



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
NICARAGUA,  
MANAGUA  
UNAN-MANAGUA

## Facultad Regional Multidisciplinaria, FAREM–Estelí

Evaluación de los residuos de cascarilla de arroz y café  
como sustratos para generación de biogás mediante el  
proceso biológico anaeróbico controlado

### **Trabajo monográfico para optar**

al grado de

### **Ingeniero en Energías Renovables**

### **Autores**

Lesly Amabec Aguilar Zeas

Katherine Nohelia Gutiérrez Lanuza

Maydelin Grissell Lanuza Blandón

### **Tutor**

Dr. Edwin Antonio Reyes Aguilera

Estelí, 28 de enero 2021



## **Dedicatoria**

*La gente positiva es la que se cae, se levanta, se sacude, se cura los raspones, sonríe a la vida y dice:*

*"all  voy de nuevo".*

(Anónimo)

A Dios, por la salud que nos da por ser nuestro refugio en tiempos difíciles, porque durante este caminar estuvo guiándonos con su infinita sabiduría, nos distes las fuerzas necesarias para no rendirnos ante tantos obstáculos, por tu amor lleno de bendic n de una gran familia y por estos años que nos acercaste a esas amistades incondicionales.

A nuestros padres por habernos forjado como las personas que somos en la actualidad; muchos de nuestros logros se los debemos a ustedes entre los que se incluye este. Nos formaron con reglas y con algunas libertades, pero al final de cuentas, nos motivaron constantemente para alcanzar nuestros más grandes anhelos.

A esos hombres especiales que nos brindaron su ayuda que ha sido sumamente importante, estuvieron en los momentos y situaciones más difíciles. No fue sencillo culminar con éxito este proyecto, sin embargo, siempre fueron muy motivadores y alentadores durante todo este largo camino, nos ayudaron hasta donde se les era posible, incluso más que eso.

A la memoria de un ser especial y gran amigo incondicional que hoy no se encuentra con nosotras pero que estamos seguras que siempre tendríamos su apoyo, a nuestro querido amigo y colega Orlando Francisco Pérez Corrales.

## **Agradecimientos**

En primer lugar, agradecemos a Dios nuestro padre celestial por su infinita misericordia por darnos el regalo más preciado que es la vida y la oportunidad de poder concluir con el esfuerzo de más de cinco años que nos ha llevado nuestra carrera a la que le hemos puesto toda nuestra Fe, amor, paciencia, sacrificio y sobre todo nuestro tiempo.

Agradecemos a nuestros padres que son nuestro pilar fundamental, que sin su apoyo hoy no estaríamos en esta etapa tan maravillosa, por todo el esfuerzo que hicieron para que hoy por hoy estemos por culminar nuestra carrera profesional, por los principios y valores que nos inculcaron y por toda la paciencia y motivación que siempre estaban dispuestos a darnos.

A nuestro tutor Dr. Edwin Antonio Reyes Aguilera por el apoyo, comprensión y confianza que nos brindó para la realización de nuestra tesis, además de darnos motivación y su amistad que nos permitieron aprender mucho más que lo estudiado en nuestra investigación.

Al M.Sc Oscar Rafael por la ayuda brindada para la realización de nuestra tesis.

A nuestra alma mater FAREM-ESTELI por habernos permitido ser parte de ella y darnos la oportunidad de realizarnos como profesional durante estos años, así como también a los diferentes docentes que nos brindaron sus conocimientos y su apoyo para seguir adelante.

## **CARTA AVAL DEL TUTOR DE MONOGRAFÍA DE GRADO**

Por este medio, hago constar que el documento de monografía de grado titulado **“Evaluación de los residuos de cascarilla de arroz y café como sustratos para generación de biogás mediante el proceso biológico anaeróbico controlado”**, elaborado por, Lesly Amabec Aguilar Zeas; Katherine Nohelia Gutiérrez Lanuza; Maydelin Grissell Lanuza Blandón, tiene la coherencia metodológica consistente, así como criterios estadísticos, cumpliendo de esta manera con los parámetros de calidad necesarios para su defensa final, como requisito parcial para optar al grado de Ingeniero en Energías Renovables que otorga la Facultad Regional Multidisciplinaria de Estelí, FAREM Estelí, de la UNAN-Managua.

Se extiende la presente constancia en la ciudad de Estelí a los veinte y cuatro días del mes de enero del año dos mil veintiuno.

**Atentamente**



**Dr. Edwin Antonio Reyes Aguilera**

**Profesor Titular de UNAN Managua/FAREM-Estelí**

**ID ORCID: 0000-0002-0996-1567**

## **Resumen**

La presente investigación tuvo como objeto la evaluación de los residuos de cascarilla de arroz y café como sustratos para generación de biogás mediante el proceso biológico anaeróbico controlado. Este estudio se basa en el enfoque filosófico cuantitativo, descriptivo según el nivel de profundidad, el método de investigación es experimental, de acuerdo con el alcance y análisis de los resultados el estudio es analítico. Los tratamientos seleccionados fueron: cascarilla de café y cascarilla de arroz. La caracterización de las propiedades básicas de los tratamientos en estudio basó en la norma APHA/SM 2540-B. Se aplicaron entrevistas a docentes investigadores de la Estación Experimental El Limón. Los resultados determinaron según el análisis de varianzas univariadas que no existen diferencias significativas entre los tratamientos en estudio, los pH obtenidos en los rangos de temperatura (Mesofílico y Termofílico) estuvieron dentro de los rangos óptimos. Se demostró que el sustrato de cascarilla de café tuvo mayor rendimiento que la cascarilla de arroz en el régimen de temperatura Termofílico para la obtención de biogás. Se concluyó los sustratos en estudio presentaron similitud en las medias obtenidas, por lo tanto, no existe diferencias significativas entre ambos tratamientos. La cascarilla de café presentó mayor cantidad de biogás producidos.

Palabras clave: Generación de biogás, proceso biológico, residuos.

# Índice

Capítulo I.....	9
1.1 Introducción .....	9
1.2 Planteamiento del problema.....	10
1.2.1 Caracterización del problema .....	10
1.2.2 Delimitación del problema .....	10
1.2.3 Formulación del problema.....	11
1.2.4 Sistematización del problema.....	11
1.3 Justificación .....	12
1.4 Objetivos.....	13
Objetivo general.....	13
Objetivos específicos .....	13
Capítulo II.....	14
2.1 Antecedentes.....	14
2.2 Marco Teórico .....	16
2.2.1 Biomasa.....	16
2.2.2 Biomasa residual .....	17
2.2.3 Fuentes de la biomasa.....	19
2.2.4 Generalidades del arroz .....	20
2.2.5 Descripción general .....	20
2.2.6 Ventajas de la Cascarilla de Arroz .....	21
2.2.7 Desventajas de la Cascarilla de arroz .....	22
2.2.8 Arbusto del café.....	22
2.2.9 Fruto del café.....	22
2.2.10 Cascarilla de Café.....	24
2.2.11 Procesos biológicos .....	25
2.2.12 Digestión aerobia.....	25
2.2.13 Digestión anaerobia .....	26
2.2.14 Fermentación anaeróbica.....	27
2.2.15 Respiración anaeróbica.....	27
2.2.16 Fases del proceso de digestión anaerobia .....	28

2.2.17	Factores que influyen en el proceso metanogénico .....	30
2.2.18	Tipo de materia prima.....	31
2.2.19	Temperatura.....	32
2.2.20	Valor de la acidez (pH).....	35
2.2.21	Relación DBO Y DQO .....	37
2.2.22	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).....	37
2.2.23	Demanda Química de Oxígeno (DQO) .....	38
2.2.24	Tiempo de retención .....	39
2.2.25	Composición de la materia orgánica .....	40
2.2.26	Humedad.....	40
2.2.27	Sólidos totales o masa seca.....	40
2.2.28	Sólidos Volátiles (SV).....	42
2.2.29	Sólidos Fijos (SF).....	42
2.2.30	Relación carbono/nitrógeno (C/N).....	42
2.2.31	Ventajas de la digestión anaerobia .....	43
2.2.32	Proceso .....	43
2.2.33	Producto final .....	44
2.2.34	Energía.....	45
2.2.35	Biodigestores .....	45
2.2.36	Tipos de biodigestores por su forma.....	45
2.2.37	Pozos sépticos.....	46
2.2.38	Biodigestor del domo flotante (indio) .....	46
2.2.39	Biodigestor de domo fijo (chino) .....	47
2.2.40	Biodigestor de estructura flexible.....	48
2.2.41	Sistemas batch o discontinuo.....	49
2.2.42	Biogás .....	49
2.2.43	Composición del biogás .....	50
2.3	Hipótesis .....	51
Capítulo III .....		52
3.1	Diseño metodológico .....	52
3.1.1	Tipo de estudio.....	52
3.1.2	Área de estudio .....	53

3.1.2.1 Ubicación geográfica.....	53
3.1.2.2 Área de conocimiento.....	53
3.2 Universo y muestra .....	54
3.3 Matriz de operación de variables .....	55
3.4 Métodos, técnicas e instrumentos para la recolección de datos e información .....	57
3.5 Procedimientos para la recolección de datos e Información.....	57
3.6 Plan de tabulación.....	63
Capítulo IV .....	64
4.1 Resultados y discusión .....	64
4.1.1 Caracterización de los parámetros fisicoquímicos de la cascarilla de arroz y café como materia orgánica biodegradable. ....	64
4.1.2 Determinación de la producción de biogás generado en un biodigestor a escala de laboratorio a partir de los residuos orgánicos del café y arroz. ....	76
4.1.3 Determinar el efecto de la temperatura y pH en la producción de biogás que se obtiene en el proceso biológico anaeróbico controlado.....	80
Capítulo V .....	83
5.1 Conclusiones .....	83
5.2 Recomendaciones .....	84
5.3 Bibliografía .....	85
5.4 Anexos .....	91



# Capítulo I

## 1.1 Introducción

El desarrollo de la sociedad humana está basado en el consumo de grandes cantidades de energía. Los principales recursos energéticos utilizados (carbón, petróleo y gas natural) son limitados y, por lo tanto, pueden agotarse, además, su utilización provoca un gran impacto ambiental en la biósfera al contaminar aire, agua y suelo. Estos hechos han generado un interés creciente por el desarrollo de nuevas tecnologías para la utilización de alternativas fuentes de energía renovables.

La biomasa puede considerarse como la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. Estos recursos biomásicos pueden agruparse de forma general en agrícolas y forestales. También se considera biomasa la materia orgánica de las aguas residuales y los lodos de depuradora, así como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, y otros residuos derivados de las industrias.

Un biodigestor es un contenedor hermético que permite la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas y facilita la extracción del gas resultante para su uso como energía. El biodigestor cuenta con una entrada para el material orgánico, un espacio para su descomposición, una salida con válvula de control para el gas y una salida para el material ya procesado (bioabono).

El presente trabajo tiene como propósito desarrollar un estudio de producción de biogás a partir de desechos de cascarilla de arroz y café. Este estudio se rige por el enfoque filosófico, por el uso de instrumentos de recolección de la información, análisis y vinculación de datos, el presente estudio se realizará mediante un enfoque cuantitativo de investigación.

La investigación es de mucha importancia ya que el biogás generado en la fermentación de los sustratos puede utilizarse en estufas convencionales, como una forma de energía sustentable que funcionarán a base de dicho combustible (cascarilla de arroz y café) son una más de las alternativas energéticas sustentables para las comunidades rurales.

## **1.2 Planteamiento del problema**

### **4.1.2 Caracterización del problema**

En la actualidad, el consumo de gas se ha convertido en parte fundamental para la subsistencia de los hogares nicaragüenses, ya que es utilizado como medio para poder cocinar los alimentos, lo que hace que aumente la dependencia de este como consumo de energía no renovable. Por otro lado, en las zonas rurales y algunas zonas urbanas al no poder alcanzar este medio optan por la obtención de fuego a partir de la leña por lo cual el país está siendo afectado por graves problemas ambientales debido a la tala de los bosques.

Además de los problemas que ocasionan a la salud provocando enfermedades respiratorias, enfermedad pulmonar obstructiva crónica, cataratas etc. Todo esto debido al uso de la leña que es utilizado en un gran porcentaje en las zonas rurales y urbanas afectando mayoritariamente a mujeres y niños, ya que no cuentan con recursos para utilizar cocinas convencionales ni gas butano además de dificultarles el traslado de este debido a la distancia de la zona rural a la urbana o por la compra debido al precio.

### **4.1.3 Delimitación del problema**

En las zonas rurales y cafetaleras de Nicaragua generalmente vierten la cascarilla de café en las corrientes fluviales en las épocas de cosechas lo que es altamente contaminante, produciendo daños a la salud e incluso la muerte de las personas y animales vacunos debido a que se abastecen y consumen las aguas de estos ríos contaminados. Estos residuos sin tratar procedentes de las industrias tradicionales y modernas de procesamiento del café están amenazando las aguas superficiales siendo la contaminación de mayor persecución en las zonas productoras.

El proceso industrial del arroz en Nicaragua genera grandes cantidades de residuos provenientes tanto del grano nacional como importado, los cuales representan un aproximado de unas 40,000 toneladas métricas de subproducto. Donde una gran parte de

ello es incinerada al aire libre generando gases de efecto invernadero CO<sub>2</sub>, la sílice que contiene la cascarilla de arroz afecta las corrientes de agua cercanas donde es desechado el sub-producto resultante del proceso de combustión controlada.

Debido al problema antes mencionado, un cierto porcentaje de la población que habita cerca de las cafetaleras y arroceras se ven afectados por la contaminación que estos desechos provocan en los ríos donde ellos se abastecen para su consumo y el humo provocado por la quema de estos residuos.

#### **4.1.4 Formulación del problema**

A partir de la caracterización y delimitación del problema antes expuesto, se plantea la siguiente pregunta del presente estudio: ¿Cuáles son los procedimientos para evaluar los residuos de cascarilla de arroz y café como sustratos para generación de biogás mediante el proceso biológico anaeróbico en condiciones controladas en sus tres rangos de temperatura?

#### **4.1.5 Sistematización del problema**

1. ¿Cuáles son las características de los parámetros fisicoquímicos de la cascarilla de arroz y café como materia orgánica biodegradable?
2. ¿Cuánto será la producción de biogás generado en un biodigestor a escala de laboratorio a partir de los residuos orgánicos del café y arroz?
3. ¿Cuál será el efecto de la temperatura y el pH en la producción de biogás que se obtiene en el proceso biológico anaeróbico controlado?

### **1.3 Justificación**

Generar biogás como fuente de combustible utilizando la cascarilla de café y cascarilla de arroz, contribuye a disminuir la contaminación, así mismo es una opción viable de la que se obtiene energía para cocción de alimentos sobre todo de la zona rural de nuestro país y de cualquier otro que genere estos residuos; por lo tanto este combustible tiene un impacto ambiental significativo.

Aprovechar estos sustratos para generar biogás puede ser de mucha importancia en empresas donde deban calentar agua u otros productos e incluso aquellas empresas en las que su actividad económica es acopio y venta de café procesado; sin embargo, el aprovechamiento de estos residuos orgánicos es una gran opción de producción de energía en las zonas rurales donde no se tiene el alcance para la utilización del gas convencional.

Con esta investigación se pretende que la población en general conozca la alternativa de aprovechamiento de estos desechos (cascarilla de arroz y café), y así puedan implementarse nuevas tecnologías para reducir la tala indiscriminada que genera el consumo excesivo de leña, la contaminación ambiental y enfermedades. Además de evaluar el potencial energético producido por estos sustratos orgánicos.

El estudio tiene viabilidad para realizarse debido a que los residuos de café y arroz se encuentran en abundantes cantidades, tienen bajo costo de adquisición (o nulo), representan un factor de contaminación ambiental y podrían producir una cantidad de biogás razonable.

El presente estudio también se justifica el hecho que son pocas las investigaciones realizadas sobre este tipo de residuo con fines energéticos y principalmente para producción de biogás, por lo tanto contribuirá a la generación de nuevo conocimiento disponible y útil para estudios posteriores.

## **1.4 Objetivos**

### **Objetivo general**

Evaluar los residuos de cascarilla de arroz y café como sustratos para generación de biogás mediante el proceso biológico anaeróbico en condiciones controladas en sus tres rangos de temperatura.

### **Objetivos específicos**

1. Caracterizar los parámetros fisicoquímicos de la cascarilla de arroz y café como materia orgánica biodegradable.
2. Determinar la producción de biogás generado en un biodigestor a escala de laboratorio a partir de los residuos orgánicos de café y arroz.
3. Analizar el efecto de la temperatura y el pH en la producción de biogás que se obtiene en el proceso biológico anaeróbico controlado.

## Capítulo II

### 2.1 Antecedentes

En Nicaragua, durante los años 80, luego de la crisis del petróleo en 1979, las energías renovables tuvieron un primer impulso, con el apoyo de organismos como la FAO, y la Cooperación Bilateral. En particular, en la década de los 80 se realizaron esfuerzos en Nicaragua para producir Biogás especialmente a pequeña escala. “En 1990, se realizó un estudio sobre la situación del biogás en el país, concluyendo dicho estudio que de 62 biodigestores construidos durante la década de los 80, el 32% estaba activo (del cual el 10% en reactivación), el 60% estaba abandonado o no estaba funcionando y el 8% estaba en construcción. Las instalaciones en ese momento, se ubicaban principalmente en los departamentos de Chinandega, León, Matagalpa, Jinotega, Estelí y Madriz (Moltalván & Zelaya Rayo, 2015).

Montalván y Zelaya (2015), afirman que durante el período 1990-2004, se estima que se han construido aproximadamente 1,000 biodigestores a nivel domiciliario, principalmente del tipo Taiwán, la mayoría construidos durante 2000-2004. El estudio realizado por el MEM indica que de una muestra de casi 200 biodigestores construidos antes de 2005 solo un 8% está en funcionamiento. En 2005 fueron construidos 31 biodigestores en rastros municipales, fincas pequeñas y haciendas de café, en éstas últimas se ubican la mayor parte de biodigestores activos.

En octubre de 2011 la empresa CISA Exportadora, inaugura una planta de biogás, actualmente se encuentra produciendo energía eléctrica, opera en el beneficio del café El Carmen, Diriamba, Carazo, generando biogás a partir del tratamiento de aguas mieles (Moltalván & Zelaya Rayo, 2015).

Olano (2018), en su estudio “Producción de biogás a partir de aguas mieles y pulpa de café (*arabica*)”, llegó a la conclusión de que a partir de los estudios realizados con una mezcla conformado por pulpa de café, estiércol de ganado vacuno y agua miel obteniendo se obtuvo una producción de 1320 ml de biogás determinando que a mayor temperatura mayor será la producción de biogás en los tratamientos. La producción de biogás a partir de las

aguas mieles y pulpa de café, es una propuesta viable para sustituir la leña que emplea una familia caficultora en la cocción de alimentos.

Cruz (2015), en su estudio “Producción de biogás en sustrato sólido mediante la digestión anaerobia de pulpa de café”, llega a la conclusión que si, se utilizara la pulpa de café no sólo se estaría evitando la emisión de gases de efecto invernadero, disminuyendo el impacto ambiental, sino que también el biogás producido, de acuerdo a sus propiedades calóricas, puede complementar los requerimientos de energía calorífica dentro de la industria del café, y en cuanto a la generación de energía eléctrica, se podría generar hasta un 0.051% de la generación bruta nacional lo cual podría cubrir un 15% de los clientes en el sector agrícola obteniendo un 8163 L de metano.

Quiceno (2010), en su tesis “Alternativa tecnológica para el uso de la cascarilla de arroz como combustible”, llega a la conclusión de que se obtuvo un rendimiento del 25% es decir que por cada tonelada de cascarilla de arroz; se obtuvieron 250 litros de etanol y que el gas se puede aprovechar para realizar una mezcla con el diésel de las plantas de generación eléctrica.

Rojas (2018), en su estudio “Generación de biogás a partir de la cascarilla de arroz para reducir costos energéticos en la píladora la Merced S.R.L”, obtiene como resultado un potencial energético de la cascarilla de arroz de la Piladora la Merced muy elevada, ello se debe a que se obtiene más de 100 toneladas mensuales durante el proceso de pilado de arroz, lo que permite producir un gas combustible con gran contenido energético. Por ello, el molino dispone de muchas posibilidades para aprovechar la energía contenida en este gas, lo cual posibilita plantear un proyecto de generación de biogás para la producción de electricidad, logrando un tratamiento responsable de este residuo y reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub>. El biodigestor modelo chino o cúpula fija se considera la opción más viable para la instalación del sistema de generación de biogás en este proyecto.

## **2.2 Marco Teórico**

### **4.1.6 2.2.1 Biomasa**

La biomasa, según el diccionario de la Real Academia Española, “es la suma total de la materia de los seres que viven en un lugar determinado, expresada habitualmente en peso estimado por unidad de área o de volumen, cuya medida es de interés en ecología como índice de la actividad o de la producción de energía de los organismos”. Por tanto, el término biomasa incluye toda la materia viva existente en un instante de tiempo en la delgada capa superficial de la Tierra denominada biosfera (Carta González, Calero Pérez, Colmenar Santos, & Castro Gil, 2009).

Otro concepto, se entiende por biomasa cualquier tipo de materia orgánica renovable de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma. Estos materiales tienen como nexo común su origen directo o indirecto del proceso de fotosíntesis. Por eso se presenta de forma periódica y no limitada en el tiempo, es decir, de forma renovable. Quedan, por tanto, fuera de este concepto los combustibles fósiles o los productos orgánicos derivados de éste, aunque también tuvieran un origen biológico (Segalás, y otros, 2011).

