 688.6	
Nusselt exterior del cilindro	Nu_∞	4 818.1	
Coefficiente de transferencia exterior	h_∞	240.2	watt/ m ² *K
Coefficiente global del sistema G	U_{Digest}	7.1	watt/ m ² *K
Área de transferencia	$A_{Tdigest}$	164.7	m ²
Calor por pérdidas en el biodigestor	$Q_{pérdidas}$	12 917.2	watt

Almacenamiento y pretratamiento. La materia prima es receptada en un tanque de almacenamiento que brinda a la planta de biogás una autonomía de dos días, por cualquier fallo o imprevisto que se presente en la recepción de residuos orgánicos, mediante la ecuación (32) se obtiene el volumen del tanque de almacenamiento. Las dimensiones del tanque se presen tan en la tabla 21.

Tabla 21*Tanque de almacenamiento*

Dimensión	Valor	Unidad
Volumen	18	m ³
Diámetro	3.6	m
Área	10.0	m ²
Altura	1.8	m

El equipo que se usa para el pretratamiento de materia orgánica es un molino de martillos, cuyas características se conocen en función a su capacidad de manera que el flujo que ingresa al molino define su potencia, en este caso el flujo de entrada

es de 3.9 t/día se debe utilizar el tamaño número 1 de la tabla por lo que su potencia es de 30 HP. El equipo seleccionado fue “*Composta de bagazo de amoladora/residuos de alimentos máquina de trituración/estiércol de vaca Crusher*”

Mezcla. Para la mezcla se requiere dos elementos principales, un tanque y su agitador. Mediante la ecuación (33) y (35) se logró determinar el volumen del tanque y las características del agitador respectivamente. La tabla 22 muestra las características del tanque de mezcla y agitador.

Tabla 22

Tanque de mezcla

Dimensión	Valor	Unidad
Volumen	4.5	m ³
Diámetro	1.9	m
Área	2.9	m ²
Altura	1.4	m

Para la mezcla de residuos se dimensiona un agitador que implica el cálculo de su potencia en función del volumen del tanque de almacenamiento, considerando un tanque cilindro de diámetro y altura iguales. Mediante la ecuación (37) y basándonos en las curvas de la figura 14 se determinó que la potencia del agitador para el tanque de mezcla es de 853.9 W

Dimensionamiento final del Digestor. El digestor es uno de los elementos más importantes de la planta ya que de él depende la capacidad de convertir lodos reactivos en energía. El principal parámetro a dimensionar es el volumen del reactor, mismo que depende de los días de retención hidráulica (THR), durante el cual la mezcla reactiva permanece dentro de reactor, utilizando la ecuación (39) se determinó el THR. Como la mezcla no es 100% estiércol de vaca se tomará el valor recomendado para una temperatura de 30 °C corresponde 14 días de THR según (Carrasco J.L, 2015).

El agitador para el digestor se calcula siguiendo el mismo proceso del agitador del tanque de mezcla, haciendo uso de las ecuaciones (44) y (45) se obtiene el diámetro y número de agitadores respectivamente. Finalmente, con la ecuación (48) se determina la potencia total para el reactor, la tabla 23 muestra los resultados.

Tabla 23

Datos del dimensionamiento del biorreactor

Biorreactor		
Tiempo de retención hidráulica	8.4	días
Tiempo de retención hidráulica recomendado	14.0	días
Volumen final del reactor	698.6	m ³
Diámetro del reactor	12.1	m
Altura total reactor final	6.1	m
Diámetro del agitador del reactor final ($d > 3 = d/3$)	4.0	m
Numero de agitadores (2)	1.3	watt
Diámetro de cada impulsor	2.0	m
Potencia de cada impulsor	1 286.2	watt
Potencia total necesaria para el reactor	2 572.3	watt

4.4.2 *Análisis económico*

Inversión fija. En la tabla 24, se muestra los costos de los equipos necesarios para la construcción de la planta, es decir, se toman en cuenta el material y la mano de obra necesaria para construir la planta de biogás. El costo de inversión fija es de \$ 548 414.34.

Tabla 24*Equipos de la planta de biogás*

Costo de Equipos						
Nro	Código	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	P. Total
1	516820	Molino de martillos	U	1.00	2 129.74	2 129.74
2	516821	Sistema de Purificación de biogás	U	1.00	2 885.08	2 885.08
		Generador eléctrico de biogás 50kVA				
3	516822	trifásico 220V	U	1.00	13 794.16	13 794.16
4	516823	Mezclador de alta velocidad con doble eje	U	1.00	3 670.90	3 670.90
5	516824	Tanque de almacenamiento de biogás	U	1.00	17 156.04	17 156.04
6	516825	Bomba de calor de 5HP	U	4.00	1 360.35	5 441.40
7	516826	Agitador de 1,5 kW	U	2.00	3 613.57	7 227.14
8	516827	Tablero de transferencia de 50kVA	U	1.00	4 885.29	4 885.29
9	516647	Tablero de control	U	1.00	1 220.50	1 220.50
10	515657	Tablero de distribución de baja tensión	U	1.00	2 370.96	2 370.96
11	503298	Transformador de 50KVA	U	1.00	2 487.48	2 487.48
12	516828	Tanque de hormigón para biodigestor	U	1.00	32 055.22	32 055.22
13	516829	Tanque de agua	U	1.00	4 892.11	4 892.11
14	516830	Tanque de estiércol	U	1.00	3 478.71	3 478.71
15	516831	Tanque de mezcla	U	1.00	3 478.71	3 478.71
16	516832	Sistema de automatización	U	1.00	5 044.22	5 044.22
17	500790	Tubería de acero recubierta de 02"	U	30.00	37.62	1 128.60
18	516833	Alimentador principal	U	30.00	70.42	2 112.60
19	516834	Cableado eléctrico	U	400.00	11.00	4 400.00
20	502201	Bomba centrifuga 3HP	U	1.00	902.07	902.07
21	502402	Retroexcavadora	U	1.00	64 000.00	64 000.00
		Total				184 760.93

Mano de obra. Dentro de los costos de mano de obra se detalla los trabajadores necesarios para el correcto funcionamiento de la planta, con su respectivo salario incluido los beneficios laborales.