Carta et al., (2009) indican que la biomasa primaria es la energía solar convertida por la vegetación, mediante el proceso de la fotosíntesis en materia orgánica (energía química almacenada). Sin embargo, esta biomasa puede ser transformada por otros seres vivos que se nutren de la misma y generan la denominada biomasa animal o biomasa de los residuos de los animales.



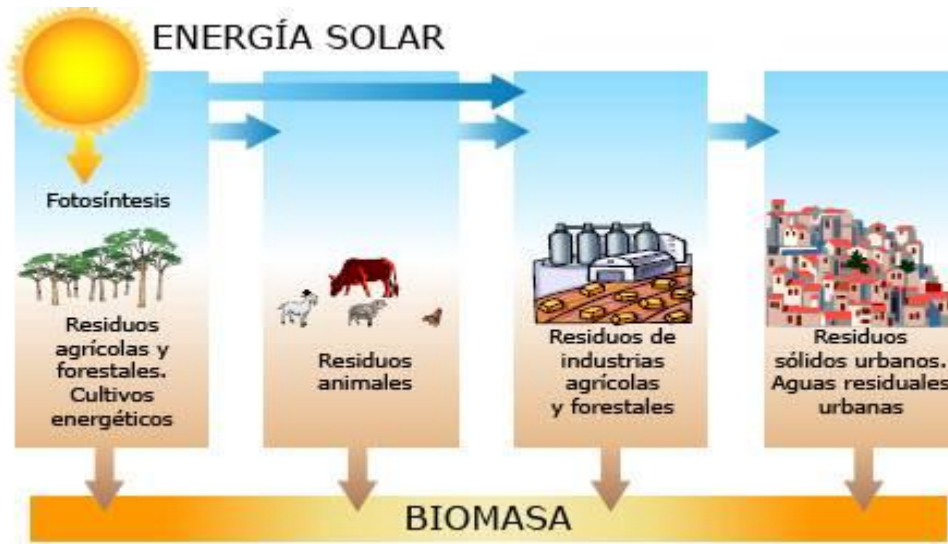


Figura 1. Fuentes de biomasa.

Fuente: Monografías.com

#### 4.1.7 Biomasa residual

La biomasa residual comprende los subproductos derivados de determinadas actividades ganaderas, agrícolas, forestales, industriales, domesticas, etc., que suelen denominarse biomasa residual.

Los residuos ganaderos constituyen una parte de la denominada biomasa animal. Carta et al. (2009, pág. 481), definen este tipo de residuos está formado por determinados subproductos generados por animales vivos (por ejemplo, material de la cama y deyecciones sólidas, que constituyen el denominado estiércol y material procedente de deyecciones líquidas y aguas de lavado que se suelen denominar en España como purines), o muertos (por ejemplo, huesos, pellejos, etc.), que son biodegradables y pueden descomponerse utilizando mecanismos apropiados para generar biogás.

Carta et al., (2009, págs. 428,486), dividen la biomasa residual en:

- ✓ **Las aguas residuales urbanas**

(ARU), constituyen los efluentes líquidos que producen los seres humanos, por tanto, se clasifican dentro de la denominada biomasa animal.

Una parte de estos residuos, una vez tratados, pueden destinarse a la generación de biogás.

#### ✓ **Los residuos agrícolas**

Se caracterizan por su estacionalidad y se obtienen de los restos de cultivos o de limpiezas que se hacen del campo para evitar las plagas o los incendios. Estos residuos pueden ser clasificados en dos grupos: los residuos herbáceos (plantas verdes, pajas, cascarillas de cereales, tallos, etc.) y los residuos leñosos (restos de podas, ramas, etc.)

Los residuos herbáceos que tienen valor energético, y que no se destinan a la alimentación de animales (uso más frecuente), pueden emplearse como combustibles.

Actualmente, algunos de los residuos leñosos se suelen usar como combustibles en el sector doméstico y otros, simplemente, se incineran para deshacerse de los mismos.

#### ✓ **Los residuos forestales**

Pueden clasificarse en dos grupos: en un grupo se encuentran los residuos procedentes del proceso de mantenimiento (limpieza de matorrales, podas etc.) de montes y bosques y los residuos que se generan en las limpiezas de los troncos de árboles, que se talan para ser usados como materia prima en las industrias forestales.

#### ✓ **Los residuos industriales**

Se generan en un amplio número de sectores industriales, sin embargo, solo las industrias que generan volúmenes considerables de residuos orgánicos son las que pondría presentar interés a la hora de aprovechar la energía de la biomasa. En este contexto pueden señalarse las industrias forestales y las industrias agroalimentarias y agrícolas.

#### ✓ **Los residuos sólidos urbanos**

(RSU) son, según la definición de la biomasa residual, una parte de los desechos (basura) que la humanidad genera en su domicilio (restos de alimentos, papel, etc.) estos residuos se incluyen dentro de la denominada biomasa vegetal, sin embargo, su aprovechamiento energético presenta algunas diferencias con los del resto de la biomasa.

### ✓ **Cultivos energéticos**

Existen determinados cultivos energéticos que se realizan exclusivamente de cara a su aprovechamiento energético. También pueden tener un aprovechamiento energético diferentes tipos de productos agrícolas (Sagalás et al. 2011).

Se pueden diferenciar dos tipos de cultivos energéticos:

- Los orientados a la producción de materiales leñosos, mediante especies de crecimientos rápidos y con turnos de aprovechamiento de ciclo corto y especies herbáceas caracterizadas por su gran producción de materiales combustibles. Todos estos materiales pueden ser orientados a un aprovechamiento vía termoquímica o a la obtención de biocombustibles.
- Los orientados a la producción de otros tipos de materias vegetales mediante especies de ciclo anual, destinada a la obtención de biocombustibles.

También es posible utilizar como combustible el resultante del proceso de esterificación de diferentes aceites vegetales. Sagalás et al. (2011, pág. D10) afirman que para la obtención de algunos aceites se pueden utilizar productos oleaginosos como la colza, el girasol, etc. Finalmente, una característica común a todos los cultivos energéticos es la posibilidad de asociar la producción de los materiales a los sistemas de aprovechamiento, aprovechando simultáneamente las ventajas de la educación de las materias primas en las instalaciones y todos los aspectos favorables relacionados con el carácter local de los proyectos.

#### **4.1.8 Fuentes de la biomasa**

Las fuentes de la biomasa son inagotables al referirse a los procesos cíclicos del medio ambiente y a las actividades del ser humano. En cuanto a la clasificación de la biomasa producida como residual se puede describir las principales fuentes (García Garrido, 2009).

##### **Granjas o fincas**

- Estiércol y orín de ganado (vacuno, porcino, equino, aves, etc.)
- Purines

## **Residuos de vegetales**

- Beneficio de café
- Cascara de diversos vegetales, etc.
- Residuos de algodón
- Fibras de coco y hojas de árboles.

## **Ciudades y poblados**

- Excremento y orín humano
- Residuos sólidos municipales orgánicos

## **Industrias**

Residuos orgánicos de:

- Industria de bebida
- Piscicultura
- Industria de papel
- Industria alimenticia

### **4.1.9 Generalidades del arroz**

#### **4.1.10 Descripción general**

El arroz es una gramínea anual, de tallos redondos y huecos compuestos por nudos y entrenudos, hojas de lámina plana unidas al tallo por la vaina y su inflorescencia es una panícula. Se cultiva en todo el territorio nacional en alturas entre 0 a 800 m.s.n.m y presenta un crecimiento óptimo a temperaturas de 25-30 °C, siendo la máxima hasta 40 °C (Arias Ortis & Meneses Cruz, 2016).

Ortis y Meneses (2016) mencionan que, en Nicaragua, el arroz es uno de los cultivos más importantes dentro del sector agropecuario nacional y al mismo tiempo uno de los principales alimentos en la dieta de los nicaragüenses con un consumo per cápita de 123

lb/año con tendencia a incrementarse, el sector arrocero produce 5.1 millones de quintales esto equivale a 70 % de consumo nacional.

A nivel nacional se siembra 59 mil mz arroz de riego (Granada, Matagalpa y Managua) y 41 mil arroces secano (RAAN, Rivas y Chinandega). De las 62 mil 500 mz de granos básicos con riego, el arroz de riego representa el 95 %. De los 24 mil 442 productores de arroz a nivel nacional el 92 % son productores de secano. Actualmente los índices de rendimientos nacionales en el arroz de riego son de 75 qq/mz de Arroz Seco y limpio, superior a los 26-32 qq/mz de Arroz Seco y limpio que se obtienen en los sistemas de producción de arroz de secano donde la única fuente de agua es la lluvia (Ortis y Meneses, 2016).

Ortis y Meneses (2016) mencionan que la cascarilla de arroz es un subproducto de la industria molinera, que resulta de la separación del grano de arroz de los residuos, está es un sustrato orgánico de baja tasa de descomposición, liviano, buen drenaje, buena aireación. El principal inconveniente que presenta la cascarilla de arroz es su baja capacidad de retención de humedad y lo difícil que es lograr el reparto homogéneo de la misma (humectabilidad).

La cascarilla de arroz, por sus características, presenta un 10% de humedad aproximadamente, aunque esta varía dependiendo de las zonas.

Además, es una buena fuente energética para todas las especies, y sobre todo para rumiantes, dado su alto contenido en grasa (12-15%), su apreciable contenido de almidón (23-28%), bajo grado de lignificación (2,5 %) y fracción fibrosa (17.5 %). Tiene también un notable contenido en proteína, con una composición en aminoácidos esenciales relativamente equilibrada. Su contenido en fósforo es bastante alto (1.35%) pero en su mayor parte (90%) está en forma de filatos (Arias Ortis & Meneses Cruz, 2016).

#### **4.1.11 Ventajas de la Cascarilla de Arroz**

Es más fácil de encontrar; la cascarilla de arroz es mucho más fácil de conseguir que la de café. En el trillo de los Torres en ciudad Sébaco, se puede ingresar y hablar con los propietarios y no piensan dos veces en decir, que pase adelante y se lleve toda la cascarilla

que quieran, debido que a ellos la cascarilla les genera gastos cuando no llega la rastra a retirar decenas de quintales de cascarilla. Sucede lo mismo con los otros trillos existentes en la región, ya que todos estos propietarios toman la cascarilla como un desecho que no vale nada y que más bien genera gastos (García Rivas & Estrada Siria, 2016).

#### **4.1.12 Desventajas de la Cascarilla de arroz**

Una de las desventajas más importantes que posee la cascarilla de arroz es que su poder calorífico es menor que la que posee la cascarilla de café, la cascarilla de arroz posee 13800 kJ/kg. Otra desventaja que posee esta cascarilla es su combustión, la combustión se dificulta debido a la característica física que posee la cascarilla de arroz, ya que su forma es cerrada, y al momento de iniciar el proceso de combustión dilata más tiempo en realizar este proceso (García Rivas & Estrada Siria, 2016).

#### **4.1.13 Arbusto del café**

Existe una variedad grande de arbusto de café, aunque son solamente dos tipos de café los que más se han comercializado, estos son los géneros coffee Arábica y coffee canephora (comúnmente conocido como Robusta). El primer género se caracteriza por su crecimiento lento delicado y menos producido que la Robusta, se cultiva en regiones altas entre los 900 y 2000 m.s.n.m. El género robusto es más productivo y se puede cultivar en lugares más bajos que el Arábica. Este último se caracteriza por producir un café fino y aromático en Nicaragua el café Arábica es el que se exporta (Martinez Quant & Romero, 2017).

#### **4.1.14 Fruto del café**

Martínez y Romero (2017), afirman que los frutos del café se cosechan en América Central desde finales de agosto hasta el mes de marzo, dependiendo de la altitud sobre el nivel del mar de la plantación de café. El café de tierra cálida madura más temprano que el de tierra fría. Los frutos se cosechan al llegar a su madurez, lo que se advierte por el color marrón intenso que adquiere el grano, aunque existen también variedades que presentan un color amarillo cuando están maduras.

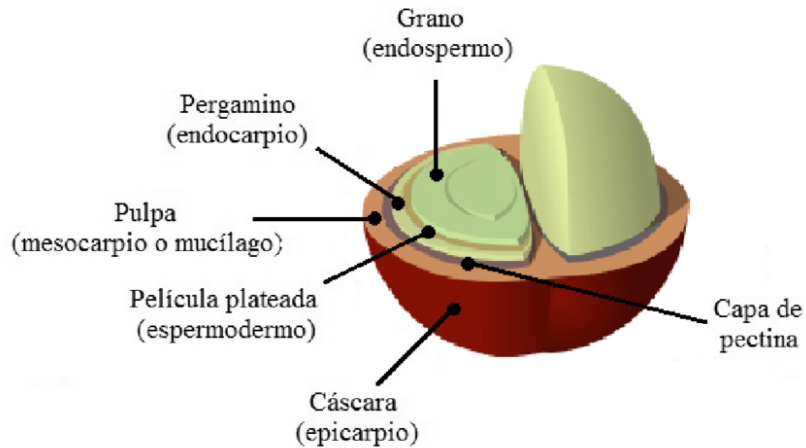


Figura 2. Composición del fruto del café.

Fuente: Monografia.com

### **Deshechos del procesado húmedo de café**

Según Martínez y Romero (2017), generalmente estos subproductos son desechados como basura y de preferencia de la manera más rápida posible. Muchas veces en río, lo que ha llegado a contaminar grandemente cursos de aguas naturales. Sin embargo, últimamente cada vez es mayor el número de informes que se producen sobre el uso beneficiario que se puede extraer de ellos. En la siguiente figura puede apreciar el uso que le puede dar a los deshechos del café.

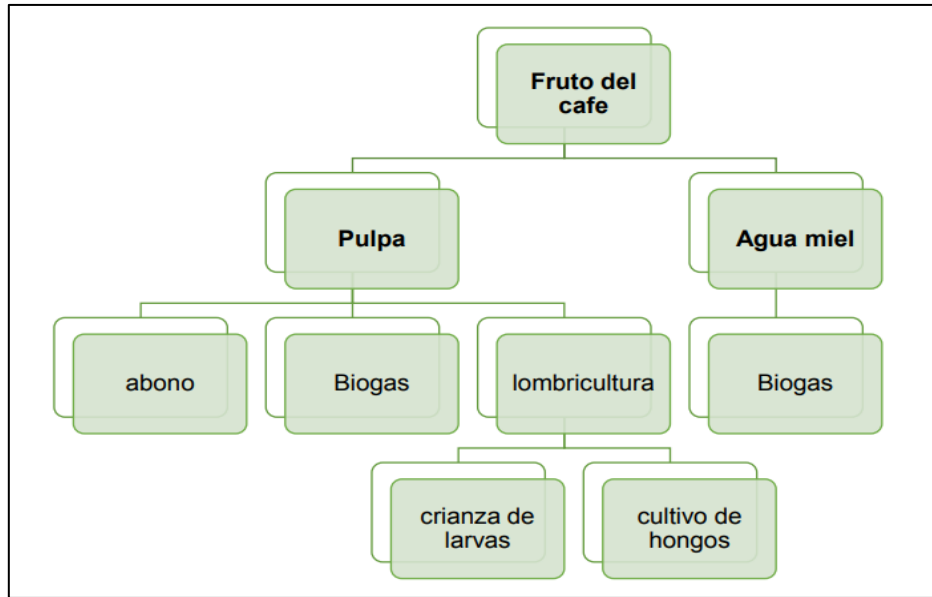


Figura 3. Desechos y utilidades del fruto del café.

Fuente: Manual de construcción y operación de biodigestor tipo hindú y flujo continuo.

#### 4.1.15 Cascarilla de Café

La cascarilla de café es la capa gruesa de la cereza y representa cerca del 43% del peso. Debido a la cantidad que representa en peso, es el residuo que aporta el mayor porcentaje de contaminación al balance global, por tanto, se considera una gran fuente de investigación en la fabricación de nuevos productos. Está constituida por un alto contenido de azúcares, por lo que su potencial industrial es grande. De acuerdo con estudios realizados por (Roa, 2003), la cascarilla del café presenta un poder calorífico aproximado a 4180 cal/g o 7458 kcal/kg, cuya composición en material volátil es de 87.7% y el tamaño de la cascarilla ronda entre 0.425 y 2.36 mm de diámetro. Tomando en cuenta estas propiedades, se puede considerar como materia prima apta para la elaboración de biocombustibles (Arias Ortis & Meneses Cruz, 2016).



García y Estrada (2016), definen:

### **Ventajas de la Cascarilla de Café**

La ventaja más importante de esta cascarilla es que posee un poder calorífico de 16700 kJ/kg, un valor por encima de las características del poder calorífico que posee la cascarilla de arroz. Este poder calorífico que presenta la cascarilla de café hace que la producción de energía eléctrica a partir de la cascarilla de café resulta más eficiente que la cascarilla del arroz, porque lo que se necesita en nuestro proyecto esencialmente es el vapor; que se producirá con la quema de ambas cascarillas. Otra de las ventajas que posee la cascarilla de café, está relacionada con la combustión.

Esta cascarilla tiene excelente combustión en comparación con la cascarilla de arroz, debido a las características físicas que posee, a lo contrario de la cascarilla del arroz que su forma es cerrada, en la cascarilla de café es lo contrario, del grano se forman unas capas delgaditas, que cuando esta pierde toda su humedad, solo es necesario poner un cerillo en ella e inicia su proceso de combustión en su totalidad.

#### **4.1.16 Procesos biológicos**

En estos procesos la biomasa húmeda se degrada gracias a la acción de microorganismos, que contiene la biomasa o que se incorporan al proceso, obteniéndose productos de alta densidad energética (Carta et al. 2009).

#### **4.1.17 Digestión aerobia**

La digestión aeróbica consiste en procesos realizados por diversos grupos de microorganismos, principalmente bacterias y protozoos que, en presencia de oxígeno actúan sobre la materia orgánica disuelta, transformándola en productos finales inocuos y materia celular (FAO, 2011).

FAO (2011), menciona que, al comienzo el proceso de digestión aeróbica tuvo escasa aceptación, debido a que se desconocían sus principios fundamentales, además de que encarecían los costos del tratamiento por la cantidad adicional de energía necesaria para el

suministro de aire al proceso. En contraste, los procesos de digestión anaeróbica permiten utilizar el metano generado como fuente de energía. La principal ventaja del proceso aeróbico es la simplificación en las operaciones de disposición de los lodos comparada con la relativa complejidad operativa del proceso de digestión anaeróbica.

#### **4.1.18 Digestión anaerobia**

Como su nombre indica la digestión anaerobia como sucede con la pirolisis, se lleva a cabo en ausencia de aire; pero en este caso la descomposición de la biomasa es debida a la acción de bacterias y no a altas temperaturas. Los materiales de la biomasa que alimentan el proceso suelen ser residuos ganaderos (estiércol de animales, restos de animales muertos, etc.), residuos obtenidos en depuradora de aguas residuales(lodos) y residuos de industrias orgánicas (azucareras, papeleras, etc.). El producto resultante es el biogás, que contiene fundamentalmente, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y metano ( $\text{CH}_4$ ), junto con fango. Los componentes solidos del fango pueden emplearse en la alimentación de animales o como fertilizante de terrenos (Carta et. al. 2009).

Otro concepto de la digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un substrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores (e.g.  $\text{H}_2$   $\text{O}_2$ ). Utilizando el proceso de digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos, residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico (FAO, 2011).

El proceso anaeróbico se clasifica como fermentación o respiración anaeróbica dependiendo del tipo de aceptores de electrones.

FAO (2011), define:

#### 4.1.19 Fermentación anaeróbica

En una fermentación anaeróbica, la materia orgánica es catabolizada en ausencia de un aceptor de electrones externo mediante microorganismos anaeróbicos estrictos o facultativos a través de reacciones de oxidación-reducción bajo condiciones de oscuridad. El producto generado durante el proceso acepta los electrones liberados durante la descomposición de la materia orgánica. Por lo tanto, la materia orgánica actúa como dador y aceptor de electrones. En la fermentación, el sustrato es parcialmente oxidado y, por lo tanto, sólo una pequeña cantidad de la energía contenida en el sustrato se conserva.

La Figura 5 muestra la fermentación anaeróbica de glucosa en etanol. Es importante destacar que la mayor parte (dos tercios) del metano se produce mediante fermentación anaeróbica en el cual el acetato actúa como dador y aceptor de electrones. La producción de metano mediante esta vía se conoce comúnmente como metanogénesis acetotrófica. La fermentación anaeróbica se puede aplicar para la recuperación de biocombustibles (e.g. hidrógeno y butanol) y productos bioquímicos (nisina y ácido láctico).

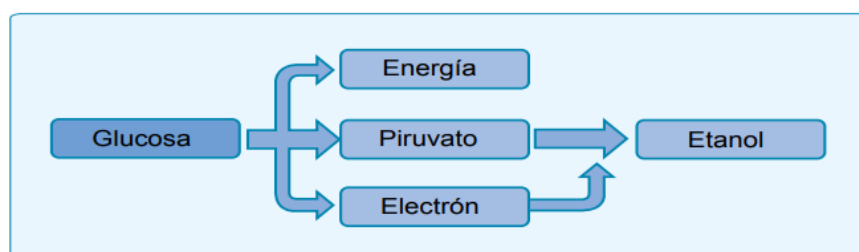


Figura 4. Fermentación anaeróbica de glucosa en etanol.

Fuente: Manual de biogás FAO (2011)

#### 4.1.20 Respiración anaeróbica

La respiración anaeróbica es un proceso biológico de óxido-reducción de monosacáridos y otros compuestos en el que el aceptor terminal de electrones es una molécula inorgánica

distinta del oxígeno, y más raramente una molécula orgánica. La realizan exclusivamente algunos grupos de bacterias y para ello utilizan una cadena transportadora de electrones análoga a la de la mitocondria en la respiración aeróbica. No debe confundirse con la fermentación, que es un proceso también anaeróbico, pero en el que no participa nada parecido a una cadena transportadora de electrones y el aceptor final de electrones es siempre una molécula orgánica.

La respiración anaeróbica requiere aceptores de electrones externos para la disposición de los electrones liberados durante la degradación de la materia orgánica (Figura 6). Los aceptores de electrones en este caso pueden ser  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  o  $\text{NO}_3$ . La energía liberada es mucho mayor a la que se produce durante la fermentación anaeróbica.

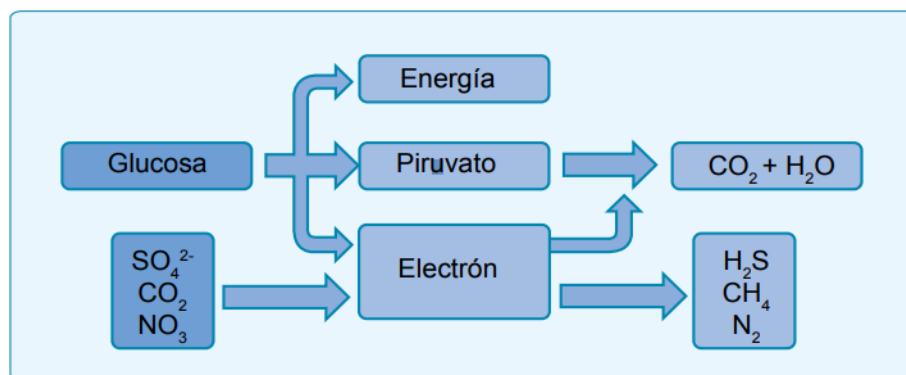


Figura 5. Respiración anaeróbica de la glucosa.

Fuente: Manual de biogás FAO (2011)

#### 4.1.21 Fases del proceso de digestión anaerobia

En la práctica ingenieril se acostumbra a considerar tres etapas para residuos sólidos o lodos (hidrólisis, acidogénesis, metanogénesis) y dos para residuos líquidos (acidogénesis y metanogénesis); el enfoque más novedoso lo constituye el de las cuatro etapas o niveles tróficos hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Lorenzo Acosta & Obaya Abreu, 2005).

- **Hidrólisis o licuefacción.**

En esta etapa los compuestos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas que actúan en el exterior celular por lo que se consideran exoenzimas. La hidrólisis es, por tanto, la conversión de los polímeros en sus respectivos monómeros.

La hidrólisis es la descomposición biológica de polímeros orgánicos en moléculas más pequeñas (monómeros y dímeros) que son capaces de atravesar la membrana celular, este proceso se lleva a cabo por medio de enzimas denominadas hidrolasas, que son capaces de solubilizar la materia orgánica y romper enlaces específicos con ayuda de agua para poder ser utilizadas (Corrales , Antolínez Romero, Bohórquez Macías, & Corredor vargas, 2015).

- **Acidogénesis.**

En esta etapa los compuestos orgánicos solubles que comprenden los productos de la hidrólisis son convertidos en ácidos orgánicos tales como acético, propiónico y butírico, fundamentalmente.

El consumo del oxígeno molecular del aire produce el ambiente anaerobio ideal para el desarrollo de las bacterias. El crecimiento bacteriano en esta etapa es rápido. En esta etapa no hay reducción significativa de la DQO del sustrato, puesto que las cadenas orgánicas más complejas se transforman en cadenas más cortas, sin consumo o reducción de la materia orgánica presente (Aqualimpia Engineering e.K., 2017).

- **Acetogénesis.**

Se le conoce también como acidogénesis intermediaria en la cual los productos correspondientes son convertidos en ácido acético, hidrógeno y CO<sub>2</sub>.

Corrales et al. (2015) definen que, en la acetogénesis, los ácidos grasos volátiles se convierten en ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno. El ácido acético es producido por dos diferentes mecanismos: acetogénesis por hidrogenación, en la cual se produce acetato (CH<sub>3</sub> COO-) como producto final de la reducción de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) más hidrogeno (H) y la acetogénesis por deshidrogenación en donde las bacterias son inhibidas

por pocas cantidades de oxígeno ( $O_2$ ) y por lo tanto solo sobreviven en asociaciones con microorganismos que consumen hidrogeno como las bacterias homoacetogénicas (fermentación láctica) y bacterias sulfato reductoras.

- **Metanogénesis.**

En esta etapa metabólica el  $CH_4$  es producido a partir del ácido acético o de mezclas de  $H_2$  y  $CO_2$ , pudiendo formarse también a partir de otros sustratos tales como ácido fórmico y metanol. El rol de las bacterias metanogénicas se define por el tipo de sustrato disponible.

#### **4.1.22 Factores que influyen en el proceso metanogénico**

Hilbert (2007), considera importante examinar algunos de los factores importantes que gobiernan el proceso metanogénico. Los microorganismos, especialmente los metanogénicos, son altamente susceptibles a los cambios en las condiciones ambientales.

La actividad metabólica involucrada en el proceso metanogénico se ve afectada por diversos factores. Debido a que cada grupo de bacterias intervinientes en las distintas etapas del proceso, responde en forma diferencial a esos cambios no es posible dar valores cualitativos sobre el grado que afecta cada uno de ellos a la producción de gas en forma precisa. Por lo tanto, nos limitaremos a dar una valoración cualitativa y en algunos casos se darán cifras y cuadros que deben tomarse como orientativos, ya que los valores pueden sufrir importantes variaciones. Para mantener un sistema anaerobio que establezca eficientemente un residuo y obtener la máxima producción de energía a partir de la conversión biológica, las bacterias metanogénicas y no metanogénicas, deben estar en un estado de equilibrio dinámico, punto y seguido para establecer y mantener tal estado, los contenidos del reactor deben estar libres de oxígeno disuelto y de concentraciones inhibidores de amoníaco libre y de constituyentes como metales pesados y sulfitos.

Los parámetros bioquímicos que pueden desestabilizar el proceso anaeróbico afectando directamente a los microorganismos son la relación C/N, temperatura y pH. La relación

C/N en el proceso anaeróbico afecta los tiempos de retención y la producción de biogás, siendo la relación óptima de 30:1 (Soria, Ferrera, Etchevers, Alcantar, & Trinidad, 2001).

Una baja relación C/N puede producir un efecto inhibitor de la digestión anaeróbica, debido a la producción de amonio (Chen & Creamer, 2008). Una alta proporción de nitrógeno incrementa el pH, debido a la generación de altos niveles de amonio que desestabilizan el proceso y afectan directamente a los microorganismos metanogénicos (Wang, Yang, Feng, Ren, & Han, 2012).

Hilbert (2007), establece que la actividad metabólica involucrada en el proceso metanogénico se ve afectada por los siguientes factores (p.7).

#### **4.1.23 Tipo de materia prima**

Las materias primas fermentables incluyen dentro de un amplio espectro a los excrementos de animales y humanos, aguas residuales orgánicas de las industrias (producción de alcohol, procesado de frutas, verduras, lácteos, carnes, y alimentos en general), restos de cosechas y basuras de diferentes tipos, como los efluentes de determinadas industrias químicas.

El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno, sino que también debe estar presente en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores).

Normalmente, las sustancias orgánicas como los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas. Sin embargo, en la digestión de ciertos desechos industriales puede presentarse el caso de ser necesaria la adición de los compuestos enumerados o bien un post tratamiento aeróbico.

Las sustancias con alto contenido de lignina no son directamente aprovechables, y por lo tanto, deben someterse a tratamientos previos (cortado, macerado, compostado) a fin de

liberar las sustancias factibles de ser transformadas de las incrustaciones de lignina. En lo atinente a estiércoles animales la degradación de cada uno de ellos dependerá fundamentalmente del tipo de animal y la alimentación que hayan recibido los mismos. Los valores tanto de producción como de rendimiento en gas de los estiércoles presentan grandes diferencias entre distintos autores.

Como norma se deberá tomar en cuenta que a raíz de estar trabajando en un medio biológico sólo los promedios estadísticos de una serie prolongada de mediciones serán confiables siempre y cuando figuren las condiciones en las cuales fueron realizadas las pruebas. En cuanto al volumen de estiércol producido por las distintas especies animales son variables de acuerdo fundamentalmente al peso y al tipo de alimentación y manejo de estos. Cuando se encare un proyecto específico se recomienda realizar una serie de mediciones en el lugar donde se emplazará el digestor.

#### **4.1.24 Temperatura**

En el desarrollo de cualquier proceso bioquímico, la temperatura es uno de los parámetros ambientales más importantes ya que mejora o inhibe a grupos microbianos específicos, esto debido a que las actividades implican reacciones enzimáticas, donde las enzimas son complejos moleculares sensibles a la temperatura. Otra razón son los diferentes tiempos de activación de los grupos bacterianos durante el curso de la digestión, ya que cada uno de estos grupos, tiene una temperatura óptima en donde se puede estabilizar su tasa de crecimiento celular máximo. En el caso del tratamiento anaerobio de lodos, la temperatura del proceso determina la rapidez y el grado de avance de la digestión anaerobia (Mae-Wan, 2008).

Por ello, es importante que la temperatura se mantenga constante, ya que cada grupo bacteriano posee un grado de temperatura óptimo de crecimiento. Si la temperatura fluctúa, no se podrá mantener ninguna población metanógena en forma estable y una disminución en la población de un determinado grupo puede afectar al proceso de digestión anaerobia, reduciendo el grado de estabilización del lodo y con ello la formación de CH<sub>4</sub>.



La biodigestión anaerobia puede ocurrir en un amplio rango de temperaturas que van desde los 5°C hasta los 60°C. Las bacterias metanogénicas son más sensibles a la temperatura que los demás microorganismos de un biodigestor, debido a que su velocidad de crecimiento es más lenta. El proceso de digestión anaerobio no se ve afectado si la temperatura aumenta en unos pocos grados; sin embargo, un decrecimiento podría retardar la producción de metano, sin perjudicar la actividad de las bacterias acidificantes, lo cual permite una excesiva acumulación de ácidos y una posible falla en el biodigestor. En este sentido, se debe procurar mantener un microclima cálido en el biodigestor para conservar una tasa de producción de biogás alta (Bidlemaier, 2006), (Osorio, Ciro, & Gonzalez, 2007).

La temperatura, de igual forma afecta de manera directa los procesos que controlan la dimensión del crecimiento microbial, así la velocidad con la que crecen los microorganismos responsables del proceso anaerobio aumenta con la temperatura (Van Lier, Hulsbeek, Stams, & Lettinga, 1993) definiéndose tres rangos de temperaturas para clasificar los sistemas: psicofílico, por debajo de 20°C, o a temperatura ambiente; mesofílico, entre 20-40°C, y termofílico entre 40 y 65°C.

El rango mesofílico es el más utilizado, pese a que el termofónico presenta ciertas ventajas, como la mayor rapidez, la higienización del residuo, eliminación de larvas, semillas de malas hierbas, organismos patógenos, mayor hidrólisis de partículas (Gallert, Bauer, & Winter, 1998).

Sin embargo, el rango termofílico puede ser más inestable, sobre todo por la mayor toxicidad de determinados compuestos a altas temperaturas, como el nitrógeno amoniacal (Hashimoto, 1986), (Gallert et al; 1998), o los ácidos grasos de cadena larga (Hwu & Lettinga, 1997); algunas de las ventajas que presenta el rango termofílicos son:

- Una fermentación más rápida.
- Eliminación de casi un 100% de virus y bacterias patógenas.

- Separación sólido-líquido más rápidamente.
- Disminución de la viscosidad de la solución.

El rango psicrófilo es poco viable debido a la baja velocidad de crecimiento de los microorganismos y, por tanto, al gran tamaño de reactor necesario. Sin embargo, simplifica mucho el diseño y hay menos problemas de estabilidad ya que cuanto mayor es el tiempo de retención menor es la diferencia entre las velocidades de degradación a diferentes temperaturas (Fannin, 1987). La temperatura óptima para el crecimiento bacteriano dependerá de cada especie, tal y como se muestra en la tabla anterior. Las variaciones producidas en la temperatura de unos pocos grados durante la digestión conducen a perturbaciones del proceso, que se manifiestan muy rápidamente en un rendimiento de degradación más bajo y un descenso en el porcentaje de metano en el biogás.

Debido a la fuerte dependencia que presenta el proceso de digestión anaeróbica respecto a la temperatura, es este uno de los parámetros críticos que es necesario mantener en un rango controlado.

Los procesos anaeróbicos, al igual que muchos otros sistemas biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que, a su vez, dependen de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás. La temperatura de operación del digestor, según lo destaca (Speece, 1983) es considerada uno de los principales parámetros de diseño, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaeróbica como puede observarse en la figura 2.

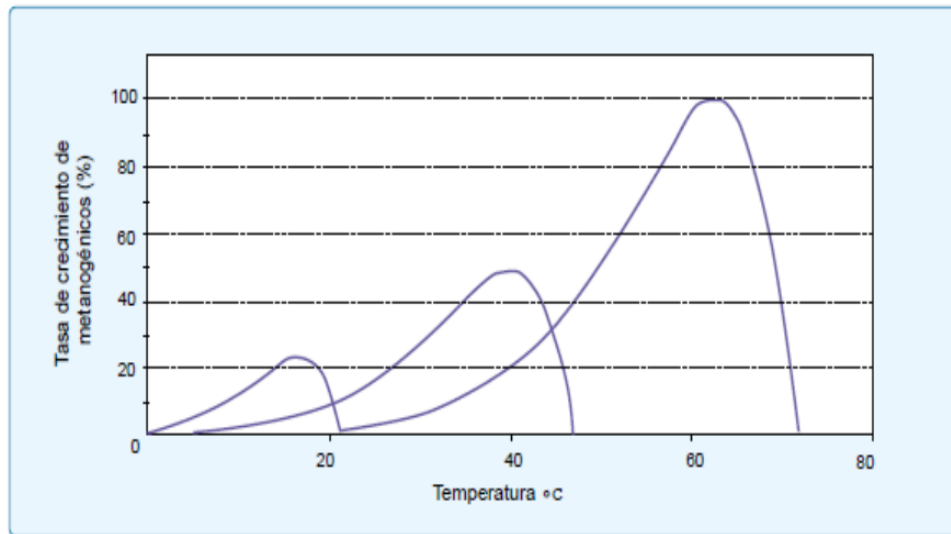


Figura 6. Tasa de crecimiento relativo de microorganismos psicrófilico, mesófilico y termófilicos.

Fuente: Speece, 1983.

El régimen termófilico se ha relacionado estrechamente con mayores problemas de estabilidad (Hobson, 1995). Sin embargo, otros autores consideran que las plantas termófilicas son tan estables y tan operables como las mesófilicas, presentando, además de las ventajas antes mencionadas, una mayor producción de gas por unidad de sólidos volátiles y una mejora en el postratamiento, ya que el efluente de la digestión termófilica es más fácilmente deshidratable, junto con una menor producción de malos olores (Ahring, Sandberg, & Angelidaki, 1995), (Krugel, Nemeth, & Peddie, 1998).

#### 4.1.25 Valor de la acidez (pH)

Los microorganismos anaerobios necesitan de manera estricta un pH en torno a la neutralidad para su desarrollo correcto, aunque permiten cierta oscilación (Clark & Speece, 1989), aunque pueden presentarse problemas si baja de 6 o sube de 8,3 (Lay, Li, & Noike, 1997). El pH afecta directamente la actividad enzimática de los microorganismos mediante cambios de estado de los 34 iones de las enzimas como el carboxilo y amino; alteración que

se presenta en los componentes no ionizables del sistema, como por ejemplo la desnaturalización de la estructura proteica de las enzimas (Clark & Speece, 1989).

Una vez estabilizado el proceso fermentativo el pH se mantiene en valores que oscilan entre 6 y 8, valores de pH por debajo de 5 y por encima de 8 se corre el riesgo de inhibir el proceso de fermentación o incluso detenerlo. Debido a los efectos buffer que producen los compuestos bicarbonato-dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ -  $\text{HCO}_3$ ) y Amonio -Amoniaco ( $\text{NH}_4$ - $\text{NH}_3$ ) el proceso en sí mismo tiene capacidad de regular diferencias en el pH del material de entrada.

Los valores de pH pueden ser corregidos para mantenerlos dentro del rango adecuado para el proceso de fermentación. Así, cuando el pH es alto se puede sacar frecuentemente una pequeña cantidad de efluente y agregar materia orgánica fresca en la misma cantidad; o bien, cuando el pH es bajo se puede agregar fertilizante, cenizas o agua amoniacal diluida. Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6.0 ni subir de 8.0. El valor del pH en el digestor no sólo determina la producción de biogás sino también su composición (figura 7). Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas.

Debido a que la metanogénesis se considera la etapa limitante del proceso, es necesario mantener el pH del sistema cercano a la neutralidad. Los acidogénicos son significativamente menos sensibles a valores más extremos de pH.

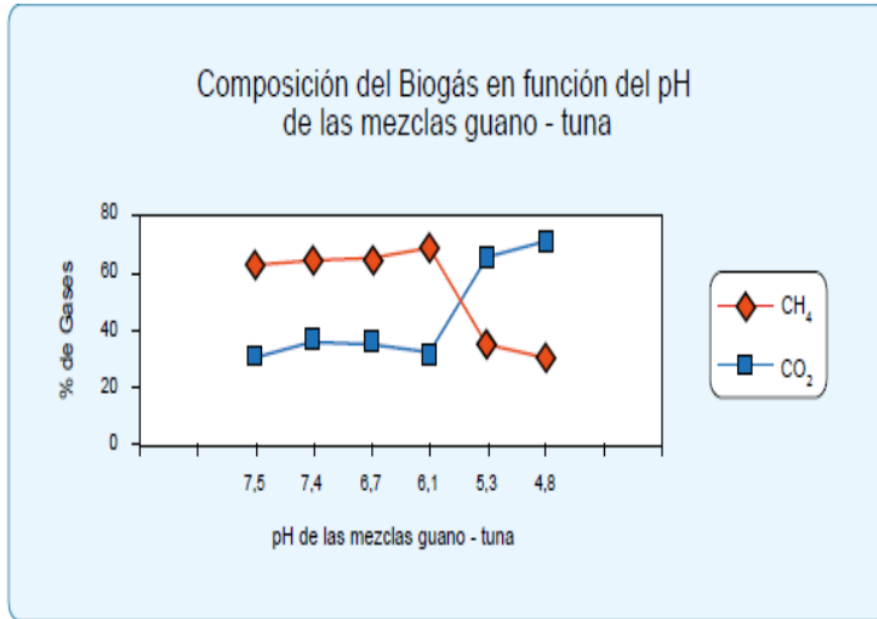


Figura 7. Composición del biogás en función del pH de la mezcla de materias primas. Fuente: Varnero & Arellano, 1990.

#### 4.1.26 Relación DBO Y DQO

Habitualmente se utiliza la relación DBO/DQO para estimar la biodegradabilidad de un agua residual. La determinación de la DBO y la DQO permite establecer la relación existente de contaminantes y según el resultado, conocer la posibilidad o no de efectuar algún tratamiento para las aguas residuales (Mihelcic & Zimmerman , 2011). La diferencia más notable es que la DBO representa la cantidad de materia orgánica biodegradable, mientras que la DQO representa ambas, tanto la materia biodegradable como la no biodegradable.

#### 4.1.27 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

La demanda bioquímica de oxígeno, DBO, se define como la cantidad de oxígeno usado por los microorganismos no fotosintéticos a una temperatura de 20°C, para metabolizar los compuestos orgánicos degradables biológicamente. Se ha demostrado que gran parte de los microorganismos metabolizan aeróbicamente los sustratos orgánicos, tales como lípidos,

azúcares, alcoholes o proteínas, tal que alcanzan un máximo rendimiento de producción celular de 0.4 g de células en peso seco por gramo de DQO eliminada (Sikes, 1975).

Este valor es de gran importancia ya que se relaciona con la cantidad de energía oxidable en el sustrato el cual es microbiológicamente usable por las células para sus requerimientos de energía y su posterior síntesis.

La razón técnica de hacer las lecturas de DBO a los cinco días de incubación es porque después de este periodo frecuentemente ocurre la nitrificación. La nitrificación o conversión del nitrógeno orgánico y amoniacal a nitritos y nitratos requiere de oxígeno, por lo que la disminución de oxígeno disuelto o incremento de DBO, ya no se debe a la oxidación del carbono orgánico que es lo que se desea medir en este tipo de prueba.

La razón de hacer la lectura a los cinco días de efectuada la prueba y a una temperatura de 20°C, se debe a que como esta técnica tiene su origen en Inglaterra, la British Royal Commission of Sewage Disposal, determinó que la temperatura promedio de los ríos de este país es de 18.3°C y que el tiempo máximo que duran estas aguas en su trayecto de los ríos hacia el mar, es de cinco días. Como ésta prueba de DBO pretende reproducir estos hechos, se seleccionaron los parámetros de tiempo y temperatura ya mencionados, y que por causas circunstanciales coinciden más o menos con las razones técnicas de efectuar las lecturas en esas condiciones. Aproximadamente entre el 90 y 95% de la DBO presente en el agua residual es originada por pérdidas de leche o productos lácteos (Valencia & Ramirez, 2009)

#### **4.1.28 Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

La demanda química de oxígeno, DQO, se refiere a la cantidad de oxígeno que se quiere para oxidar completamente por medios químicos los compuestos orgánicos a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. En la práctica, la materia orgánica en agua es oxidada por K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> bajo condiciones estrictas (en medio de ácido sulfúrico concentrado, y a una temperatura de 160°C). La cantidad de oxígeno del dicromato usado es determinada y expresada como DQO. En

aquellos casos que la fórmula de los compuestos es conocida, la DQO puede ser derivada de la estequiometría. Una importante ventaja de este método es que cuantifica tanto la materia orgánica disuelta como la que se presenta en forma de partículas. Considerando el hecho que el tratamiento de aguas residuales tiene que ver con la separación de ambos tipos de materia orgánica, la DQO medida es ampliamente usada como un parámetro cuantitativo.