Tabla 25*Costos de mano de obra*

Cargo	Cantidad	Salario mes	Salario anual	Total, beneficios
Administrativo				
Administrador	1.00	1 240.00	14 880.00	20 033.12
Subtotal	2.00	1 652.23	19 826.76	20 033.12
Producción				
Operador				
planta	1.00	800.00	9 600.00	15 598.48
Peón	2.00	410.4	9 849.60	20 681.75
Maquinista	1.00	614.84	7 378.08	10 131.84
Operador de				
equipo	2.00	730	17 520.00	11 955.74
Ingeniero				
biotecnólogo	1.00	800	9 600.00	15 598.48
Subtotal	7.00		53 947.68	73 959.95
Total				93 993.07

Costos Operativos. En los costos operativos se detallan los gastos de la planta, es decir los gastos energéticos, gastos para el funcionamiento de la planta, también costos de mantenimiento y costos de transporte. El precio de energía eléctrica consumida lo detalla la ARCONEL.

Tabla 26*Requerimientos energéticos de la planta*

Equipo	Potencia	H. funcionamiento	Kwh	Requerimientos energéticos		
				kwh	\$/kwh	\$(kwh/año)
Agitadores	3	9	27	9 855	0.09	847,53
Bombas de calor	9	9	81	29 565	0.09	2 542.59
Mezclador	22	2	44	16 060	0.09	1 381.16
Molino de						
martillos	30	2	60	21 900	0.09	1 883.40
Total	64		212	77 380		6 654.68

El costo de mantenimiento se estableció de acuerdo a los porcentajes que menciona Ministerio de energía de Chile, (2012), estos porcentajes pueden variar dependiendo el mantenimiento preventivo que se le dé a la planta. c.

Tabla 27

Costos de mantenimiento

Detalle	Cs/Mes	Cs/Año
Instalaciones	1 423.29	17 079.46
Maquinaria y equipo	566.67	6 800.04
Total, mantenimiento		23 879.50

El costo del inóculo representa una parte considerable de los gastos anuales de la planta, debido a que únicamente se necesita el estiércol líquido del ganado vacuno, el costo por litro es de \$0.40 (Bedoya, 2008). Ventajosamente este costo se puede reducir aplicando estrategias como, fortalecer la relación con el proveedor y negociar costos de adquisición, de esta manera el costo por litro de estiércol es de \$0.25.

Tabla 28

Costo de inóculo y aditivos

Ítem	Cantidad	Precio (kg)	T. Precio	P. Año (\$)
Cal	35.5	0.10	3.55	1 278.00
Estiércol	1 776.2	0.25	444.05	159 858.00
Total				161 136.00

Proyección de Ingreso. Los ingresos que genera la planta se basan en la venta de energía, el biol y abono sólido como bioproductos a partir del digestato, el precio de venta lo establece en la “regulación no. Conelec – 009/06 *precios de la energía producida con recursos energéticos renovables no convencionales*”. El precio del biol y abono sólido son valores aproximados que dependen del tipo de tratamiento por el que se obtengan (Bedoya, 2008).

Tabla 29*Ingresos de la planta de biogás*

Detalle	Unidad	Cantidad/año	% uso	V. Unitario	Total (\$)
Energía	kwh	72 732.10	95%	0.09	7 033.19
Biol	litros	3 767 096.73	60%	0.25	583 256.38
Abono sólido	quintales	1 197.66	50%	0.27	161.68
Total					571 907.73

Modelo financiero. El análisis financiero muestra la viabilidad económica del proyecto, en el cual se toma en cuenta el capital para la inversión, es decir, de donde proviene el dinero de la inversión, en este caso el 100% de la inversión la cubre el préstamo del banco, con una tasa de interés del 9.33% según el Banco Central del Ecuador para un periodo de 3 años.

Tabla 30*Amortización*

Periodo	Saldo	Capital	Préstamo		Cuota Mensual
			Interés	Total, de pago	
0	548 414.34				
1	365 609.56	182 804.78	51 167.06	233 971.84	19 497.65
2	182 804.78	182 804.78	34 111.37	216 916.15	18 076.35
3	-	182 804.78	17 055.69	199 860.46	16 655.04
		548 414.34	102 334.12	650 748.45	

Flujo de caja. En el flujo de caja se detallan los egresos e ingresos de dinero, para el proyecto se utilizó un periodo de 10 años, también se toma en cuenta el impuesto a la renta que es el 22% de la utilidad bruta.

Tabla 31*Flujo de caja*

Detalle	GASTOS FINANCIEROS										
	año 0	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5	año 6	año 7	año 8	año 9	año 10
Amortización		233 971.84	216 916.15	199 860.46	-	-					
Depreciación		6 131.48	6 131.48	6 131.48	6 131.48	6 131.48	6 131.48	6 131.48	6 131.48	6 131.48	6 131.48
Total, egresos		363 653.41	363 653.41	363 653.41	363 653.41	363 653.41	363 653.41	363 653.41	363 653.41	363 653.41	363 653.41
Utilidad bruta		-31 849.00	-14 793.31	2 262.37	202 122.84	202 122.84	202 122.84	202 122.84	202 122.84	202 122.84	202 122.84
Impuesto a la renta 25%		-7 962.25	-3 698.33	565.59	50 530.71	50 530.71	50 530.71	50 530.71	50 530.71	50 530.71	50 530.71
Utilidad neta		-23 886.75	-11 094.98	1 696.78	151 592.13	151 592.13	151 592.13	151 592.13	151 592.13	151 592.13	151 592.13
Reparto de la utilidad		-3 105.28	-1 442.35	220.58	19 706.98	19 706.98	19 706.98	19 706.98	19 706.98	19 706.98	19 706.98
Utilidad de la empresa		-2 078.15	-965.26	147.62	13 188.52	13 188.52	13 188.52	13 188.52	13 188.52	13 188.52	13 188.52
Flujo neto	-548 414.34	-18 703.32	-8 687.37	1 328.58	118 696.64	118 696.64	118 696.64	118 696.64	118 696.64	118 696.64	118 696.64
% rendimiento		-3%	-2%	0%	21%	21%	21%	21%	21%	21%	21%

Los indicadores financieros resultados del flujo de caja indican que el proyecto no es viable con las características planteadas, estos valores se muestran en la tabla 32, donde la TIR resulta ser mayor a cero pero el VAN es menor a cero, por lo que según Vera (2010), el proyecto es rentable pero la ganancia es menor, un ROS por debajo de cero indica que se pierde la capacidad de negociar mejores costos, el RAE mayor a cero representa mayores beneficios generados por el activo total y la inversión de los accionistas ROE genera una rentabilidad de -0.03 %, ratio por lo que el proyecto sería rechazado por los prestamistas.

Tabla 32

Indicadores económicos para proyectos

Análisis financiero	
Tasa de descuento	17%
VAN	\$-236 713.44
TIR	6%
ROS	-0.03
RAE	2.52
ROE	-0.03

Análisis de sensibilidad. Se analiza la rentabilidad del proyecto en función de la variable más influyente que se pudo determinar, en este caso se involucra a inversionistas que puedan financiar el proyecto dentro de dos escenarios, normal y optimista con inversiones del 40% y 80%, a continuación, se analizan los resultados.

Escenario normal, obteniendo el 40% de inversión. Con el 40% de inversión el flujo neto se vuelve positivo el VAN mayor a cero y TIR positiva de esta manera Vera (2010) estipula que se recupera la inversión y existe ganancias más de lo que se desea ganar, el ROS amplía la capacidad de negociar mejores costos, el RAE mantiene su valor en 2.52% es decir que por cada unidad monetaria invertida en activos la empresa obtiene USD \$2.52 en utilidades netas, el ROE en este escenario es atractivo para los inversionistas, con lo que el proyecto se puede poner en marcha.

Tabla 33*Escenario normal, indicadores económicos para proyectos*

Análisis financiero	
Tasa de descuento	17%
VAN	\$48 469.94
TIR	20%
ROS	0.06
RAE	2.52
ROE	0.11

Escenario con el 80% de inversión. El 80% de inversión convierte al proyecto en una oportunidad totalmente viable para los inversionistas, la TIR y VAN mayores a cero significa que se recupera la inversión y existe ganancias más de lo que se desea ganar, los indicadores de rentabilidad (ROS, RAE y ROE) muestran que la industria del biogás puede ser rentable con intervención de inversionistas.

Tabla 34*Escenario optimista, indicadores económicos para proyectos*

Análisis financiero	
Tasa de descuento	17%
VAN	\$333 653.32
TIR	88%
ROS	0.16
RAE	2.52
ROE	0.83

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

- El cantón Urcuquí, debido a que es un cantón netamente agrícola produce una gran cantidad de residuos orgánicos que cumplen con las condiciones adecuadas (relación C/N) para la producción de biogás a partir de un proceso de digestión anaerobia.
- En el proceso digestivo de los residuos sólidos orgánicos que se llevó a cabo en la experimentación se evidenció la diferencia en producción de metano entre los tres tipos de mezcla, siendo la de mayor producción la mezcla con relación S/I igual a 2.2 que corresponde a la mezcla del 90% de residuos sólidos orgánicos y 10% del inóculo de estiércol de vaca.
- El reactor con mezcla S/I 2.2 superó la fase de latencia en un tiempo de 6 a 11 días a diferencia del resto de reactores, es decir, mientras menor es la relación S/I, el tiempo que tardan los reactores en generar biogás se reduce optimizando la producción.
- La energía eléctrica producida a partir del biogás puede abastecer la demanda de 37 viviendas en el cantón Urcuquí, es decir, se puede brindar energía eléctrica al 1% del total de viviendas del Cantón.
- El factor principal que influye en la rentabilidad del proyecto es el préstamo del banco, debido a que los intereses del banco hacen inviable el proyecto. Por otra parte, en los escenarios analizados con inversión, el proyecto resulta altamente viable, es decir, se necesita una inversión mayor al 35% del capital para que el proyecto sea rentable.