En las pruebas de DQO se acelera artificialmente el proceso de biodegradación que hacen los microorganismos, mediante un proceso de biodegradación forzada, utilizando oxidantes químicos y métodos debidamente estandarizados, que tienen por objeto la reproducción de las mediciones, esta prueba es una indicación de la cantidad de nutrientes fácilmente degradables presentes en una muestra, es ideal para aplicarla a residuos que contengan entre otros nutrientes con carbón, como las de industrias o métodos de producción biológicos (Metcalf & Eddy, 1994)

A continuación, se presentan algunos valores de DQO en relación con la concentración de sustrato: 1g/l de glucosa posee una DQO de 1,4 g/l (Henze, 1995), 1g/l de grasa de cerdo corresponde 2,1 g/l de DQO y 1g/l de aceite girasol a 2 g/l de DQO.

#### **4.1.29 Tiempo de retención**

El tiempo de retención hidráulica (TRH) es el tiempo que se mantiene la materia orgánica dentro del digestor, varía con los parámetros de proceso, tales como, temperatura y composición de los residuos. Bajo condiciones Mesófilicas, el TRH es de 15 a 30 días y en condiciones Termófilicas es de 12 a 14 días (Monnet, 2003). En los sistemas de mezcla completa, el TRH coincide con el tiempo celular, por lo que el tiempo de retención deberá ser suficientemente largo como para asegurar el crecimiento de la población bacteriana. Al aumentar TRH, aumenta el grado de materia orgánica degradada, así como la producción de metano, aunque este último valor comenzara a disminuir una vez alcanzado el óptimo.

#### **4.1.30 Composición de la materia orgánica**

Valdivia (2000), propone para la fermentación los microorganismos metanogénicos requiriendo de suficiente material de carga para que el proceso de digestión no se interrumpa, el porcentaje más adecuado de contenido en sólidos es del 5% al 10% lo que indica que la biomasa más adecuada es la de alto contenido en humedad. Durante la digestión se encuentra que no toda materia prima se digiere, si no que parte se convierte en metano, otra en sedimento y habrá también una porción que no se digiere, esta y otras propiedades básicas de la materia se expresan casi siempre como sigue:

#### **4.1.31 Humedad**

Cantidad de agua existente en la materia a utilizar. Se obtiene al secarse el material a 104°C, hasta que no pierda peso; la diferencia entre el peso inicial y el peso final es equivalente a la humedad que contenía la materia. Las bacterias y otros microorganismos no pueden funcionar efectivamente cuando el contenido de agua de la mezcla es demasiado bajo, y la cantidad de biogás producido será pequeña. Cuando la mezcla es demasiado diluida, se puede digerir relativamente poca materia orgánica y la producción del biogás es limitada.

#### **4.1.32 Sólidos totales o masa seca**

Materia orgánica sin humedad, es decir, el peso de la materia seca que queda después del secado como se indicó antes. El sólido total suele ser equivalente al peso en seco (sin embargo, si se secan los materiales al sol, es de suponer que aun contendrán, cerca del 30% de humedad). El 39 sólido total incluye componentes digeribles o “sólidos volátiles” y residuos no digeribles o “sólidos fijos”. Podemos apreciar de los datos recogidos en la tabla 1 del contenido de sólidos totales de algunos sustratos orgánicos.



Tabla 1. Datos promedios sobre el contenido de sólidos totales de diversos residuos

<b>Materias primas</b>	<b>% de Sólidos totales</b>
<b>Residuos animales</b>	
Bovinos	13.4-56.2
Porcinos	15-49
Aves	26.92
Caprinos	83-92
Ovejas	32-45
Conejos	34.7-90.8
Equinos	19-42.9
Excretas humanas	17
<b>Residuos vegetales</b>	
Hojas secas	50
Rastrojo de maíz	77
Paja trigo	88-90
Paja arroz	88.8-92.6
Leguminosas (paja)	60-80
Tubérculos (hojas)	10-20
Hortalizas (hojas)	10-15
Aserrín	74-80

Fuente: Varnero & Arellano, (1990)

#### **4.1.33 Sólidos Volátiles (SV)**

Es aquella porción de sólidos totales que se libera de una muestra, volatilizándose cuando se calienta durante dos horas a 600°C. Los SV contienen componentes orgánicos, los que teóricamente deben ser convertidos a metano (Varnero & Arellano, 1990).

#### **4.1.34 Sólidos Fijos (SF)**

Material que no será transformado durante el proceso y es el peso que queda después del encendido (cenizas), se trata de material biológicamente inerte. Los sólidos fijos son el residuo de los sólidos totales, disueltos o suspendidos, después de llevar una muestra a sequedad durante un tiempo determinado a 550°C.

#### **4.1.35 2.2.30 Relación carbono/nitrógeno (C/N)**

La relación C/N permite conocer la capacidad mineralizadora del residuo sólido en procesos de recuperación y aprovechamiento de la materia orgánica. La variación de esta relación C/N dependerá del aporte de la fracción cartón-papel. Los valores de C/N más elevados son característicos de los países más desarrollados (valores medio superiores a 34) debido a la mayor cantidad de papel-cartón.

El intervalo óptimo de la relación C/N para procesos de transformación biológica está comprendido entre 20 y 35. Conocida esta relación se puede determinar la aptitud del residuo sólido para la digestión anaerobia o el compostaje, teniendo en cuenta que la posibilidad que se generen altos niveles de amoníaco hace que el residuo no sea adecuado para los procesos anaerobios (Gallert, Bauer, & Winter, 1998).

Tabla 2. Datos promedios sobre el contenido de sólidos totales de diversos residuos

<b>Materiales</b>	<b>%C</b>	<b>%N</b>	<b>C/N</b>
<b>Residuos animales</b>			
Bovinos	30	1.30	25:1
Equinos	40	0.80	50:1
Ovinos	35	1.00	35:1
Porcinos	25	1.50	16:1
Caprinos	40	1.00	40:1
Conejos	35	1.50	23:1
Gallinas	35	1.50	23:1
Patos	38	0.80	47:1
Pavos	35	0.70	50:1
Excretas humanas	2.5	0.85	3:1
<b>Residuos vegetales</b>			
Paja trigo	46	0.53	87:1
Paja cebada	58	6.64	90:1
Paja arroz	42	0.63	67:1
Paja avena	29	0.53	55:1
Rastrojo maiz	40	0.75	53:1
Leguminosas	38	1.50	28:1
Hortalizas	30	1.80	17:1
Tubérculos	30	1.50	20:1
Hojas secas	41	1.00	41:1
Aserrín	44	0.06	730:1

Fuente: Varnero & Arellano, 1990.

#### **4.1.36 Ventajas de la digestión anaerobia**

#### **4.1.37 Proceso**

- Permite el tratamiento de fracciones orgánicas de residuos urbanos de diferentes procedencias (Tchobanoglous, Hilary, & Vigil, 1997)

- Elevados porcentajes de eliminación de materia volátil (40-60%) (Vogt, Liu, Kennedy, Vogt, & Holbein, 2002), (Mata Álvarez, Macé, & Llabrés, 2000), (De Baere, 2000).
- Elevada destrucción de organismos patógenos y organismos parásitos: también produce la inactivación de algunos virus patógenos (entrevirus y parcovirus), según el tipo de virus, del proceso de depuración y de la temperatura (Turnet & Burton).
- Baja producción y estabilización de lodos (Carreras & Dorronsoro, 1999);
- Alto grado de estabilización del vertido trabajando con altas velocidades de carga (Lissent, Vandervivere, De Baere, Bley, & Verstraete, 2001).
- Disminución muy significativa de la relación de alcalinidad, así el proceso aporta alcalinidad para favorecer un proceso posterior de nitrificación, total o parcial (Flotats, Bonmatí, Campos, & Teira, 2000).

#### **4.1.38 Producto final**

- Baja generación total de sólidos biológicos: el producto final posee características similares al compost producido aeróbicamente (Tchobanoglous, Hilary, & Vigil, 1997). Además, el producto final es inerte y rico en ciertos nutrientes y puede emplearse en agricultura como mejorador de suelo (Nopharatana, Pullammanappallil, & Clarke, 2003), (Chugh, Chynoweth, Clarke, Pullammanappallil, & Rudolph, 1999).
- Eliminación de ácidos volátiles (AGV) y otros compuestos fácilmente biodegradables, contribuyen para disminuir la fitotoxicidad del residuo final (Flotats, Bonmatí, Campos, & Teira, 2000).

#### **4.1.39 Energía**

- Alta producción de biogás compuesto fundamentalmente por CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>
- Obtención de biogás susceptible de aprovechamiento energético y económico (Dorronsoro & Carreras, 1999).
- Bajo consumo energético: la alta producción de biogás con elevado valor energético reduce significativamente los costes del tratamiento (Milan, y otros, 2011).
- Reducción de la emisión de gases responsables por del efecto invernadero (Massound & El-Fadel, 2001).

#### **4.1.40 Biodigestores**

Corona Zúñiga (20017), señala que un biodigestor es un tanque cerrado de cualquier forma, tamaño, y material; en el cual se almacena basura orgánica mezclada con agua al descomponerse en ausencia de aire generan biogás. Defino por el diseño de la planta en función de las variables del proceso, ambientales y de utilización del sistema.

Reyes Aguilera (2017), afirma la definición de un Biodigestor como un contenido hermético, donde se realiza un proceso anaeróbico de descomposición (proceso de fermentación anaeróbica). La materia prima está constituida por materia orgánica, como desechos agrícolas, residuos animales, residuos humanos, etc.; es decir, en el biodigestor tal como indica su nombre sucede una digestión de la materia prima, luego de la cual se obtiene biogás, biol y bioabono aproximadamente en un periodo. Definiendo las siguientes características:

#### **4.1.41 Tipos de biodigestores por su forma**

Hay muchos tipos de plantas del biogás, pero los más comunes son el dosel flotante (indio) y el domo fijo (chino). La aceptabilidad pobre de muchos de estos biodigestores ha sido

principalmente debida a los costos altos, la dificultad de instalación y problemas en la consecución de las partes y repuestos (Fundación Hábitat, 2005).

#### **4.1.42 Pozos sépticos**

Fundación Hábitat (2005), define que los pozos sépticos es el más antiguo y sencillo digestor anaerobio que se conoce, utilizado normalmente para la disposición de aguas residuales domésticas. Se cree que de allí deriva el uso potencial de los gases producidos por la fermentación anaeróbica, para el uso doméstico.

Para la correcta operación de estos pozos es requisito indispensable aislar las aguas servidas que caen en él, de las que contienen jabón o detergentes. El efecto de los jabones y en especial los detergentes, inhibe la acción metabólica de las bacterias, razón por la que los pozos se colmatan con rapidez y dejan de operar, haciendo necesario destaparlos frecuentemente para recomenzar la operación (Fundación Hábitat, 2005).

#### **4.1.43 Biodigestor del domo flotante (indio)**

Este biodigestor consiste en un tambor, originalmente hecho de acero, pero después reemplazado por fibra de vidrio reforzado en plástico (FRP) para superar el problema de corrosión. Normalmente se construye la pared del reactor y fondo de ladrillo, aunque a veces se usa refuerzo en hormigón. Se entrapa el gas producido bajo una tapa flotante que sube y se cae en una guía central. La presión del gas disponible depende del peso del poseedor de gas por el área de la unidad y normalmente varía entre 4 a 8 cm de presión de agua. El reactor se alimenta semi-continuamente a través de una tubería de entrada (Mannise, 2011).

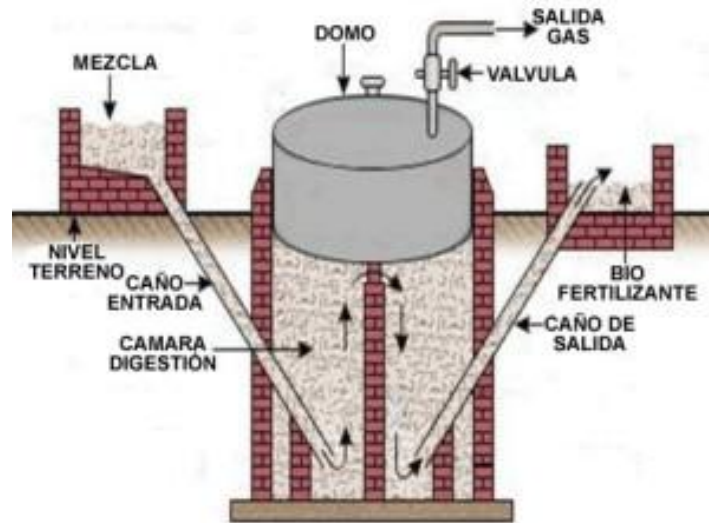


Figura 8. Biodigestor domo flotante.

Fuente: Contreras, 2006.

#### 4.1.44 Biodigestor de domo fijo (chino)

Consiste en un digestor con un gasómetro no móvil fijo, que se encuentra en la parte superior del digestor. Cuando se inicia la producción de gas, los lodos se desplazan hacia el tanque de compensación. Incrementa la presión del gas con el volumen de gas almacenado y la diferencia de altura entre el nivel de los lodos en el digestor y el nivel de lodos en el tanque. No hay piezas de acero oxidable y por lo tanto la vida de la planta se considera de 20 años. La planta está construida bajo tierra, lo que la protege de los daños físicos y adicionalmente, ahorra espacio (FAO, 2014).

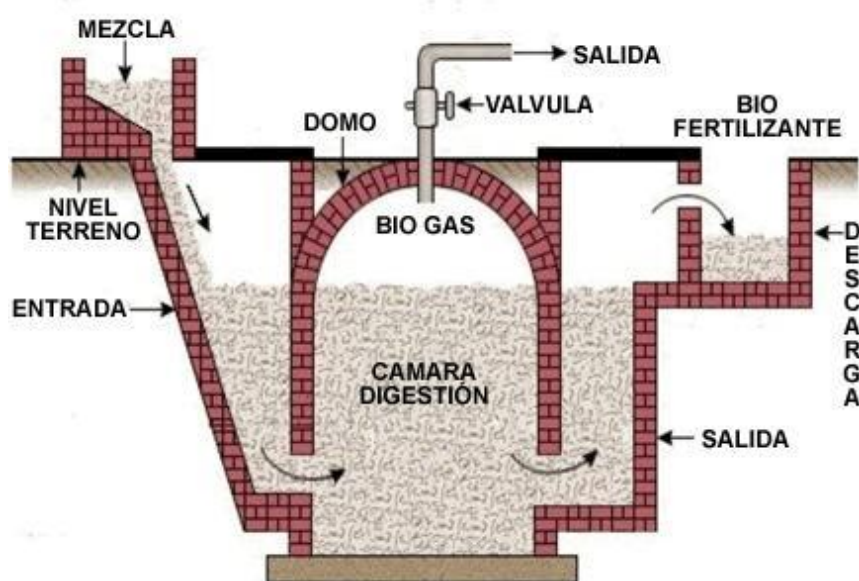


Figura 9. Biodigestor domo fijo.

Fuente: Contreras, 2006.

#### 4.1.45 Biodigestor de estructura flexible

Este tipo de planta consiste en un contenedor de plástico aislante (estructura flexible), también llamado bolsa, el que combina digestor y almacenamiento de biogás. El gas se almacena en la parte superior de la bolsa mientras que el sustrato a digerir se ubica en la parte inferior, de modo que la cañería de alimentación y salida están unidas directamente al plástico. (Hernández Embate, 2013)

Hernández Embate (2013) establece que el plástico de la bolsa debe ser resistente al clima y a la radiación UV, por lo que se recomienda el uso de plástico reforzado o caucho sintético. Materiales como el denominado barro rojo PVC (red mud plastic), Trevira y polietileno (más usado en América Latina) han sido aplicados con éxito. Sin embargo, la vida útil de estas estructuras, generalmente, no excede los dos a cinco años, por lo que este tipo de planta es recomendable solamente cuando existe la posibilidad de reparación localmente. Esta tecnología es recomendable como una alternativa transitoria, cuando se requiere una solución rápida para la utilización de la materia prima y generación de biogás.



#### 4.1.46 Sistemas batch o discontinuo

Son aquellas que se encargan completamente de una sola vez y son vaciadas por completo después de un tiempo de retención fijado. Dentro de esta categoría la más conocida es la planta Olade Guatemala. El modelo tipo Batch es apropiado para cargar todo tipo de materiales de fermentación, debido a que el tiempo de retención con el que se trabaja es largo.

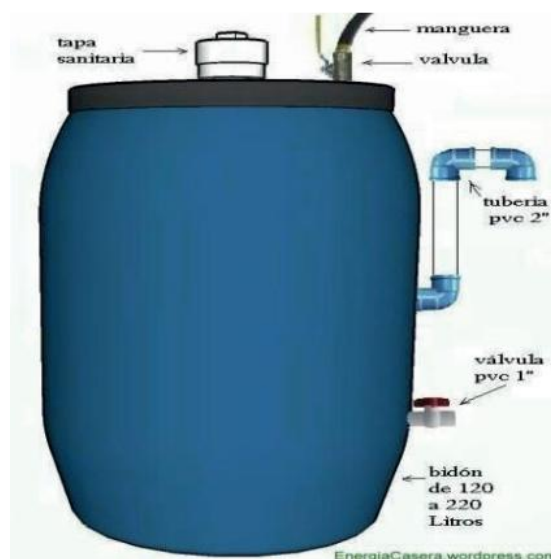


Figura 10. Sistema tipo Batch

Fuente: Contreras, 2006.

#### 4.1.47 Biogás

Reyes Aguilera (2017), asegura que el biogás es una mezcla de gases cuyos principales componentes son el metano y el bióxido de carbono, el cual se produce como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia del aire, por la acción de un grupo de microorganismos, Si las condiciones ambientales y operaciones son óptimas a próximamente en un período de 15 días se produce biogás.

Romero (2017), plantea que el biogás es un combustible natural, no fósil, de alto poder calorífico dependiente del contenido de gas metano ( $\text{CH}_4$ ). El poder calorífico del biogás es

de 4.700 a 5.500 kcal/m<sup>3</sup> o 6,27 kW/m<sup>3</sup> dependiendo del contenido de gas metano (CH<sub>4</sub>) y puede generar una cantidad de calor equivalente a 22.000 BTU/m<sup>3</sup> o 21.5 MJ/m<sup>3</sup> (573 BTU por pie cúbico), valor que puede variar entre 19.7 y 23 MJ/m<sup>3</sup>. Su temperatura de auto-ignición es similar a la del metano puro y varía de 650 - b750 °C.

#### **4.1.48 Composición del biogás**

Los principales componentes del Biogás son el metano (CH<sub>4</sub>) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Aunque la composición varía de acuerdo con la biomasa utilizada (Arce, 2011). Su composición aproximada se presenta a continuación:

- Metano (CH<sub>4</sub>): 40-70% del volumen
- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>): 30-60 del volumen
- Hidrogeno (H<sub>2</sub>): 0-1% del volumen
- Nitrógeno
- Sulfuro de hidrogeno (H<sub>2</sub>S): 0-3% del volumen
- Ácido sulfhídrico

## **2.3 Hipótesis**

En el proceso biológico anaeróbico controlado, la producción de biogás mediante la cascarilla de arroz y café como materia orgánica biodegradable tendrá una la relación de causalidad significativa en cuanto a la producción de biogás y generará buenos rendimientos siempre y cuando los parámetros físicos (temperatura) y químicos (pH, C, N) se encuentren en sus rangos óptimos.

## **Capítulo III**

### **3.1 Diseño metodológico**

#### 3.1.1 Tipo de estudio

En cuanto al enfoque filosófico, por el uso de instrumentos de recolección de la información, análisis y vinculación de datos, el presente estudio se realizará mediante un enfoque cuantitativo de investigación (Hernandez Sampieri, Fernandez Collado, & Baptista Lucio, 2014).

De acuerdo con el paradigma epistemológico de la investigación en este estudio se manipulan de forma intencionada las variables independientes en diversos niveles de la experimentación, se verifica la hipótesis a través de métodos estadísticos descriptivos e inferenciales, por tanto, el paradigma sobre el que se sustenta esta investigación es el paradigma positivista.

Según el tiempo de ocurrencia de los hechos y registros de la información este estudio es prospectivo debido a que los hechos se registraran a medida que ocurren los procesos de investigación (Pineda, Alvarado, & Canales, 1994); Según el nivel de profundidad de conocimiento es descriptivo porque son aquellos que están dirigidos a determinar "cómo es" o "cómo está" la situación de las variables que se estudian en una población.

De acuerdo (Pedroza Pacheco, 1993), el método de investigación es experimental debido a que se caracterizan por la introducción y manipulación del factor causal o de riesgo para la determinación posterior del efecto; Según el análisis y alcance de los resultados el estudio es analítico porque pretenden descubrir una hipotética relación entre algún factor de riesgo y un determinado efecto, es decir, pretenden establecer una relación causal entre dos fenómenos naturales (Veiga de Cabo, De la Fuente Díez, & Zimmermann Verdejo, 2008).

### 3.1.2 Área de estudio

#### 4.1.49 3.1.2.1 Ubicación geográfica

La presente investigación se realizó en la ciudad de Estelí, específicamente en el laboratorio de la Estación Experimental para el Trópico Seco El Limón de la Facultad Regional Multidisciplinaria (FAREM-Estelí), aquí se caracterizaron y evaluaron los sustratos orgánicos, asimismo se instalaron las unidades de análisis experimental.



Figura 11. Ubicación (tomada de google maps)

#### 4.1.50 3.1.2.2 Área de conocimiento

La presente investigación se inscribe a la línea N° 1. Tecnologías y eficiencia energéticas renovables, pertenecientes al Centro de Investigación de Energías Renovables (CIER) de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-MANAGUA), Facultad Regional multidisciplinaria (FAREM-ESTELI), y aprobados en sesión ordinaria N° 6-2019 el día 11 de julio de 2019.

### 3.2 Universo y muestra

Tamayo y Tamayo (2003), define el universo como un conjunto o la totalidad de un grupo de elementos, casos u objetos que se quiere investigar. En esta investigación se trata de la evaluación de dos sustratos organicos: cascarilla de café y cascarilla de arroz.

Dado que esta investigación se realiza por el método experimental la muestra representativa se circunscribe al espacio inferencial representativo que le corresponde definido por el número de repeticiones y el número de tratamientos, de los cuales contó con *tres repeticiones* para la caracterización de los sustratos y dos *tratamientos en comparación: cascarilla de café y cascarilla de arroz*, por tanto, la muestra fue de seis. *Las unidades experimentales* (material receptor, al cual se aplican los tratamientos en un solo ensayo) fueron dos biodigestores tipo Batch, los cuales se cargaron tres veces por cada rango de temperatura. Este principio está basado en la función de distribución de probabilidad de la Prueba de Fisher, que se define en el escenario de las muestras pequeñas donde “n” debe ser igual o menor de 30.

### 3.3 Matriz de operación de variables

**Objetivo general:** Evaluar los residuos de cascarilla de arroz y café como sustratos para generación de biogás mediante el proceso biológico anaeróbico en condiciones controladas en sus tres rangos de temperatura.

Objetivos	Variable	Indicador	Técnica de recolección de datos
Caracterizar los parámetros fisicoquímicos de la cascarilla de arroz y café como materia orgánica biodegradable.	1.1 Masa húmeda 1.2 Masa seca 1.3 Sólidos volátiles 1.4 Cenizas 1.5 Relación Carbono/Nitrógeno	1.1 cantidad de agua en la materia prima 1.2 peso restante de la materia orgánica luego del secado 1.3 Peso de los sólidos orgánicos quemados cuando el material seco se enciende 1.4 Peso de la materia seca que queda después del secado 1.5 Permite conocer la capacidad mineralizadora del residuo solido en procesos de recuperación y aprovechamiento de la materia orgánica.	Experimento de laboratorio
Determinar la producción de biogás generado en un biodigestor a escala de laboratorio a partir de	1.1 producción de biogás generado 1.2 tiempo de retención	1.1 Litros de biogás producidos 1.2 Tiempo en que inicia a degradarse la	Experimento de campo

los residuos orgánicos del café y arroz.		materia orgánica	
Determinar el efecto de la temperatura y el pH en la producción de biogás que se obtiene en el proceso biológico anaeróbico controlado	Temperatura	Grados Celsius al que fueron sometidos las unidades experimentales	Experimento de campo



### **3.4 Métodos, técnicas e instrumentos para la recolección de datos e información**

#### **Implementación de métodos cuantitativos**

La técnica que se utilizó en la recolección de datos fue la observación puesto que nos permite hacer un registro visual de lo que ocurre en una situación real, clasificando y consignando los acontecimientos pertinentes de acuerdo con algún esquema previsto y según el problema que se estudia. La determinación de lo observado estuvo determinada por lo que se estaba investigando, pero "generalmente se observaron características y condiciones de funcionamiento de los biodigestores y los factores que influyen en el proceso de digestión anaerobia controlada.

Se utilizaron formatos de registro de la información elaborados previamente en el programa informático Excel, que sirvieron para el registro de las variables cuantitativas discretas y continuas que surjan en la experimentación. Luego se diseñó una base de datos en Infostat en la que se realizó las pruebas estadísticas pertinentes.

### **3.5 Procedimientos para la recolección de datos e Información**

El procedimiento que se siguió para la recolección de los datos e información se presentan de acuerdo con cada uno de los objetivos planteados en esta investigación.

#### **Propiedades fisicoquímicas de la carilla de café y arroz**

El procedimiento a seguir fue de acuerdo a la metodología utilizada por, (Reyes Aguilera E. A., 2019).

Primeramente, se realizó la selección del sustrato. Este se escogió tomando en cuenta los siguientes criterios (Reyes Aguilera E. A., 2019):

1. La materia se debe encontrar en abundantes cantidades.
2. Debe tener bajo costo de adquisición (o nulo).

3. Debe representar un factor de contaminación ambiental.
4. Debe producir una cantidad de biogás razonable.

Se eligió sustrato para la producción de biogás los residuos orgánicos de cascarilla de café y de arroz que se generan en la zona de San Isidro y Sébaco. Estas materias se obtuvieron de los desechos de arroceras y beneficios de secado de café utilizando bolsas etiquetadas para su recolecta.

Esta etapa se realizó mediante una técnica gravimétrica utilizando una balanza analítica Acculab, para el pesaje de los sustratos orgánicos. Posteriormente se introducen en un horno, en capsulas de porcelana, a una temperatura de  $105^{\circ}\text{C}$  durante un tiempo determinado.



Figura 12. Pesaje de las muestras.



Figura 13. Muestras a  $105^{\circ}\text{C}$ .

Posteriormente, las muestras son enfriadas en un desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente y seguidamente se aplicó el proceso de pesado en la balanza analítica para

conocer el porcentaje de humedad y masa seca respectivamente, el aumento de peso sobre el peso del crisol vacío representa la cantidad de sólidos totales o masa seca del sustrato.

Para llevar a cabo la determinación de los Sólidos Volátiles (SV), se calcinó el residuo seco procedente de la determinación de ST hasta peso constante en un horno de mufla a una temperatura de 550°C durante 4 horas. Concluido este proceso se procedió a la extracción de las muestras, pesándolas para conocer el porcentaje de cenizas y el contenido de sólidos volátiles presente en las muestras. La disminución de peso del crisol tras la incineración del residuo seco (ST), representa el contenido en SV.



Cascarilla de café



Cascarilla de arroz

Figura 14. Muestras a 550°C.

También, se calculó el porcentaje de Carbono Orgánico (CO) a partir de los porcentajes de materia orgánica (Sólidos Volátiles). El porcentaje de CO se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$CO(\%) = \frac{MO}{1,8}$$

Donde: 1.8= factor de conversión

Se estimó el contenido de nitrógeno considerando que el contenido de este elemento forma 5 % de la materia orgánica (Plaster, 2000).

### **Determinar la producción de biogás**

El procedimiento a seguir fue de acuerdo a la metodología utilizada (Reyes Aguilera E. A., 2019).

Esta etapa consistió en la construcción de la unidad experimental que consta de biodigestores con capacidad de 1 litro. Una vez construidos los biodigestores, se procedió a la recolección de los sustratos orgánicos.

Para cargar los reactores tipo Batch de materia orgánica, se procedió a aplicar las relaciones de (sustrato agua) con valores específicos que se determinaron una vez iniciada la fase experimental. Se aplicó la relación 2:1, es decir por cada 2 kilogramos de sustrato, un litro de agua potable, se mezclaron y agitaron en un recipiente para lograr homogeneidad. Los reactores tienen capacidad de 1 litro, se utilizó el 75% para la cámara líquida y el 25% para cámara gaseosa.



Figura 15. Banco de análisis a 37°C.



Figura 16. Banco de análisis a 56°C.



Figura 17. Banco de análisis a 8°C.

La cantidad de biogás se cuantificó aplicando una técnica volumétrica que se basa en el desplazamiento de líquido. Para la realización de esta prueba se usaron instrumentos de laboratorio tales como: base soporte, nuez doble, y una probeta graduada de 250 ml. Este método consiste en introducir la probeta en un recipiente con agua y dentro de ésta se coloca la manguera de salida del gas hasta la parte superior. La presión del gas hace que el

nivel del agua en la probeta se desplace hacia abajo, por lo tanto, se mide la cantidad de biogás obtenida en cada uno de los sustratos.



Figura 18. Técnica volumétrica de desplazamiento de líquido.

Las unidades experimentales fueron seis biodigestores por cada régimen de temperatura tal como se describe a continuación en la tabla siguiente.

Tabla 3. Rangos de temperaturas

<b>Tratamientos</b>	<b>Rango Psicofílico</b>	<b>Rango Mesofílico</b>	<b>Rango Termofílico</b>
Cascarilla de arroz	6-8 °C	37 °C	56 °C
Cascarilla de café	6-8 °C	37 °C	56 °C

Los reactores a escala de laboratorio fueron introducidos en un baño termostático en el cual se seleccionaron la temperatura en rango Mesofílico y Termofílico para la experimentación en el rango Psicofílico se utilizó una refrigeradora.

### **3.6 Plan de tabulación y análisis estadístico**

A partir de los datos que fueron recolectados, se diseñó la base de datos correspondientes, utilizando el software estadístico InfoStat, versión 2019 para Windows. Una vez que se realizó el control de calidad de los datos registrados, se realizaron los análisis estadísticos pertinentes.

Así mismo, se realizó los análisis inferenciales específicos o prueba de hipótesis, de acuerdo con el compromiso establecido en los objetivos específicos, relacionado con el Análisis de Varianza Univariada (ANOVA de Fisher) y el test de Fisher (prueba de LSD). El procedimiento estadístico fue realizado de acuerdo con Pedroza & Dicoovski (2006).

Con los datos obtenidos en el proceso de recolección de la información se realizaron los Análisis de la Varianza (ANOVA), mediante el cual se probaron las hipótesis referidas a los parámetros de posición (esperanza) de dos o más distribuciones. La hipótesis que se someten a prueba, generalmente se establecen con respecto a las medias de las poblaciones en estudio o de cada uno de los tratamientos evaluados en un experimento (Aguilera Reyes, 2019).

Antes de realizar el ANOVA, se hizo el diagnóstico de la normalidad, homogeneidad e independencia de residuos. Para tal efecto, se obtuvieron previamente las variables RDUO de las variables y PRED. A partir de los residuos y sus transformaciones se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad, diagnóstico de la normalidad, homogeneidad e independencia de residuos y homogeneidad de varianzas (Aguilera Reyes, 2019).

## Capítulo IV

### 4.1 Resultados y discusión

#### 4.1.1 Caracterización de los parámetros fisicoquímicos de la cascarilla de arroz y café como materia orgánica biodegradable.

Tabla 4. Análisis de la Varianza para la variable % Masa seca

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	4.99	1	4.99	5.58	0.0774
Tratamientos	4.99	1	4.99	5.58	0.0774
Error	3.57	4	0.89		
Total	8.56	5			

El ANOVA realizado, para evaluar el efecto de los diferentes sustratos sobre el % de Masa Seca, demostró lo siguiente:

Existe un efecto no significativo del tratamiento (diferentes sustratos cascarilla de arroz y café), sobre la variable respuesta % de Masa Seca, lo cual se evidencia con un  $p = 0,0774$ , que resultó ser mayor que el nivel crítico de comparación  $\alpha = 0.05$ . Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula de  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_n$ . Esto quiere decir que la respuesta estadística es no significativa, lo cual demostró que no existe una relación de causa-efecto de los tratamientos (diferentes sustratos cascarilla de arroz y café), sobre la variable respuesta % de Masa Seca.

Posterior al ANOVA, se realizó la prueba de rangos múltiples o prueba LSD Fisher (Diferencia Mínima Significativa), con un Alfa = 0.05. Esta prueba permitió demostrar que, los sustratos de cascarilla de arroz y café, no tienen diferencias estadísticas entre sí, con respecto a la variable dependiente % de Masa Seca, para la cual se obtuvo un valor promedio máximo de 88.67 para la cascarilla de arroz y un valor mínimo de 86.78 para el sustrato de cascarilla de arroz. Por ello, se recomienda la cascarilla de café en primer lugar y luego la cascarilla de arroz.



Tabla 5. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=2.15373

Tratamientos	Medias	n	E.E.
Cascarilla café	86.78	3	0.55 A
Cascarilla arroz	88.67	3	0.55 A

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )*

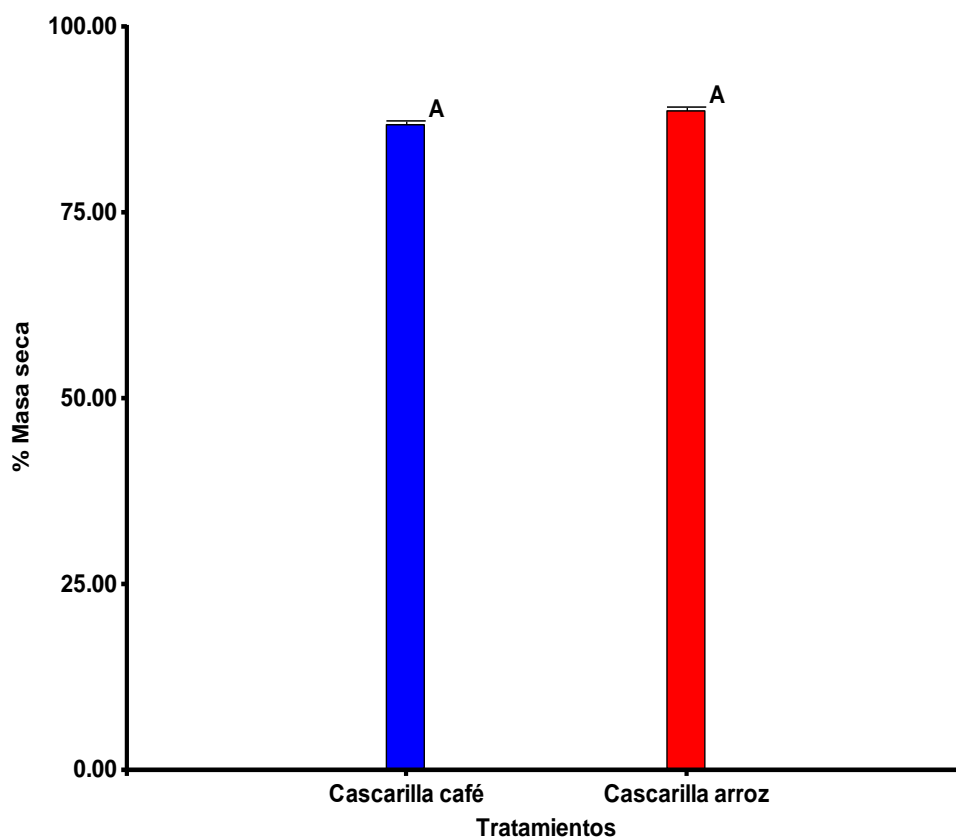


Figura 19. Masa seca de los sustratos.

Los resultados obtenidos para la cascarilla de arroz y café se encuentran en los rangos entre el 92 y 85% definidos por (Scientia et.al.,2007) y (Varnero & Arellano, 1991).

Tabla 5. Análisis de la Varianza para la variable % Cenizas

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.95	1	0.95	0.37	0.5746
Tratamientos	0.95	1	0.95	0.37	0.5746
Error	10.22	4	2.56		
Total	11.18	5			

El ANOVA realizado, para evaluar el efecto de las cascarillas arroz y café en relación al % de Cenizas, demostró lo siguiente:

Existe un efecto no significativo del tratamiento (cascarilla de arroz y cascarilla de café), sobre la variable % de Cenizas, lo que se evidencia con un  $p = 0,5746$ , que resultó ser mayor que el nivel crítico de comparación  $\alpha = 0.05$ . Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula de  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_n$ . Esto quiere decir que la respuesta estadística es no significativa, lo cual no demostró que existe una relación de causa-efecto de los tratamientos (cascarilla de arroz y cascarilla de café), sobre la variable % de Cenizas.

Posterior al ANOVA, se realizó la prueba de rangos múltiples o prueba LSD Fisher (Diferencia Mínima Significativa), con un Alfa = 0.05, permitió demostrar que, los sustratos de cascarilla de arroz y café, no tienen diferencias estadísticas entre sí, con respecto a la variable dependiente % de Cenizas, para la cual se obtuvo un valor promedio máximo de 87.86 para la cascarilla de arroz y un valor mínimo de 87.06 para la cascarilla de café.

Tabla 6. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=3.62438

Tratamientos	Medias	n	E.E.
Cascarilla café	87.06	3	0.92 A
Cascarilla arroz	87.86	3	0.92 A

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )*

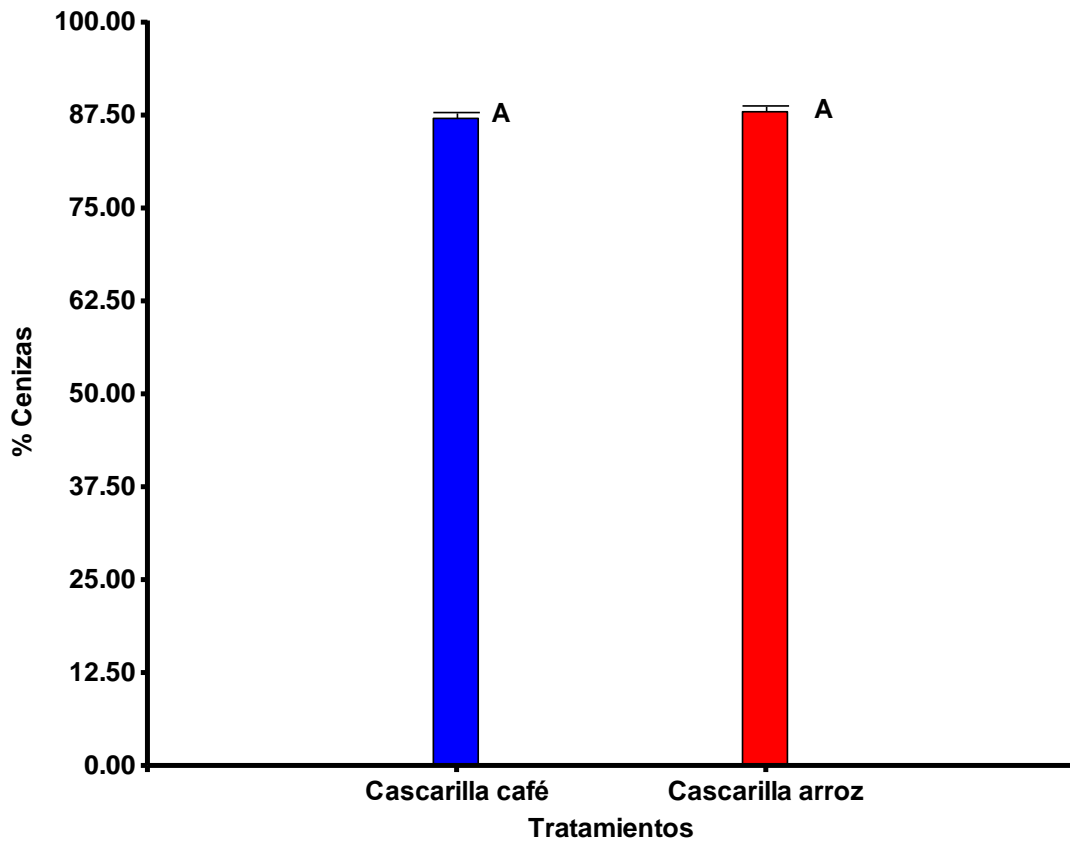


Figura 20. Cenizas de los sustratos

Tabla 7. Análisis de la Varianza para la variable % Sólidos volátiles

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.95	1	0.95	0.37	0.5746
Tratamientos	0.95	1	0.95	0.37	0.5746
Error	10.22	4	2.56		
Total	11.18	5			

El ANOVA realizado, para evaluar el efecto de las cascarillas arroz y café en relación al % de Sólidos volátiles, demostró lo siguiente:

Existe un efecto no significativo del tratamiento (cascarilla de arroz y cascarilla de café), sobre la variable % de Sólidos Volátiles, lo que se evidencia con un  $p = 0,5746$ , que resultó ser mayor que el nivel crítico de comparación  $\alpha = 0.05$ . Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula de  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_n$ . Esto quiere decir que la respuesta estadística es no

significativa, lo cual no demostró que existe una relación de causa-efecto de los tratamientos (cascarilla de arroz y cascarilla de café), sobre la variable % de Sólidos Volátiles.

Posterior al ANOVA, se realizó la prueba de rangos múltiples o prueba LSD Fisher (Diferencia Mínima Significativa), con un Alfa = 0.05, permitió demostrar que, los sustratos de cascarilla de arroz y café, no tienen diferencias estadísticas entre sí, con respecto a la variable dependiente % de Sólidos Volátiles, para la cual se obtuvo un valor promedio máximo de 12.93 para la cascarilla de café y un valor mínimo de 12.13 para la cascarilla de arroz.