5.2 Recomendaciones

- Retomar la importancia de revalorizar los residuos orgánicos del Cantón Urcuquí dándoles un destino final en una planta de biogás cuyo tratamiento tiene como subproducto no solo compost o biofertilizantes si no también un combustible (biogás), productos que pueden ser comercializados dentro de un marco de producción sostenible y amigable con el ambiente.
- Ampliar la visión de los Gobiernos hacia una perspectiva de crecimiento y desarrollo tecnológico que incluya alternativas renovables de generación energética haciendo hincapié en la producción de biogás en mutuo acuerdo con aquellos municipios donde la generación de residuos sólidos orgánicos presente las condiciones que permita el desarrollo de estudios e implementación de dichos proyectos.
- Incluir estudios fisicoquímicos de los residuos orgánicos municipales en la sección de caracterización de residuos dentro de los planes de trabajo en el manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos orgánicos de los Gobiernos Autónomos Descentralizados.
- Profundizar la investigación en base a la utilización del digestato, ya que tiene muchos beneficios que no se los tomaron en cuenta en esta investigación.
- Tomar en cuenta los préstamos de los bancos, ya que el interés que genera es fundamental al momento de realizar una inversión para un proyecto de energías renovables, debido a que son inversiones de grandes montos de dinero y el interés hace inviable el proyecto.

Referencias

- Achinas, S., Achinas, V., & Euverink, G. J. W. (2017). A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste. *Engineering*, 3(3), 299–307. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.03.002>
- Adams, P., Bridgwater, T., Lea-Langton, A., Ross, A., & Watson, I. (2018). *Chapter 8 - Biomass Conversion Technologies* (P. Thornley & P. B. T.-G. G. B. of B. S. Adams (Eds.); pp. 107–139). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101036-5.00008-2>
- Adhikari, S., Nam, H., & Chakraborty, J. P. (2018). Conversion of solid wastes to fuels and chemicals through pyrolysis. En *Waste Biorefinery: Potential and Perspectives*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63992-9.00008-2>
- AGF Ingenieria de Procesos. (2019). *BIOGASNALIA alcanza una producción de 1MWe durante una prueba de rendimiento para evaluar potenciales inversiones - AGF*. <https://agfprocesos.com/agf-consigue-biogasnalia-alcance-una-produccion-1mwe-una-prueba-rendimiento-evaluar-potenciales-inversiones/>
- Archer, R. (2020). 20 – Geothermal Energy. En *Future Energy: Improved, Sustainable and Clean Options for Our Planet* (Third Edit). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00020-7>
- Artiola, J. F. (2019). *Chapter 21 - Industrial Waste and Municipal Solid Waste Treatment and Disposal* (M. L. Brusseau, I. L. Pepper, & C. P. B. T.-E. and P. S. (Third E. Gerba (Eds.); pp. 377–391). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814719-1.00021-5>
- Barros, R. M. (2018). 16 - MSW ash. En R. Siddique & P. B. T.-W. and S. C. M. in C. Cachim (Eds.), *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering* (pp. 513–557). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00016-X>

- Basu, P. (2018). Biomass characteristics. En *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00003-0>
- Bedoya, A. del C. A. (2008). *Evaluación de abónos orgánicos en el cultivo de frejol (Phaseolus vulgaris L) en la parroquia de Perucho-Pichincha-Ecuador*. Universidad San Francisco de Quito.
- Bernal; J. Moreno; R. Moral; J.I. Garcia; J.A. Pascual; M.P. (2016). *Ingeniería y aspectos técnicos de la digestión anaeróbica II.4*. Mundi-Prensa. <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/55257>
- Bhatia, S. C. (2014). 17 - *Biogas* (S. C. B. T.-A. R. E. S. Bhatia (Ed.); pp. 426–472). Woodhead Publishing India. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-269-3.50017-6>
- Borja, R., & Rincón, B. B. T.-R. M. in L. S. (2017). *Biogas Production*. Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.09105-6>
- Breeze, P. (2019). *Chapter 15 - Biomass-Based Power Generation* (P. B. T.-P. G. T. (Third E. Breeze (Ed.); pp. 351–374). Newnes. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102631-1.00015-8>
- BT5301 *Ingeniería Metabólica y Fermentación :: Realizaciones del Curso*. (s/f). Recuperado el 14 de septiembre de 2020, de https://www.u-cursos.cl/ingenieria/BT5301/datos_ramo/
- Cabrera J, C., & Jaramillo J, J. (s/f). *ESTADISTICA INFERENCIAL*. Universidad Tecnica Particular de Loja.
- Carrasco J.L, F. G. A. D. (2015). *EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE BIOGÁS PARA AUTOABASTECIMIENTO ENERGÉTICO: UNA ESTRATEGIA PARA DIFERENTES CONTEXTOS MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL EN BIOTECNOLOGÍA*.
- Cecchi, F., Bolzonella, D., Pavan, P., Macé, S., & Mata-Alvarez, J. (2011). 6.36 -

Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste for Methane Production: Research and Industrial Application (M. B. T.-C. B. (Second E. Moo-Young (Ed.); pp. 463–472). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00332-9>

Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2011). *Termodinámica*. McGRAW-HILL.

Chen, T.-H., & Hashimoto, A. G. (1996). Effects of pH and substrate:inoculum ratio on batch methane fermentation. *Bioresource Technology*, 56(2), 179–186. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0960-8524\(96\)00016-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0960-8524(96)00016-8)

Chiriboga, (2010). *Desarrollo del Proceso de Producción de Biogás y Fertilizante Orgánico a partir de Mezclas de Desechos de Procesadoras de Frutas*. Universidad San Francisco de Quito.

Cleves, C., Marcela, L., Parra-Orobio, Alexis, B., Torres-Lozada, Franco, P. V., & Humberto, C. (2016). Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. *Ion*, 29, 102.