Tabla 8. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=3.62438

Tratamientos	Medias	n	E.E.
Cascarilla arroz	12.13	3	0.92 A
Cascarilla café	12.93	3	0.92 A

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )*

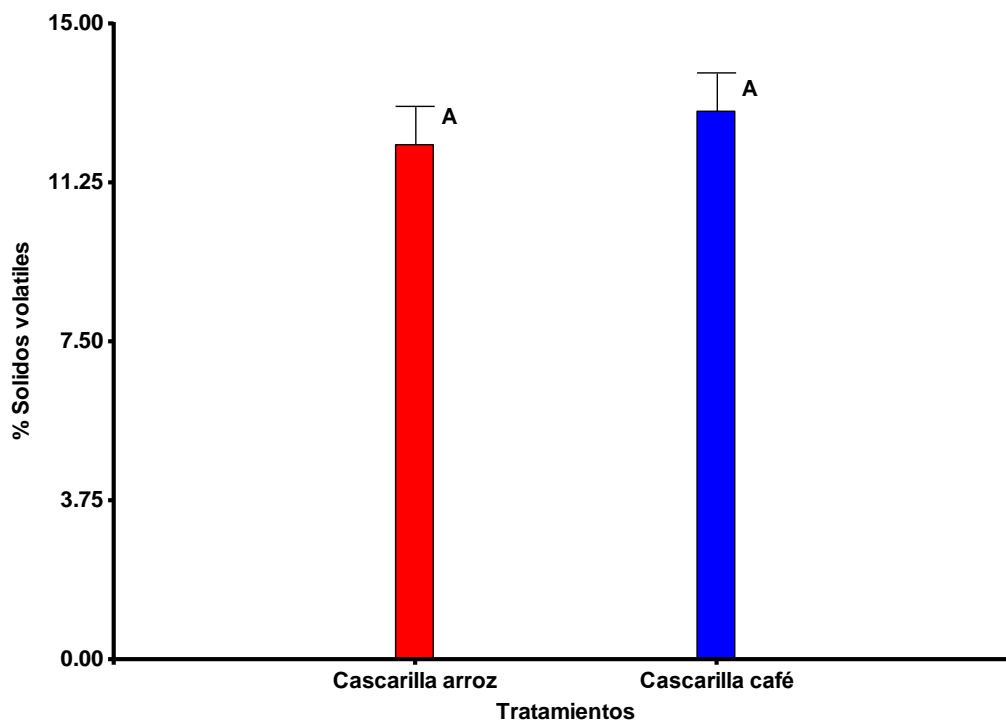


Figura 21. Sólidos volátiles de los sustratos

Tabla 9. Análisis de la Varianza para la variable % Masa húmeda

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	5.17	1	5.17	5.75	0.0745
Tratamientos	5.17	1	5.17	5.75	0.0745
Error	3.60	4	0.90		
Total	8.77	5			

El ANOVA realizado, para evaluar el efecto de las cascarillas arroz y café en relación al % de Masa húmeda, demostró lo siguiente:

Existe un efecto no significativo del tratamiento (cascarilla de arroz y cascarilla de café), sobre la variable % de Masa húmeda, lo que se evidencia con un  $p = 0,0745$ , que resultó ser mayor que el nivel crítico de comparación  $\alpha = 0.05$ . Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula de  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_n$ . Esto quiere decir que la respuesta estadística es no significativa, lo cual no demostró que existe una relación de causa-efecto de los tratamientos (cascarilla de arroz y cascarilla de café), sobre la variable % de Masa húmeda.

Posterior al ANOVA, se realizó la prueba de rangos múltiples o prueba LSD Fisher (Diferencia Mínima Significativa), con un Alfa = 0.05, permitió demostrar que, los sustratos de cascarilla de arroz y café, no tienen diferencias estadísticas entre sí, con respecto a la variable dependiente % de Masa húmeda, para la cual se obtuvo un valor promedio máximo de 13.19 para la cascarilla de café y un valor mínimo de 11.33 para la cascarilla de arroz.

Tabla 10. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=2.14915

Tratamientos	Medias	n	E.E.
Cascarilla arroz	11.33	3	0.55 A
Cascarilla café	13.19	3	0.55 A

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )*

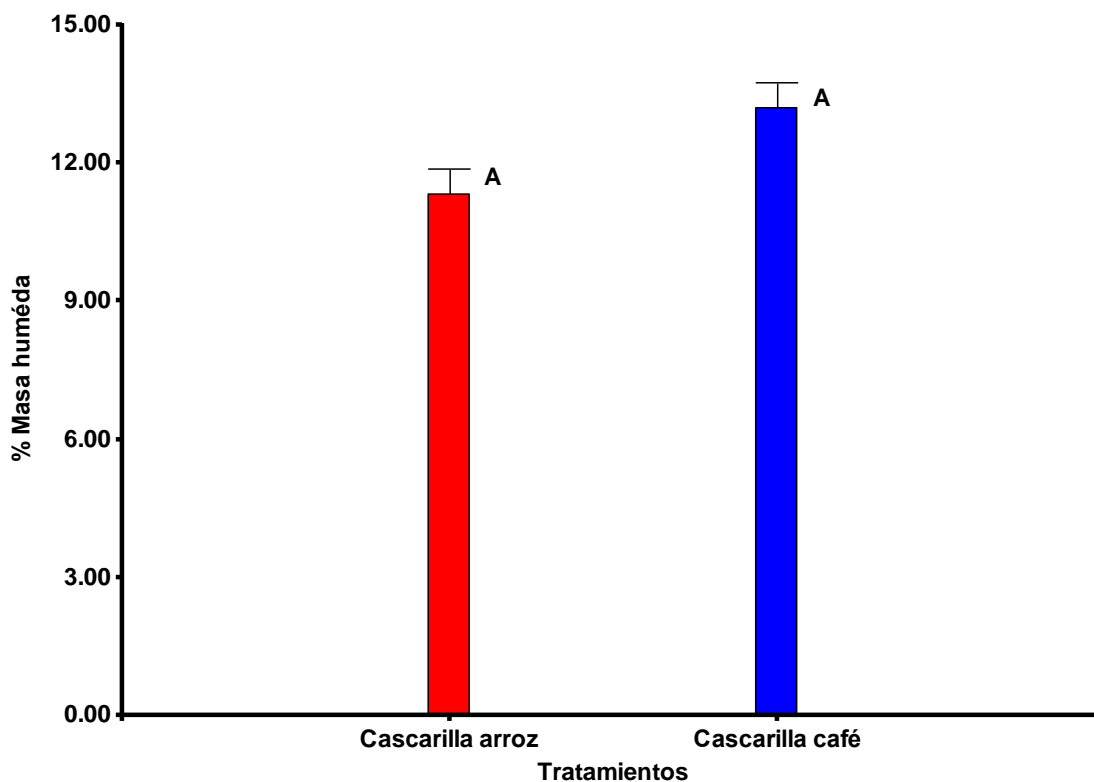


Figura 22. Masa húmeda de los sustratos orgánicos.

El contenido de humedad de la biomasa es la cantidad de agua en el material, expresado como porcentaje del peso del material. El porcentaje de masa húmeda para el sustrato de cascarilla de arroz y café, coincide con los rangos reportados por (Centeno & Rodríguez, 2018).

Tabla 11. Análisis de la Varianza para la variable Carbono

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	26.46	1	26.46	13.78	0.0206
Tratamientos	26.46	1	26.46	13.78	0.0206
Error	7.68	4	1.92		
Total	34.14	5			

El ANOVA realizado, para evaluar el efecto de las cascarillas arroz y café en relación al % de Carbono, demostró lo siguiente:

Existe un efecto significativo del tratamiento (cascarilla de arroz y cascarilla de café), sobre la variable % de Carbono, lo que se evidencia con un  $p = 0,0206$ , que resultó ser menor que el nivel crítico de comparación  $\alpha = 0.05$ . Por lo tanto, no se acepta la hipótesis nula de  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_n$ . Esto quiere decir que la respuesta estadística es significativa, lo cual demostró que existe una relación de causa-efecto de los tratamientos (cascarilla de arroz y cascarilla de café), sobre la variable % de Carbono.

Posterior al ANOVA, se realizó la prueba de rangos múltiples o prueba LSD Fisher (Diferencia Mínima Significativa), con un Alfa = 0.05, permitió demostrar que, los sustratos de cascarilla de arroz y café, tienen diferencias estadísticas entre sí, con respecto a la variable dependiente % de Carbono, para la cual se obtuvo un valor promedio máximo de 44 para la cascarilla de café y un valor mínimo de 39.80 para la cascarilla de arroz.

Tabla 12. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=2.02467

Tratamientos	Medias	n	E.E.
Cascarilla arroz	39.80	3	0.80 A
Cascarilla café	44.00	3	0.80 B

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )*

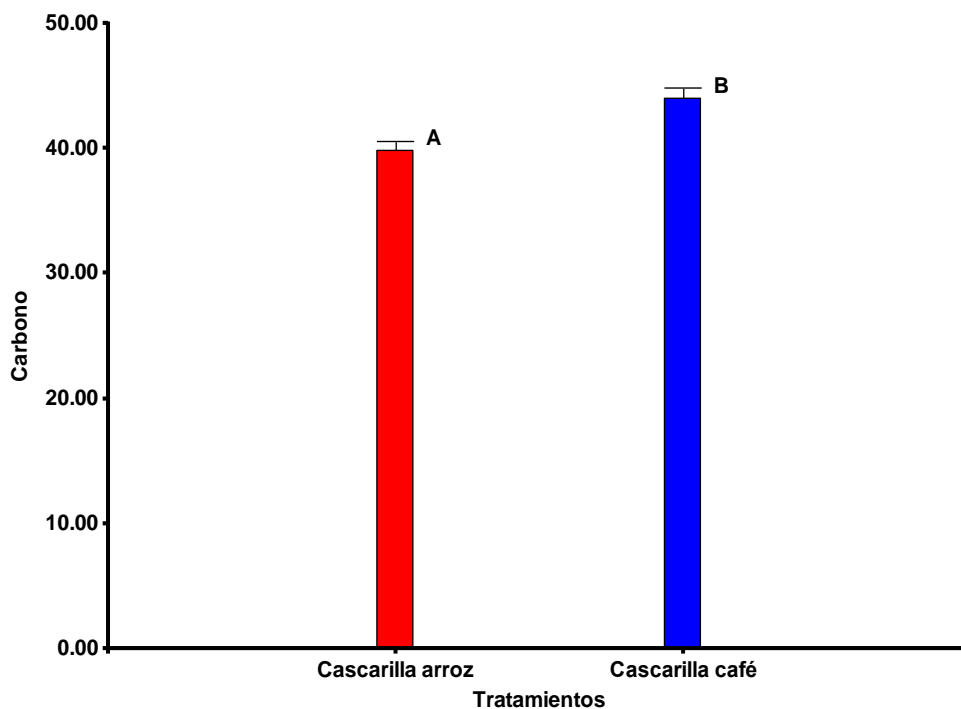


Figura 23. Carbono de los sustratos orgánicos

El valor de 39.80 para el carbono de la cascarilla de arroz, coincide con el encontrado de 39.1 de (Quinceno y Mosquera, 2010).

Tabla 13. Análisis de la Varianza para la variable Nitrógeno

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.06	1	0.06	18.00	0.0132
Tratamientos	0.06	1	0.06	18.00	0.0132
Error	0.01	4	0.01		
Total	0.07	5			

El ANOVA realizado, para evaluar el efecto de las cascarillas arroz y café en relación al % de Nitrógeno, demostró lo siguiente:

Existe un efecto significativo del tratamiento (cascarilla de arroz y cascarilla de café), sobre la variable % de Nitrógeno, lo que se evidencia con un  $p = 0,0132$ , que resultó ser menor que el nivel crítico de comparación  $\alpha = 0.05$ . Por lo tanto, no se acepta la hipótesis nula de  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_n$ . Esto quiere decir que la respuesta estadística es significativa,



lo cual demostró que existe una relación de causa-efecto de los tratamientos (cascarilla de arroz y cascarilla de café), sobre la variable % de Nitrógeno.

Posterior al ANOVA, se realizó la prueba de rangos múltiples o prueba LSD Fisher (Diferencia Mínima Significativa), con un Alfa = 0.05, permitió demostrar que, los sustratos de cascarilla de arroz y café, tienen diferencias estadísticas entre sí, con respecto a la variable dependiente % de Nitrógeno, para la cual se obtuvo un valor promedio máximo de 2.23 para la cascarilla de café y un valor mínimo de 2.03 para la cascarilla de arroz.

Tabla 14. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.19057

Tratamientos	Medias	n	E.E.
Cascarilla arroz	2.03	3	0.03 A
Cascarilla café	2.23	3	0.03 B

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )*

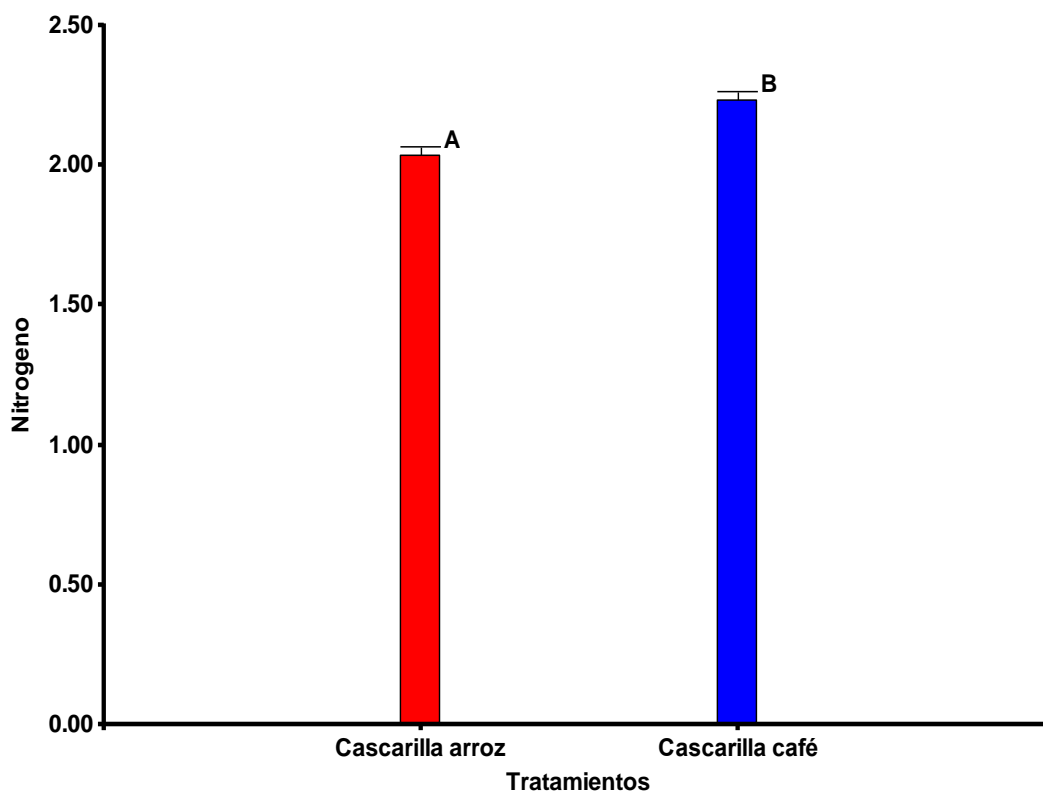


Figura 24. Nitrógeno de los sustratos

Tabla 15. Análisis de la Varianza para la variable Relación C/N

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.02	1	0.2	1.13	0.3486
Tratamientos	0.02	1	0.02	1.13	0.3486
Error	0.05	4	0.01		
Total	0.07	5			

El ANOVA realizado, para evaluar el efecto de las cascarillas arroz y café en relación al de Relación C/N, demostró lo siguiente:

Existe un efecto no significativo del tratamiento (cascarilla de arroz y cascarilla de café), sobre la variable de Relación C/N, lo que se evidencia con un  $p = 0,3486$ , que resultó ser mayor que el nivel crítico de comparación  $\alpha = 0.05$ . Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula de  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_n$ . Esto quiere decir que la respuesta estadística es no significativa, lo cual no demostró que existe una relación de causa-efecto de los tratamientos (cascarilla de arroz y cascarilla de café), sobre la variable de Relación C/N.

Posterior al ANOVA, se realizó la prueba de rangos múltiples o prueba LSD Fisher (Diferencia Mínima Significativa), con un Alfa = 0.05, permitió demostrar que, los sustratos de cascarilla de arroz y café, no tienen diferencias estadísticas entre sí, con respecto a la variable dependiente de Relación C/N, para la cual se obtuvo un valor promedio máximo de 19.67 para la cascarilla de café y un valor mínimo de 19.57 para la cascarilla de arroz.

Tabla 16. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.27046

Tratamientos	Medias	n	E.E.
Cascarilla arroz	19.57	3	0.07 A
Cascarilla café	19.67	3	0.07 B

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )*

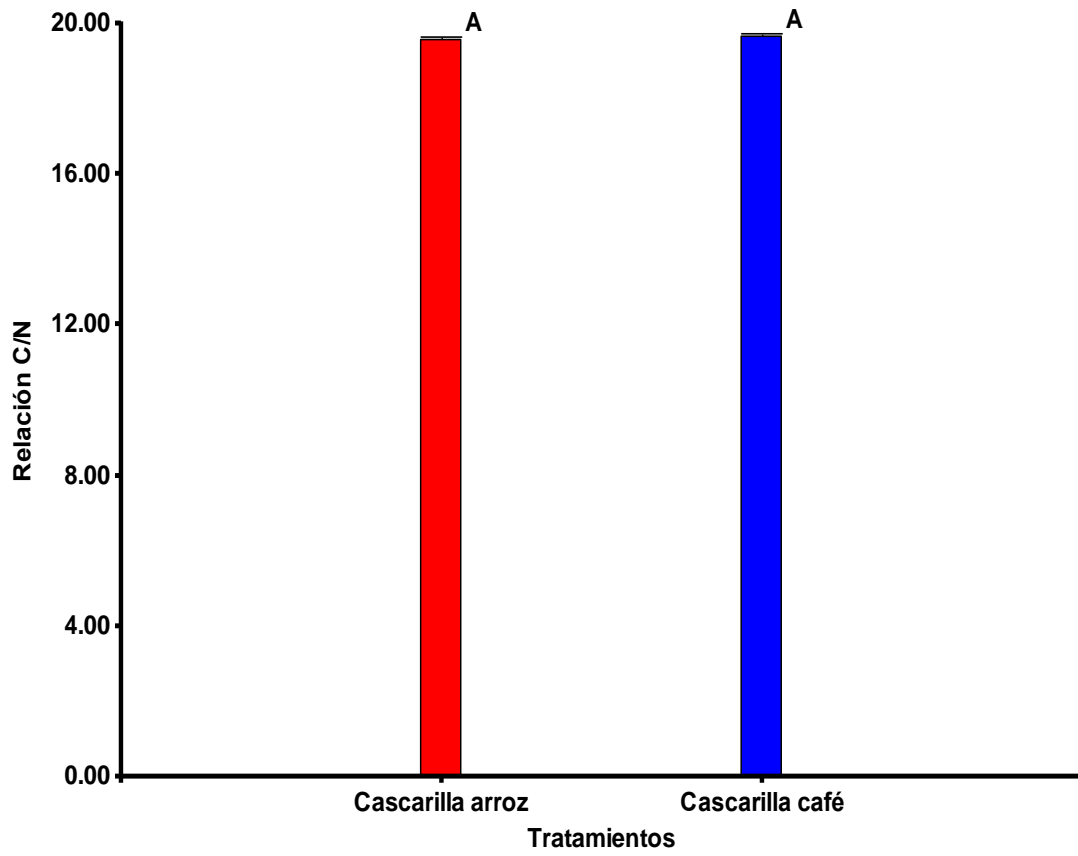


Figura 25. Relación C/N de los sustratos.

#### 4.1.51 Determinación de la producción de biogás generado en un biodigestor a escala de laboratorio a partir de los residuos orgánicos del café y arroz.

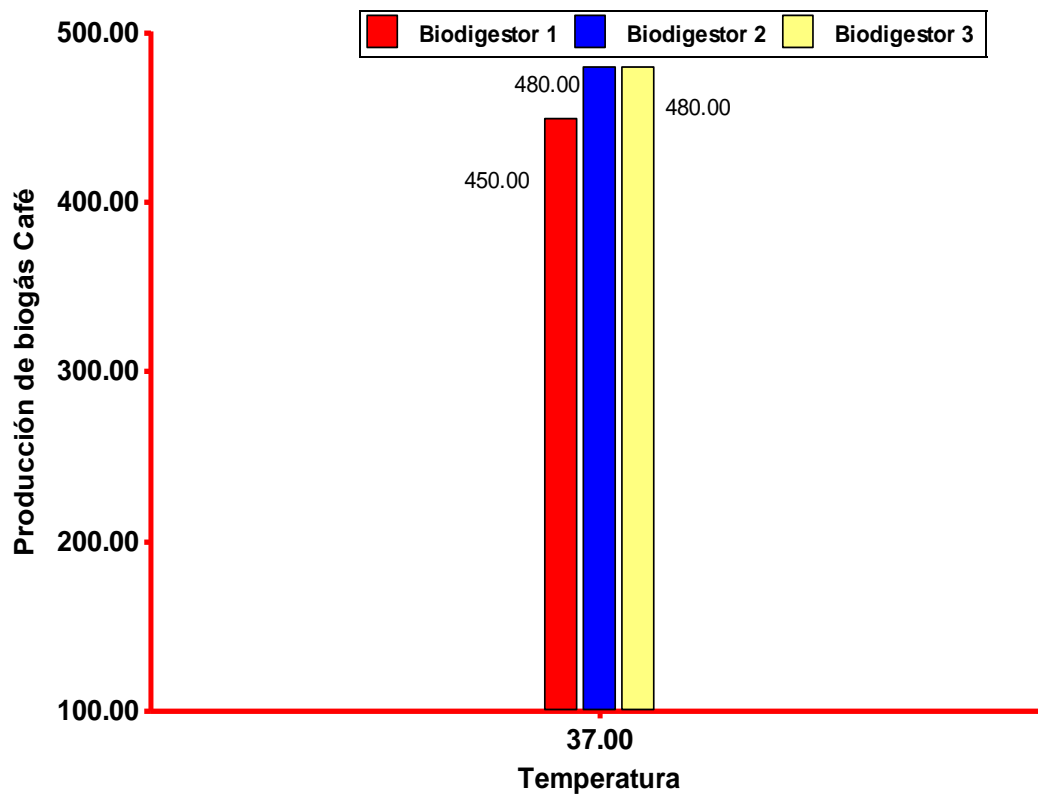


Figura 26. Producción de Biogás Cascarilla de café en Rango Mesofilico.

La producción de biogás de la cascarilla de café a 37 grados el promedio de producción de los tres biodigestores fue de 470 ml, lo cual indica que se aprovecha el 50% del volumen total introducido al biodigestor.

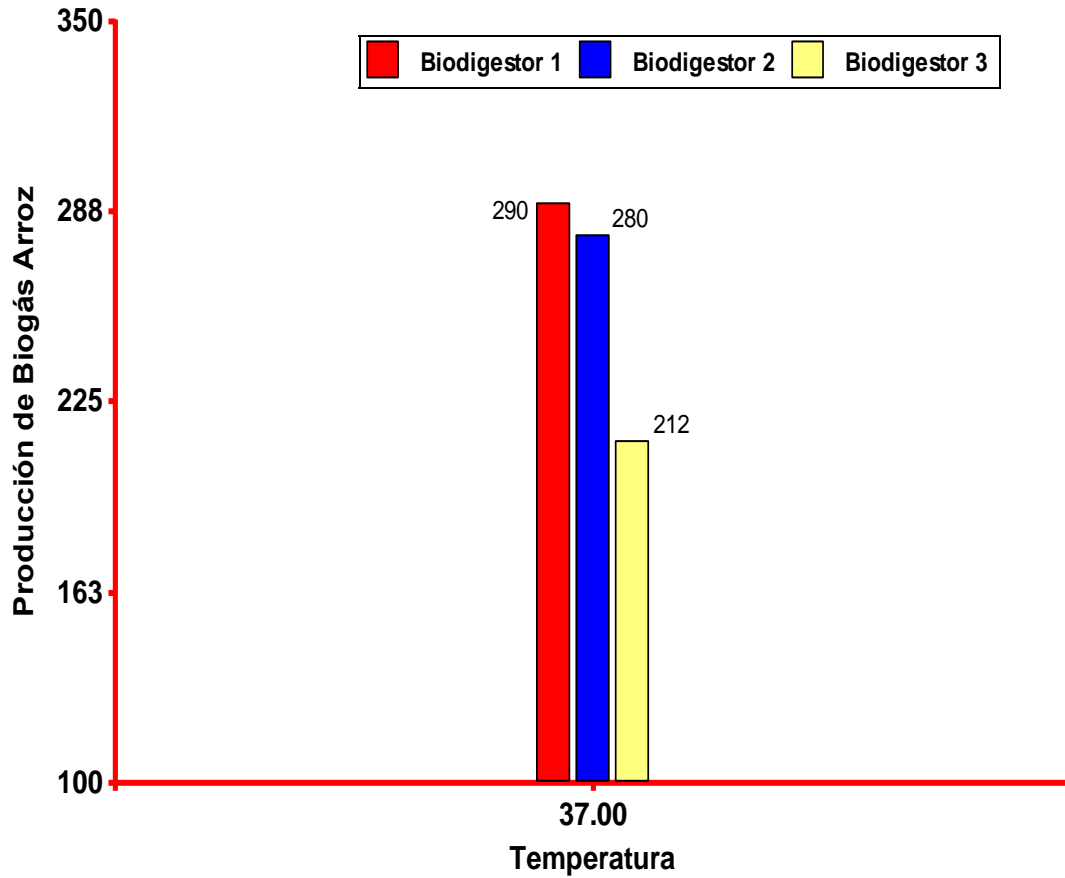


Figura 27. Producción de Biogás Cascarilla de arroz en Rango Mesofílico.

La producción de biogás de la cascarilla de arroz a 37 grados el promedio de producción de los tres biodigestores fue de 260 ml, lo cual indica que se aprovecha el 26% del volumen total introducido al biodigestor.

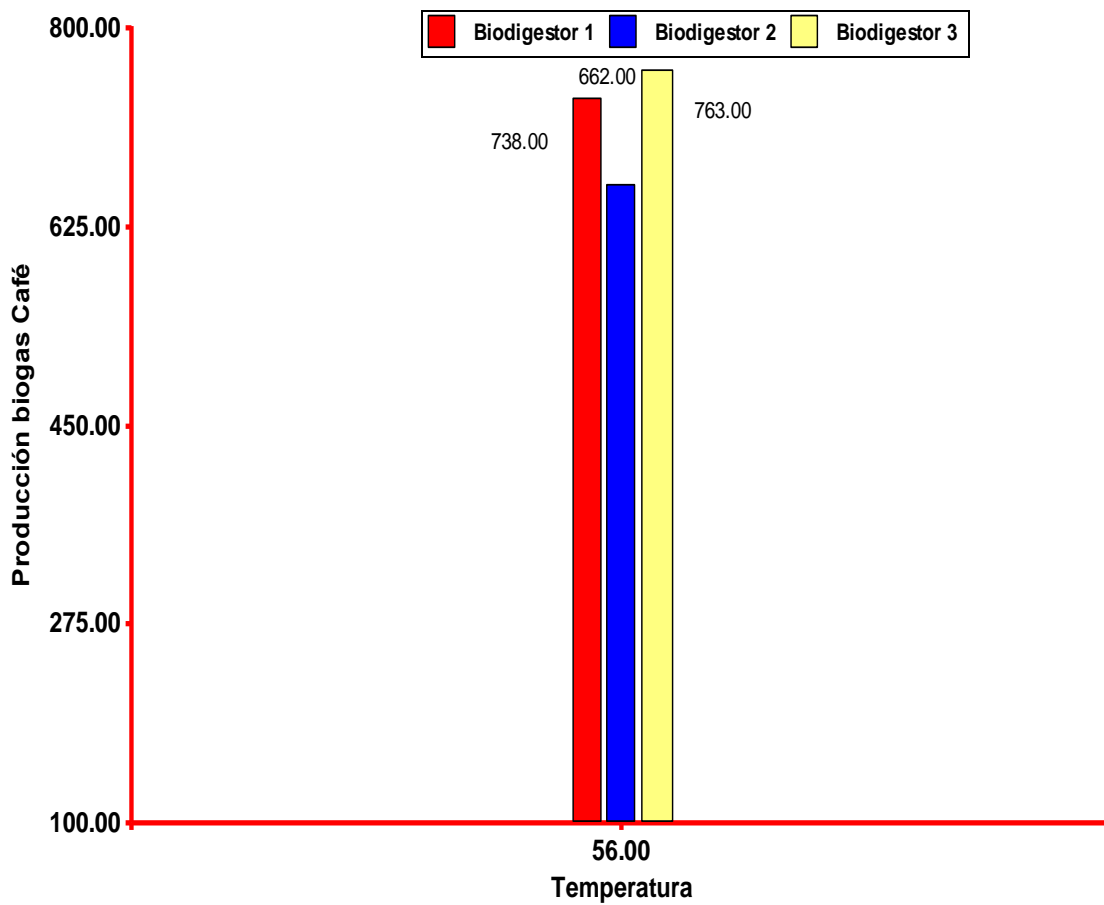


Figura 28. Producción de Biogás cascarilla de café en Rango Termofílico.

La producción de biogás de la cascarilla de café a 56 grados el promedio de producción de los tres biodigestores fue de 721 ml, lo cual indica que se aprovecha el 70% del volumen total introducido al biodigestor.

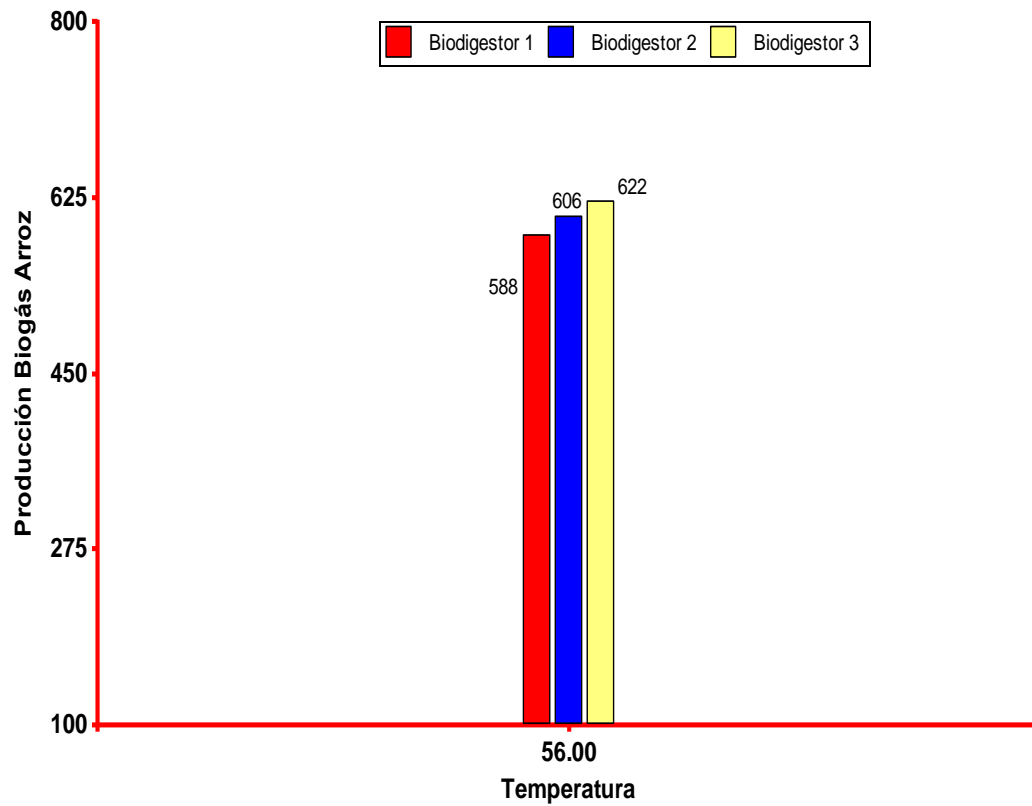


Figura 29. Producción de Biogás cascarilla de arroz en Rango Termofílico.

La producción de biogás de la cascarilla de arroz a 56 grados el promedio de producción de los tres biodigestores fue de 738 ml, lo cual indica que se aprovecha el 70% del volumen total introducido al biodigestor.

**4.1.52 Determinar el efecto de la temperatura y pH en la producción de biogás que se obtiene en el proceso biológico anaeróbico controlado.**

Tabla 17. Perfil de medias de pH en rango Mesofilico 37°C

Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx
pH café 1	4	6.92	0.31	6.58	7.33
pH café 2	4	6.3	0.21	6.58	7.10
pH café 3	4	7.36	0.09	7.25	7.46
pH arroz 1	4	6.85	0.11	6.72	6.96
pH arroz 2	4	6.69	0.24	6.38	6.90
pH arroz 3	4	6.72	0.15	6.51	6.85

Como se observa en la tabla 17, los pH obtenidos en régimen Mesofilico a 37 grados en las unidades de análisis experimental, la cascarilla de café y la cascarilla de arroz obtuvieron valores comprendidos entre 6.85 y 7.33 lo cual coincide con lo establecido por Lay, Li, & Noike (1997) que plantea que el pH debe mantenerse entre 6 y 8. Esto permitió no correr el riesgo de que el proceso de fermentación se inhibiera y pudiera detenerse, similar a lo reportado por Reyes Aguilera (2019), que obtuvo las mayores cantidades de biogás a pH entre 6 y 8, además, indica que el pH influye en la producción de biogás.

Tabla 18. Perfil de medias de pH para el rango Termofílico 56 grados

Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx
pH café 1	4	6.67	0.13	6.51	6.80
pH café 2	4	6.42	0.13	6.27	6.56
pH café 3	4	6.83	0.07	6.75	<b>6.90</b>
pH arroz 1	4	6.41	0.13	6.29	6.60
pH arroz 2	4	6.77	0.11	6.66	6.90
pH arroz 3	4	6.39	0.14	<b>6.20</b>	6.50

Como se observa en la tabla 18, los pH obtenidos en régimen Termofílico a 56 grados en las unidades de análisis experimental, la cascarilla de café y la cascarilla de arroz



obtuvieron valores comprendidos entre 6.90 y 6.20 lo cual coincide con lo establecido por Lay, Li, & Noike (1997) que plantea que el pH debe mantenerse entre 6 y 8. De acuerdo con Clark et al., (1989), los microorganismos anaerobios necesitan de manera estricta un pH en torno a la neutralidad para su desarrollo correcto, aunque permiten cierta oscilación, pueden presentarse problemas si baja de 6 o sube de 8.

El pH a temperaturas de 37°C y 56°C presentaron diferencias en cuanto a valores máximos y mínimos, en régimen Termofílico las medidas estuvieron cercanas a 6 lo cual indica que a mayor temperatura el pH tiende a desestabilizarse (Martinez , Numpaque , & Alavarado, 2016).

Tabla 19. Producción de biogás en los rangos de temperatura (Mesofilico y Termofílico).

<b>Temperatura</b>	<b>Producción</b>						
	<b>Mesofilico</b>	Cascarilla arroz 1	Cascarilla arroz 2	Cascarilla arroz 3	Cascarilla café 1	Cascarilla café 2	Cascarilla café 3
37		60	60	50	20	60	60
37		70	68	50	130	80	100
37		80	76	56	150	170	150
37		80	76	56	150	170	170
	<b>Termofílico</b>						
56		88	76	70	88	80	81
56		250	250	250	250	250	250
56		206	190	180	216	216	232

De acuerdo con los resultados, el rendimiento de biogás fue mayor cuando las unidades de análisis experimental estuvieron sometidas a temperatura de rango Termofílico controlado de 56°C debido a que la temperatura es un factor que influye en la generación de biogás, de acuerdo con Asankulova, (2008) cuanto más caliente el ambiente, mayor es la velocidad y el grado de fermentación de la materia orgánica.

La producción de biogás alcanzada en el régimen termofílico fue de tres días, mientras tanto que en el régimen mesofilico fue de cuatro días, esto concuerda con lo manifestado

por Aguilera Reyes, (2019) que considera la temperatura de operación del digestor, uno de los principales parámetros de diseño, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaeróbica e influye para producir más o menos biogás.

La temperatura de operación de los biodigestores en cualquiera de los rangos (psicrofilico, mesofilico o termofílico) siempre producirá biogás, por lo tanto, la temperatura es un indicador de producir mayor o menor cantidad de biogás tal y como lo señala (Varnero et al., 1990).

## Capítulo V

### 5.1 Conclusiones

1. El análisis a las propiedades físico-químico a los sustratos orgánicos tales como: cascarilla de café y arroz que formaron parte de las unidades de análisis experimental, estuvieron dentro de los rangos óptimos, que favorecen las necesidades de crecimiento y producción de metano de las bacterias anaerobias. De acuerdo a los resultados estadísticos presentaron similitud en las medias obtenidas, por lo tanto, no existe diferencias significativas entre ambos tratamientos.
2. Las mayores cantidades de biogás producidos se obtuvieron del sustrato orgánico cascarilla de café en los dos rangos de temperatura y seis replicas a las que fueron sometidos los tratamientos durante la fase experimental.
3. Los pH obtenidos en régimen Mesofílico y Termofílico de la cascarilla de café y la cascarilla de arroz estuvieron dentro de los rangos óptimos lo que favoreció no correr el riesgo de que el proceso de fermentación se inhibiera y pudiera detenerse.
4. La temperatura es un factor que influye en la generación de biogás, durante la fase experimental se observó que cuanto mayor es la temperatura, menor es el tiempo que tarda en producir biogás un determinado sustrato, pero se corre el riesgo de desestabilizar el pH tal es el caso de las unidades experimentales sometidas a régimen Termofílico en el cual sus valores estuvieron cerca de quedar fuera del rango óptimo.

## **5.2 Recomendaciones**

1. Se recomienda darle continuidad al estudio en rango psicofilico para tener una investigación completa sobre los tres rangos de temperatura debido a que se hicieron tres intentos y no fue posible realizar el ensayo.
2. Desarrollar esta investigación a condiciones reales de campo de tal manera que se implemente este tipo de tecnología de energías renovables para el aprovechamiento de los sustratos orgánicos ya evaluados para la producción de biogás en las zonas cafetaleras y arroceras de norte y centro del país.

### 5.3 Bibliografía

- Aguilera Reyes, E. A. (2019). *Generación de biogás, mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos, en la zona rural de Estelí, en el período 2016-2018*. Tesis Doctoral, Estelí. Obtenido de <http://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/12306>
- Ahring, B. K., Sandberg, M., & Angelidaki, I. (1995). *Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digester*.
- Aqualimpia Engineering e.K. (08 de Agosto de 2017). *Fases de la digestión anaerobia*. Recuperado el 01 de Agosto de 2019, de <https://www.aqualimpia.com/digestion-anaerobica/>
- Arce, C. J. (Agosto de 2011). *Universidad Politécnica Salesiana sede guayaquil*. Recuperado el jueves de Agosto de 2019, de Diseño de un Biodigestor para generar biogas y abono a partir de desechos organicos de animales aplicables en las zonas agrarias del litoral: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1593/15/UPS-GT000209.pdf>
- Arias Ortis, R. A., & Meneses Cruz, J. (2016). *Caracterización físico-química de residuos agroindustriales (cascarilla de arroz y cascarilla de café), como materia prima potencial para la obtención de bioetanol, Laboratorios de Química UNAN-Managua I-II semestre 2016*. Managua.
- Bidlingmaier, W. (2006). *Probes anaerobic degestion Biocycle journal of composting and organics recyclin*.
- Canales, F., Alvarado, E., & Pineda, E. (1994). *Metodología d ela Investigación. Manual para el Personal de Salud* (Segunda edición ed.). Washington: OPS.
- Carreras, N., & Dorronsoro, J. L. (1999). *APROVECHAMIENTO ENERGETICO DE LOS RESIDUOS SOLIDOS URBANOS (RSU)*. España.
- Carta González, J. A., Calero Pérez, R., Colmenar Santos, A., & Castro Gil, M. A. (2009). *Centrales de energías renovables. Generación eléctrica con energías renovables*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN.
- Castellon , J., & Espinoza, W. (2009). *Validación del uso de un secador Solar de Café*. Tesis de grado , Esteli. Recuperado el 12 de Junio de 2020
- Chen, Y., & Creamer, J. (2008). *Inhibition of anaero-bic digestion process: A Review*.
- Chugh, S., Chynoweth, D. p., Clarke, W., Pullammanappallil, P., & Rudolph, V. (1999). *Degradation of unsorted municipal solid waste by a leach bed process*.

- Clark, R. H., & Speece, R. E. (1989). *The pH tolerance of anaerobic digestion. advanced water pollution research.*
- Corona Zuñiga, I. (diciembre de 2007). *Biodigestores*. Recuperado el 23 de julio de 2019, de <https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/bitstream/handle/123456789/10722/Biodigestores.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Corrales, L. C., Antolinez Romero, D. M., Bohórquez Macías, J. A., & Corredor vargas, A. M. (11 de Noviembre de 2015). *Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta*. Recuperado el 30 de Julio de 2019, de <http://www.scielo.org.co/pdf/nova/v13n24/v13n24a06.pdf>
- De Baere, L. (2000). *Anaerobic Digestion Of Solid Waste: State Of the art.*
- Dorronsoro, J. L., & Carreras, N. (1999). *Aprovechamiento energetico del biogas generado a partir de residuos solidos urbanos.*
- Estrada, C. A. (Agosto de 2004). *GASIFICACIÓN DE BIOMASA PARA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES DE BAJO*. Recuperado el 3 de Agosto de 2019, de <file:///C:/Users/Admin/Downloads/Dialnet-GASIFICACIONDEBIOMASAPARAPRODUCCIONDECOMBUSTIBLESD-4842711.pdf>
- Fannin, K. (1987). *Start up, operation, stability, and control in aerobic digestion of biomass*. Recuperado el 15 de agosto de 2020, de <https://www.elsevier.com/search-result?query=start%20up%2C%20operation%2C%20stability%2C%20and%20control%20in%20aerobic%20digestion%20of%20biomass&labels>
- FAO. (2011). *Manual de Biogás*. Recuperado el 1 de Agosto de 2019, de <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- FAO. (2014). *BIOENERGÍA Y SEGURIDAD ALIMENTARIA ÉVALUACIÓN RÁPIDA (BEFS RA)*. Recuperado el 7 de Agosto de 2019, de <http://www.fao.org/3/a-bp844s.pdf>
- FAO. (s.f.). *FAO.org*. Obtenido de [www.fao.org/3/x5059s/x5059S03.html](http://www.fao.org/3/x5059s/x5059S03.html)
- Farem, E. (2019). *Lineas de investigación 2019-2022*. Obtenido de <https://farem.unan.edu.ni/investigacion/lineas-de-investigacion/>
- Flotats, X., Bonmati, A., Campos, E., & Teira, M. R. (2000). *El proceso de secado de purines en el marco de gestion integral de residuos ganaderos*.
- Flotats, X., Fernández, B., Palatsi, J., Fot, X., Vicent, T., Velo García, E., . . . Riba, J. (2009). *Modulo 7. Energía de la Biomasa* (Tercera ed.). Cátedra UNESCO de Sostenibilidad.