Dhir, R. K., Brito, J. de, Lynn, C. J., & Silva, R. V. (2018). Municipal Solid Waste Composition, Incineration, Processing and Management of Bottom Ashes. En *Sustainable Construction Materials*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100997-0.00003-8>

Eales, A. (2012). *Non-Renewable and renewable resources*.

Fardin, J. F., de Barros, O., & Dias, A. P. F. (2018). *1 - Biomass: Some Basics and Biogas* (I. B. T.-A. in R. E. and P. T. Yahyaoui (Ed.); pp. 1–37). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813185-5.00001-2>

Forster-Carneiro, T., Pérez, M., & Romero, L. I. (2008). Influence of total solid and inoculum contents on performance of anaerobic reactors treating food waste. *Bioresource Technology*, 99(15), 6994–7002. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.01.018>

GAD Municipal San Miguel de Urququi. (2018). *DIAGNOSTICO DE LA*

GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS SOLIDOS NO PELIGROSOS (PGI)2018 (G. A. D. M. D. E. S. A. N. M. D. E. URCUQUI (Ed.)).

- Gómez, X., Cuetos, M. J., Cara, J., Morán, A., & García, A. I. (2006). Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes: Conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate. *Renewable Energy*, 31(12), 2017–2024. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.09.029>
- Gonzales, S. M. (1997). *Producción y recuperación de biogás en vertederos controlados de residuos sólidos urbanos: análisis de variables y modelización* [Universidad de Oviedo]. https://www.google.com/search?sxsrf=ALeKk00BwGB77fsBAPrROnhXahuN7KCJ_w%3A1608145615866&ei=z1raX4ScNMWD5wLr0pigAw&q=Producción+y+recuperación+de+biogás+en+vertederos+controlados+de+residuos+sólidos+urbanos%3A+análisis+de+variables+y+modelización&oq=Producc
- Gorjian, S. (2017). *Renewable Energy Technmologies*.
- Groppelli, E., & Giampaoli, O. (2015). *Biodigestores*.
- Hashimoto, A. G. (1982). Methane from cattle waste: Effects of temperature, hydraulic retention time, and influent substrate concentration on kinetic parameter (k). *Biotechnology and Bioengineering*, 24(9), 2039–2052. <https://doi.org/10.1002/bit.260240911>
- Hernández, H. A. H. (2012). *Diseño de un Biodigestor Instrumentado Electrónicamente para la Generación de Biogás en Casa Habitación*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Holl, R. J., & DeMeo, E. A. (1990). *The Status of Solar Thermal Electric Technology BT - Advances in Solar Energy: An Annual Review of Research and Development* (K. W. Böer (Ed.); pp. 219–394). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9948-3_2
- Holm-Nielsen, J. B., & Oleskowicz-Popiel, P. (2013). 10 - Process control in biogas

plants. En A. Wellinger, J. Murphy, & D. B. T.-T. B. H. Baxter (Eds.), *Woodhead Publishing Series in Energy* (pp. 228–247). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857097415.2.228>

INEC. (2010). *Censo de poblacion y vivienda 2010*.

INEC. (2017). *Gestión de Residuos Sólidos* (AME (Ed.)). <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/municipios-y-consejos-provinciales/>

Instituto de Investigacion Geologico y energetico (IIGE). (2018). *Balance Energetico Nacional*. https://issuu.com/revistavirtualmrnnr/docs/balance_energ_tico_nacional_2018

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the First Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Chnage*. Core Wrinting Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds).

ITC. (2008). *Energías Renovables y Eficiencia energética* (p. 16). Instituto tecnológico de Canarias.

IVE. (2014). *Productos y materiales. Propiedades de aislantes térmicos para rehabilitación energética*. Instituto Valenciano de la Edificación. http://www.five.es/descargas/archivos/P1_portada.pdf

Khanal, S. K., Tirta Nindhia, T. G., & Nitayavardhana, S. (2019a). *Chapter 11 - Biogas From Wastes: Processes and Applications* (M. J. Taherzadeh, K. Bolton, J. Wong, & A. B. T.-S. R. R. and Z. W. A. Pandey (Eds.); pp. 165–174). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64200-4.00011-6>

Khanal, S. K., Tirta Nindhia, T. G., & Nitayavardhana, S. (2019b). *Chapter 11 - Biogas From Wastes: Processes and Applications* (M. J. Taherzadeh, K. Bolton, J. Wong, & A. B. T.-S. R. R. and Z. W. A. Pandey (Eds.); pp. 165–174). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64200-4.00011-6>

- Kim, D.-H., & Oh, S.-E. (2011). Continuous high-solids anaerobic co-digestion of organic solid wastes under mesophilic conditions. *Waste Management*, 31(9), 1943–1948. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.05.007>
- Kirk, D. M., & Gould, M. C. (2020). *Chapter 17 - Bioenergy and anaerobic digestion* (A. B. T.-B. (Second E. Dahiya (Ed.); pp. 335–360). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815497-7.00017-8>
- Klinghoffer, N B, & Castaldi, M. J. (2013). 9 - Gasification and pyrolysis of municipal solid waste (MSW). En Naomi B Klinghoffer & M. J. B. T.-W. to E. C. T. Castaldi (Eds.), *Woodhead Publishing Series in Energy* (pp. 146–176). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857096364.2.146>
- KS, D., Siew, K., & TL, R. (2017). *Integrated Biorefineries* (M. A. B. T.-E. of S. T. Abraham (Ed.); pp. 299–314). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10138-1>
- Kuyper, J. C. V. de, & Morales, S. R. (s/f). *Fuentes de Energía Renovables y No Renovables Aplicaciones*. Alfaomega.
- Labatut, R. A., Angenent, L. T., & Scott, N. R. (2010). Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates. *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.035>
- Lin, L., Xu, F., Ge, X., & Li, Y. B. T.-A. in B. (2019). *Biological treatment of organic materials for energy and nutrients production—Anaerobic digestion and composting*. Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/bs.aibe.2019.04.002>
- Lindorfer, H., & Frauz, B. (2015). *Chapter 6 - Biogas Biorefineries* (A. Pandey, R. Höfer, M. Taherzadeh, K. M. Nampoothiri, & C. B. T.-I. B. & W. B. Larroche (Eds.); pp. 271–294). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63453-5.00008-2>
- Liu, X., Yan, Z., & Yue, Z.-B. (2011). *3.10 - Biogas* (M. B. T.-C. B. (Second E. Moo-Young (Ed.); pp. 99–114). Academic Press.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00165-3>

Lotsch, H. K. V, Goetzberger, A., U.Hoffmann, V., Rhodes, W. T., Asakura, T., Brenner, K.-H., Hänsch, T. W., Kamiya, T., Krausz, F., Monemar, B., Venghaus, H., Weber, H., & Weinfurter, H. (Eds.). (2005). *What Is Photovoltaics? BT - Photovoltaic Solar Energy Generation* (pp. 1–10). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-26628-3_1

Luisina, A., Córdoba, V., Hungría Estévez, J., & Santalla, E. (2018). *Análisis del potencial energético de lodos de planta depuradora. 2*, 20–27.

MAE. (2001). *Comunicación Nacional - República del Ecuador. Convención Marco de las Naciones Unidas Cambio Climático*. Graficas Iberia.

Mathew, S. (2006). *Basics of wind energy conversion BT - Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics* (S. Mathew (Ed.); pp. 11–43). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-30906-3_2

Ministerio de Desarrollo Social. (2013). *Metodología de Formulación y evaluación Socioeconómica de Proyectos de Valorización de Residuos Municipales*. <http://www.sinia.cl/1292/w3-propertyvalue-15487.html>

Ministerio de energía de Chile. (2012). *Guía de planificación para proyectos de Biogas*.

Moharir, R. V, Gautam, P., & Kumar, S. (2019). *Chapter 4 - Waste Treatment Processes/Technologies for Energy Recovery* (S. Kumar, R. Kumar, & A. B. T.-C. D. in B. and B. Pandey (Eds.); pp. 53–77). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64083-3.00004-X>

Montesinos, J. J. (s/f). *UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO Diseño y Construcción de un Intercambiador de Calor para el Biodigestor a Escala Piloto y Control de las Condiciones de Temperatura*.

Moreda, I. L. (2016). The potential of biogas production in Uruguay. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1580–1591. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.099>

- Mortier, N., Velghe, F., & Verstichel, S. (2016). Organic Recycling of Agricultural Waste Today: Composting and Anaerobic Digestion. En *Biotransformation of Agricultural Waste and By-Products: The Food, Feed, Fibre, Fuel (4F) Economy*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803622-8.00004-5>
- Nathalie Bachmann, E. S. A. (2013). 8 - Design and engineering of biogas plants. En A. Wellinger, J. Murphy, & D. B. T.-T. B. H. Baxter (Eds.), *Woodhead Publishing Series in Energy* (pp. 191–211). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857097415.2.191>
- Nguyen, D., Nitayavardhana, S., Sawatdeenarunat, C., Surendra, K. C., & Khanal, S. K. (2019). Chapter 31 - Biogas Production by Anaerobic Digestion: Status and Perspectives. En A. Pandey, C. Larroche, C.-G. Dussap, E. Gnansounou, S. K. Khanal, & S. B. T.-B. A. F. and C. P. for the P. of L. and G. B. (Second E. Ricke (Eds.), *Biomass, Biofuels, Biochemicals* (pp. 763–778). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816856-1.00031-2>
- Norte, E. (2011). *La basura podría tener otro destino* (D. Montero (Ed.)).
- Ometto, F., Karlsson, A., Ejlertsson, J., Björn, A. V., & Shakeri, S. Y. (2019). 5 - *Anaerobic digestion: an engineered biological process* (M. Materazzi & P. U. B. T.-S. N. G. from W. Foscolo (Eds.); pp. 63–74). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815554-7.00005-2>
- ONU. (1998). *PROTOCOLO DE KYOTO DE LA CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO*.
- OVACEN. (2014). *Conductividad térmica y densidad*. Editorial de Construcción Arquitectónica. <http://editorial.cda.ulpgc.es/ftp/icaro/Anexos/2%20CALOR/4%20Construccion/C.6.4%20Conductividad%20t%E9rmica%20y%20densidad.PDF>.
- Rao, M. N., Sultana, R., & Kota, S. H. (2017). *Chapter 2 - Municipal Solid Waste* (M. N. Rao, R. Sultana, & S. H. B. T.-S. and H. W. M. Kota (Eds.); pp. 3–120). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809734-2.00002-X>

- Rendón, A. F. M. (2012). *Caracterización de Residuos Sólidos*.
- Röder, M., & Welfle, A. (2019). *12 - Bioenergy* (T. M. B. T.-M. G. W. Letcher (Ed.); pp. 379–398). Academic Press.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814104-5.00012-0>
- Rushton, J.H., Costich, E.W. and Everett, H. J. (1950a). *Scientific Research An Academic Publisher*. Power Characteristics of Mixing Impellers. Chemical Engineering Progress.
- [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1185583](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1185583)
- Rushton, J.H., Costich, E.W. and Everett, H. J. (1950b). *Scientific Research An Academic Publisher*. Power Characteristics of Mixing Impellers. Chemical Engineering Progress.
- Sakurai, K. (2000). *HDT 17: METODO SENCILLO DEL ANALISIS DE RESIDUOS SOLIDOS* (O. P. de la Salud (Ed.)).
<http://www.bvsde.paho.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/hdt/hdt017.html>
- Scheehle Godwin, D., Ottinger, D., DeAngelo, B, E. (2006). *Global anthropogenic non-CO2 greenhouse gas emissions*.
- Sipra, A. T., Gao, N., & Sarwar, H. (2018). Municipal solid waste (MSW) pyrolysis for bio-fuel production: A review of effects of MSW components and catalysts. *Fuel Processing Technology*, 175, 131–147.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.02.012>
- Solorzano, J. D. V. (2016). *ANÁLISIS Y DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS REALES DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE MAQUINARIA, EQUIPO PESADO Y SU INFLUENCIA EN LOS COSTOS DE ALQUILER*. Universidad Tecnológica equinoccial.
- Speight, J. G. (2019). *1 - History and use* (J. G. B. T.-N. G. (Second E. Speight (Ed.); pp. 3–24). Gulf Professional Publishing.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809570-6.00001-1>

- Speight, J. G. (2020). *Chapter 5 - Hydrocarbons from coal* (J. G. B. T.-H. of I. H. P. (Second E. Speight (Ed.); pp. 193–242). Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809923-0.00005-9>
- Speight, J. G., & El-Gendy, N. S. (2018). *Chapter 1 - Petroleum Composition and Properties* (J. G. Speight & N. S. B. T.-I. to P. B. El-Gendy (Eds.); pp. 1–39). Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805151-1.00001-1>
- Spokas, K., Bogner, J., Chanton, J. P., Morcet, M., Aran, C., Graff, C., Golvan, Y. M.-L., & Hebe, I. (2006). Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems? *Waste Management*, 26(5), 516–525. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.07.021>
- Tan, T., Yu, J., & Shang, F. (2011). *2.58 - Biorefinery Engineering* (M. B. T.-C. B. (Second E. Moo-Young (Ed.); pp. 815–828). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00138-0>
- Thomas, P., & Soren, N. (2020). An overview of municipal solid waste-to-energy application in Indian scenario. *Environment, Development and Sustainability*, 22(2), 575–592. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0235-7>
- Uçkun Kiran, E., Stamatelatos, K., Antonopoulou, G., & Lyberatos, G. (2016). *10 - Production of biogas via anaerobic digestion* (R. Luque, C. S. K. Lin, K. Wilson, & J. B. T.-H. of B. P. (Second E. Clark (Eds.); pp. 259–301). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100455-5.00010-2>
- Urcuquí, G. A. D. M. (2014). *Actualización del Plan de Ordenamiento Territorial San Miguel de Urcuquí*.
- Velasco, J. G. (2009). *Energías renovables*. Editorial Reverte. https://books.google.com.ec/books?id=bl6L8E_9t1kC
- Vera, G. R. (2010). *Finanzas para Directivos* (IDE Business School (Ed.); 2da Edición). CODEGE (Corporación Ecuatoriana de Desarrollo y Gestión Educativa).

- Wong, J. W. C., Wang, X., & Selvam, A. (2017). *4 - Improving Compost Quality by Controlling Nitrogen Loss During Composting* (J. W.-C. Wong, R. D. Tyagi, & A. B. T.-C. D. in B. and B. Pandey (Eds.); pp. 59–82). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63664-5.00004-6>
- Xie, H., Wang, Q., Wu, J., & Chen, Y. (2019). Analytical model for methane migration through fractured unsaturated landfill cover soil. *Engineering Geology*, 255, 69–79. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.04.018>
- Xu, C. (Charles), Liao, B., Pang, S., Nazari, L., Mahmood, N., Tushar, M. S. H. K., Dutta, A., & Ray, M. B. (2018). *1.19 Biomass Energy* (I. B. T.-C. E. S. Dincer (Ed.); pp. 770–794). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00121-8>
- Yetilmezsoy, K. (2012). Integration of kinetic modeling and desirability function approach for multi-objective optimization of UASB reactor treating poultry manure wastewater. *Bioresource Technology*, 118, 89–101. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.088>

Anexos

Anexo 1. Producción diaria de biogás

Tiempo (días)	Experimento								
	Exp 1			Exp 2			Exp 3		
	S/I= 200	S/I= 2.2	Sin inóculo	S/I= 200	S/I= 2.2	Sin inóculo	S/I= 200	S/I= 2.2	Sin inóculo
1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,10	0,00	0,00	0,00	0,00
8,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,70	0,00	0,00	0,00	0,00
9,00	0,00	0,00	0,00	7,88	13,11	0,00	0,00	0,80	0,00
10,00	0,00	0,00	0,00	50,58	38,62	0,00	0,00	1,85	0,00
11,00	0,00	0,00	0,00	144,92	176,50	7,91	0,00	2,80	0,00
12,00	0,00	1,40	0,00	323,15	686,70	68,05	0,20	3,60	0,00
13,00	0,00	14,90	0,00	832,20	1773,67	173,14	0,60	4,30	0,00
14,00	30,16	350,90	0,00	1457,29	2948,63	323,54	6,68	20,79	0,00
15,00	460,93	1660,32	0,00	2173,98	3580,71	563,19	30,93	78,34	0,00
16,00	1526,10	2762,21	0,00	2826,49	3722,41	960,37	155,43	208,09	0,00
17,00	2183,16	3050,55	10,13	3213,26	3800,36	1321,30	1058,10	1048,49	6,37
18,00	2728,60	3333,95	34,07	3360,60	3813,62	1778,15	2053,30	2226,20	53,29
19,00	2856,10	3463,92	73,88	3387,30	3813,62	2279,56	2841,59	3455,73	279,56
20,00	2936,90	3553,45	121,08	3408,37	3813,60	2740,66	3172,90	3638,32	504,97
21,00	3003,10	3653,87	185,73	3423,40	3813,60	3060,95	3316,42	3663,99	972,56
22,00	3062,83	3674,17	283,36	3436,44	3813,60	3262,44	3382,55	3676,72	1628,75
23,00	3126,14	3693,29	437,14	3439,40	3813,60	3366,97	3399,70	3692,11	2282,06
24,00	3188,63	3715,38	708,33	3439,40	3813,60	3418,37	3408,89	3694,85	2685,42
25,00	3262,61	3743,90	1361,34	3439,40	3813,60	3428,23	3413,32	3697,05	2986,84
26,00	3290,20	3756,33	2181,90	3439,40	3813,60	3430,86	3413,80	3698,99	3224,87
27,00	3320,62	3756,82	2628,38	3439,40	3813,60	3430,86	3413,80	3700,11	3310,78
28,00	3340,63	3756,82	2993,77	3439,40	3813,60	3430,86	3413,80	3700,85	3347,62
29,00	3343,30	3756,82	3173,49	3439,40	3813,60	3430,86	3413,80	3701,22	3370,46
30,00	3343,30	3756,82	3222,10	3439,40	3813,60	3430,86	3413,80	3701,22	3388,28
31,00	3343,30	3756,82	3249,23	3439,40	3813,60	3430,86	3413,80	3701,22	3397,64
32,00	3343,30	3756,82	3281,00	3439,40	3813,60	3430,86	3413,80	3701,22	3398,18
33,00	3343,30	3756,82	3298,38	3439,40	3813,60	3430,86	3413,80	3701,22	3398,18
34,00	3343,30	3756,82	3300,60	3439,40	3813,60	3430,86	3413,80	3701,22	3398,18
35,00	3343,30	3756,82	3300,60	3439,40	3813,60	3430,86	3413,80	3701,22	3398,18

Anexo 2. Flujo de caja, escenario 1

Detalle	año 0	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5	año 6	año 7	año 8	año 9	año 10
amortización		138694,65	128584,32	118473,99	0,00	0,00					
Depreciación		6131,48	6131,48	6131,48	6131,48	6131,48	6131,48	6131,48	6131,48	6131,48	6131,48
Total, egresos		357057,37	357057,37	357057,37	357057,37	357057,37	357057,37	357057,37	357057,37	357057,37	357057,37
Utilidad bruta		70024,23	80134,56	90244,89	208718,88	208718,88	208718,88	208718,88	208718,88	208718,88	208718,88
Impuesto a la renta 25%		17506,06	20033,64	22561,22	52179,72	52179,72	52179,72	52179,72	52179,72	52179,72	52179,72
Utilidad neta		52518,17	60100,92	67683,67	156539,16	156539,16	156539,16	156539,16	156539,16	156539,16	156539,16
Reparto de la utilidad		6827,36	7813,12	8798,88	20350,09	20350,09	20350,09	20350,09	20350,09	20350,09	20350,09
utilidad de la empresa		4569,08	5228,78	5888,48	13618,91	13618,91	13618,91	13618,91	13618,91	13618,91	13618,91
		-									
Flujo neto	325090,98	41121,73	47059,02	52996,31	122570,16	122570,16	122570,16	122570,16	122570,16	122570,16	122570,16
% rendimiento		0,07	0,08	0,09	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21

Anexo 3. Flujo de caja, escenario 2

Detalle	año 0	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5	año 6	año 7	año 8	año 9	año 10
amortización		46231,55	42861,44	39491,33	0,00	0,00					
depreciación		6131,48	6131,48	6131,48	6131,48	6131,48	6131,48	6131,48	6131,48	6131,48	6131,48
Total, egresos		357057,37	357057,37	357057,37	357057,37	357057,37	357057,37	357057,37	357057,37	357057,37	357057,37
Utilidad bruta		162487,33	165857,44	169227,55	208718,88	208718,88	208718,88	208718,88	208718,88	208718,88	208718,88
Impuesto a la renta 25%		40621,83	41464,36	42306,89	52179,72	52179,72	52179,72	52179,72	52179,72	52179,72	52179,72
Utilidad neta		121865,50	124393,08	126920,66	156539,16	156539,16	156539,16	156539,16	156539,16	156539,16	156539,16
Reparto de la utilidad		15842,51	16171,10	16499,69	20350,09	20350,09	20350,09	20350,09	20350,09	20350,09	20350,09
utilidad de la empresa		10602,30	10822,20	11042,10	13618,91	13618,91	13618,91	13618,91	13618,91	13618,91	13618,91
		-									
Flujo neto	108363,66	95420,68	97399,78	99378,88	122570,16	122570,16	122570,16	122570,16	122570,16	122570,16	122570,16
% rendimiento		0,17	0,17	0,17	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21