- Fundación Hábitat. (2 de Abril de 2005). *Biodigestores una alternativa a la autosuficiencia energetica y de biofertilizantes*. Recuperado el 6 de Agosto de 2019, de [ecos4mdl.pbworks.com/f/biodigestores.doc](https://ecos4mdl.pbworks.com/f/biodigestores.doc)
- Gallert, C., Bauer, S., & Winter, J. (1998). *Effect of ammonia on anaerobic degradation of protein by a mesophilic and thermophilic biowaste population*.
- García Garrido, S. (2009). *Centrales Termoeléctricas de Biomasa*. Madrid: RENOVATEC.
- García Rivas, S. S., & Estrada Siria, J. A. (2016). *Generación de energía a partir de la cascarilla de arroz y la pulpa de café*. Managua.
- Hashimoto, A. G. (1986). *Ammonia inhibition of methanogenesis from cattle wastes. Agricultural Waster*.
- Henández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2010). *Metodología de la Investigación*. (I. Editores, Ed.) Mexico: McGraw-Hill.
- Henze, M. (1995). *Wastewater, volumes and composition: biological and chemical process*. springer.
- Hernández Embate, A. J. (2013). *El potencial de los biodigestores como técnica sostenible para la producción de biogás en la Comunidad Indígena Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán*. Recuperado el 8 de Agosto de 2019, de <https://www.puma.unam.mx/pdf/tesis/licenciatura2013.pdf>
- Hernandez Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la Investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (Primera edición ed.). (Interamericana, Ed.) México: McGraw Hill.
- Hilbert, J. A. (2007). *Manual para la produccion de biogás*. México DF: Castelar. Obtenido de [https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual\\_para\\_la\\_produccion\\_de\\_biogas\\_del\\_iir.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual_para_la_produccion_de_biogas_del_iir.pdf)
- Hobson, p. N. (1995). *the treatment of agricultural wastes, en anaerobic digestion: a waste tratment techonology*.
- Hwu, C. H., & Lettinga, G. (1997). *Acute toxicity of oleate to acetate utilizing methamogens in mesophilic and temperature anaerobic sludge. Enzyme microbiology technolgt*.
- INIDE. (2020). *Instituto Nacional de desarrollo*. Obtenido de Instituto Nacional de desarrollo: [ribuni.edu.ni/2331/1/92058.pdf](https://ribuni.edu.ni/2331/1/92058.pdf)
- JKrugel, I., Nemeth, L., & Peddie, C. (1998). *Extending thermophilic anaerobic digestion for producing class a biosolods at the greater vancouver regional district annacis island wastewater treatment plant*.
- Lay, J. J., Li, Y. Y., & Noike, T. (1997). *influences of pH and moisture content on the methane production in high solids sludge digestion*.

- Lissent, G., Vandervivere, P., De Baere, L., Bley, E. M., & Verstraete, W. (2001). *Solid Waste Digester*.
- Mae-Wan, H. (2008). *biogas bonanza for third world development*. Obtenido de <http://www.i.sis.org.uk/BiogasBonanza.php>
- Mannise, R. (10 de Agosto de 2011). *Biodigestor*. Obtenido de <https://ecocosas.com/energias-renovables/biodigestor/?cn-reloaded=1>
- Martinez , S., Numpaque , H., & Alavarado, J. (2016). *Efecto de la Temperatura en la Producción de Biogás en un Bioreactor tipo Batch a través de la Descomposición Anaeróbica de Residuos Sólidos Orgánicos*. Colombia: Revista Electrónica De La Facultad De Ingeniería. Recuperado el 15 de Diciembre de 2020, de [https://www.researchgate.net/publication/321229255\\_Efecto\\_de\\_la\\_Temperatura\\_en\\_la\\_Produccion\\_de\\_Biogas\\_en\\_un\\_Bioreactor\\_tipo\\_Batch\\_a\\_traves\\_de\\_la\\_Descomposicion\\_Anaerobica\\_de\\_Residuos\\_Solidos\\_Organicos](https://www.researchgate.net/publication/321229255_Efecto_de_la_Temperatura_en_la_Produccion_de_Biogas_en_un_Bioreactor_tipo_Batch_a_traves_de_la_Descomposicion_Anaerobica_de_Residuos_Solidos_Organicos)
- Martinez Quant, F. V., & Romero, J. A. (junio de 2017). *Diseño de biodigestor para las cooperativas "el polo" R.L ubicada en el municipio de San Sebastian de Yali-Jinotega*. Recuperado el 22 de julio de 2019, de <http://ribuni.uni.edu.ni/1582/1/91222.pdf>
- Massound, M., & El-Fadel, M. (2001). *Methane emissions from wastewater management*.
- Mata Álvarez, J., Macé, S., & LLabrés, P. (2000). *Anaerobic of organic solid Wastes Anoveriew of research achievements and perspective*.
- Metcalf, & Eddy. (1994). *ingenieria sanitaria: tratamiento, evacuacion y reutilizacion de aguas residuales* (tercera ed., Vol. 1). colombia: McGRAW Hill. Recuperado el 28 de septiembre de 2020, de <https://uploaded.net/file/40eeoqjy>
- Milan, Z., Sanchez, E., Weiland, P., Borja, R., Martin, A., & Llangovan, K. (2011). *Influnce of diferent natural zeolite concentrations on the anaerobic digestion of piggery waste*.
- Moltalván, A., & Zelaya Rayo, A. (Mayo de 2015). *Producción de biogás a partir de la pulpa de cafe con prototipo de generador electrico*. Recuperado el 15 de Julio de 2019, de <http://ribuni.uni.edu.ni/1431/1/60204.pdf>
- Monnet, F. (2003). *an introduction to anaerobic digestion of organic wastes. remade scotland*. Recuperado el 5 de septiembre de 2020, de <https://www.remade.org.uk/media/9102/an%20introduccion%20to%20anaerobic%20odigestion%202003.pdf>
- Nevarez , R., & Cuzme, X. (2016). *EFFECTOS DE TEMPERATURA Y TIEMPO DE DESHIDRATACIÓN, EN CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y SENSORIALES DE CEBOLLA PERLA (Allium cepa L) EN POLVO*. Tesis de grado, Calceta. Recuperado el 12 de Mayo de 2020



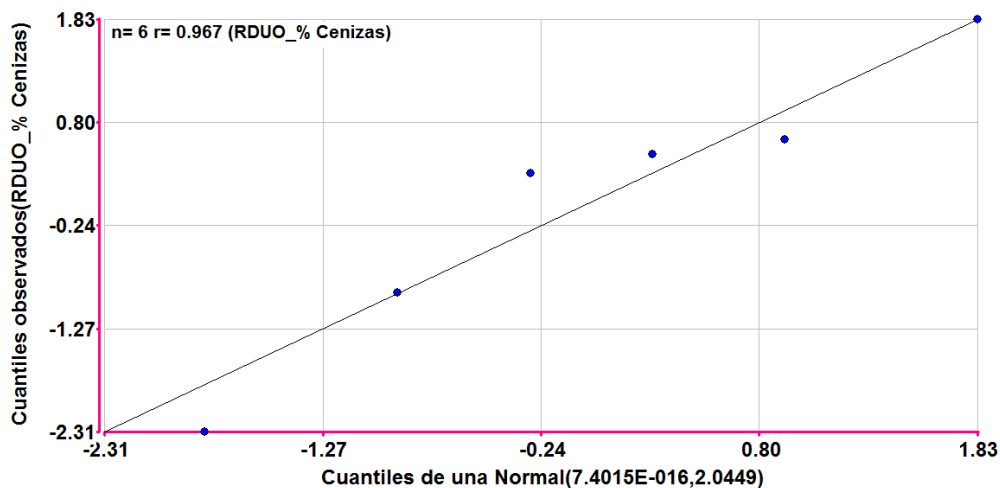
- Nopharatana , A., Pullammanappallil, P. C., & Clarke, W. (2003). *A dynamic mathematical model for sequential leach bed anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste*.
- Olano Requemel, E. (2018). *Producción de biogás a partir de aguas mieles y pulpa de café (coffee arabica)*.
- Osorio, J., Ciro, H., & GonzaleZ, H. (2007). *Evaluacion de un sistema de biodigestion en serie para clima frio*.
- Pedroza Pacheco, M. (1993). *Fundamentos de experimentacion agricola* (primera ed.). arte S.A.
- Pedroza Pacheco, M. E., & Dicoovski, L. M. (2006). *sistema de analisis estadisticos con SPSS*. Obtenido de <http://repiica.iica.int/docs/B3064e/B3064e.pdf>
- Plaster, E. J. (2000). *La ciencia del suelo y su manejo. Paraninfo*. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v9n46/2007-1132-remcf-9-46-4.pdf>
- Reyes Aguilera. (s.f.). *Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de las excretas de ganado, caballo, cerdo y gallinaza para la generación de biogás*.
- Reyes Aguilera, E. A. (Octubre-Diciembre de 2017). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. *Revista Científica de FAREM-Estelí. Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano*. doi:<https://doi.org/10.5377/farem.v0i24.5552>
- Reyes Aguilera, E. A. (2019). *generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sutratos orgánicos en la zona rural de Estelí, en el período 2016-2018*. Tesis doctorales, Estelí. Recuperado el 15 de Julio de 2020, de <https://repositorio.unan.edu.ni/12306/1/5892.pdf>
- Reyes Aguilera, E. A., & Pérez Castellón, E. (2019). Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de las excretas de ganado, caballo, cerdo y gallinaza para la generación de biogás. *Revista Científica de FAREM-Estelí*(31), 97-108.
- Romero, G. M. (Agosto de 2017). *Aqua limpia engineering*. Recuperado el jueves de Agosto de 2019, de Que es el Biogas: <file:///C:/Users/Admin/Downloads/QUE-ES-EL-BIOGAS.pdf>
- Sanabria Vindell, O. J., Sánchez Melgara, A. E., & Rodas Espinoza, Y. S. (2018). *GENERACIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA A PARTIR DE APROVECHAMIENTO DE SUSTRATOS ORGÁNICOS (PASTO Y ASERRIN), EN LA CIUDAD DE ESTELÍ EN EL AÑO 2017*. Estelí.
- Secretaría de Energía. (2008). *Energías Renovables*. Recuperado el 5 de Agosto de 2019, de   
 de Energía Biomasa:

[http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro\\_energia\\_biomasa.pdf](http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_biomasa.pdf)

- Segalás, J., Rosas, M., Dávila, C., Chiroque, J., Marcelo, O., Coello, J., & Garrido, N. (2011). *Modulo 3. Evaluación de Recursos Energéticos Renovables* (Quinta ed.). UNESCO.
- Soria, M., Ferrera, R., Etchevers, J., Alcantar, G., & Trinidad, J. (2001). *Produccion de biofertilizantes mediante biodigestion de excreta liquida de cerdo*. Terra latinoamericana. Recuperado el 20 de julio de 2020, de <http://www.redalyc.org/pdf/573/57319408.pdf>
- Speece, R. (1983). *Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment*. doi:10.1021/es00115a725
- Tamayo y Tamayo, M. (2003). *El proceso de la investigación científica* (Cuarta edición ed.). (G. N. Editores, Ed.) Mexico: LIMUSA.
- Tchobanoglous, G., Hilary, T., & Vigil, S. (1997). *gestion integral de residuos solidos* (Vol. 2). españa: McGraw Hill. Recuperado el 20 de agosto de 2020, de <https://es.scribd.com/doc/125378511/tchobanoglous>
- Valdivia, T. R. (2000). *USO DE BIOGAS PARA LA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA MEDIANTE UN MOTOR GASOLINERO ESTACIONARIO MODIFICADO*. TESIS DE MAESTRIA EN ENERGIAS RENOVABLES, UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASAGRE GROHMANN, LIMA. Recuperado el 10 de septiembre de 2020, de <http://www.tesis.unjbg.edu.pe/bitstream>
- Van Lier, J. B., Hulsbeek, J., Stams, A. J., & Lettinga, G. (1993). *temperature susceptibility of thermophilic methanogenic: implication for reactor start-up and operation*.
- Varnero, M., & Arellano, J. (1990). *Aprovechamiento racional de desechos organicos*. FAO, santiago. Obtenido de <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- Vogt, G. M., Liu, H. M., Kennedy, K. J., Vogt, H. S., & Holbein, B. E. (2002). *Super blue box recycling(SUBBOR) enhanced two satage. Anaerobic digestion process for recycling municipal solid waste: Laboratory pilot studies*.
- Wang, X., Yang, G., Feng, Y., Ren, G., & Han, X. (2012). *Optimizing feeding composition and carbon-nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic codigestion of dairy, chicken manure and wheat straw*. Bioresource Technology.

## 5.4 Anexos

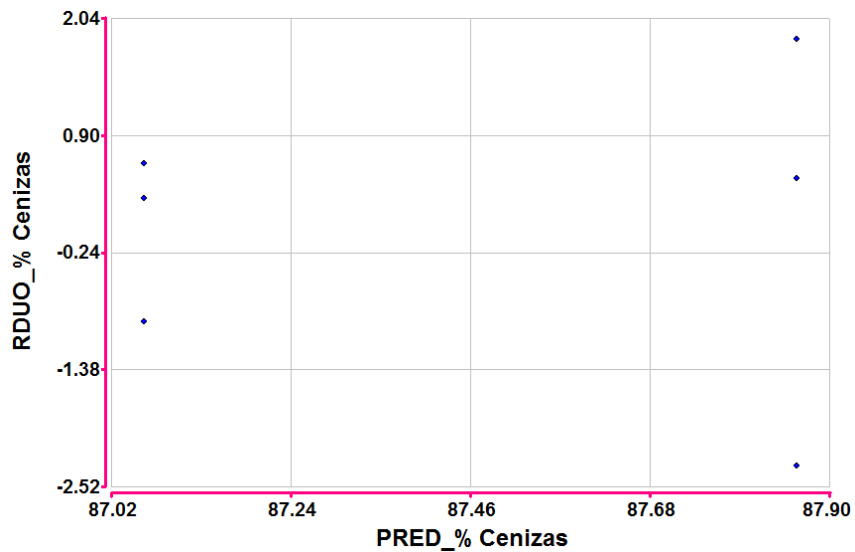
### Normalidad de los residuos ANAVA 1



Prueba de Shapiro Francia

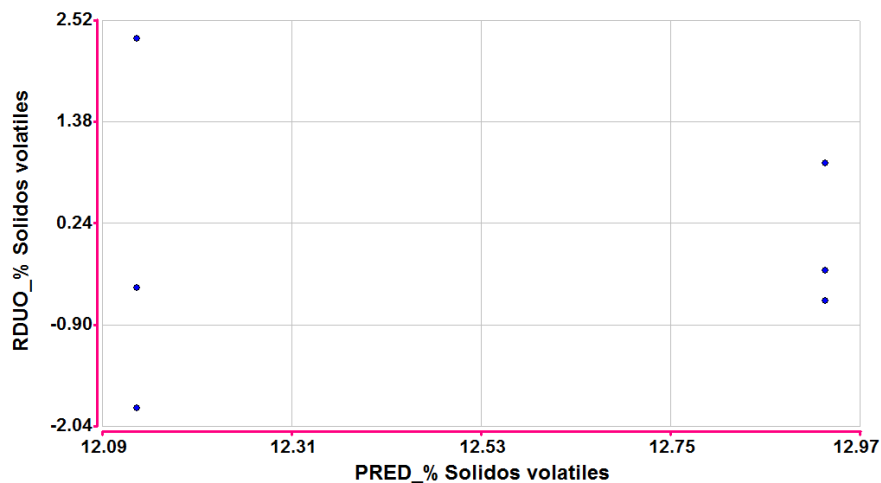
### Prueba de Levene RDUO % Cenizas

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.00	1	0.00	0.00	>0.9999
Tratamientos	0.00	1	0.00	0.00	>0.9999
Error	10.22	4	2.56		
Total	10.22	5			



Prueba de independencia de los residuos.

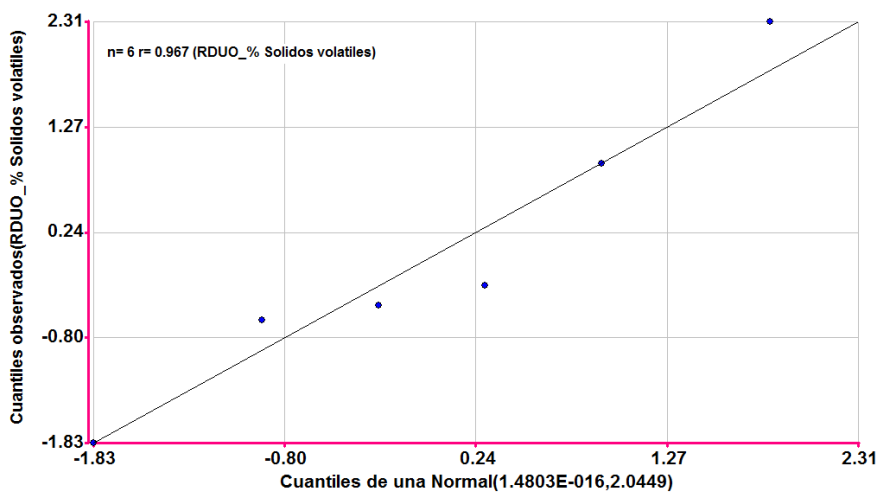
## Normalidad de los residuos ANAVA 2



Prueba de Shapiro Francia

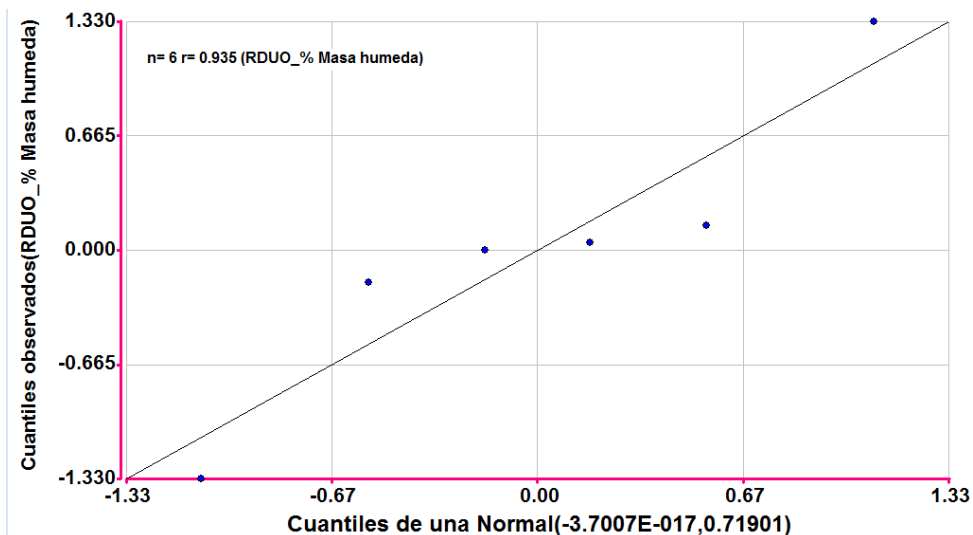
## Prueba de Levene % Solidos volátiles

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.00	1	0.00	0.00	>0.9999
Tratamientos	0.00	1	0.00	0.00	>0.9999
Error	10.22	4	2.56		
Total	10.22	5			



Prueba de independencia de los residuos.

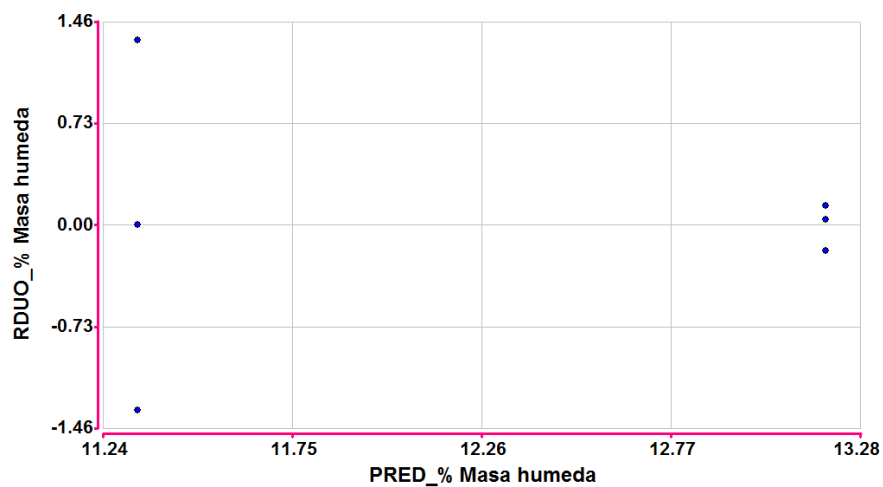
### Normalidad de los residuos ANAVA 3



Prueba de Shapiro Francia.

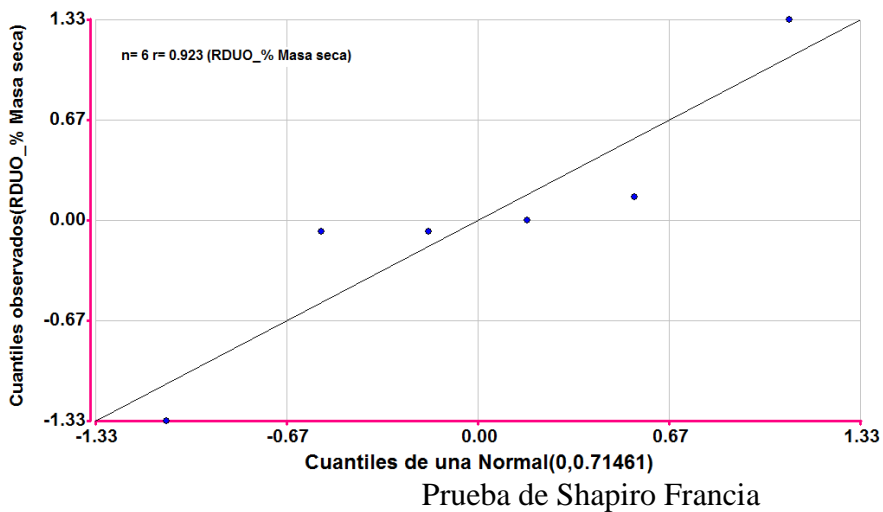
### Prueba de Levene % Masa húmeda

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.00	1	0.00	0.00	>0.9999
Tratamientos	0.00	1	0.00	0.00	>0.9999
Error	3.60	4	0.90		
Total	3.60	5			



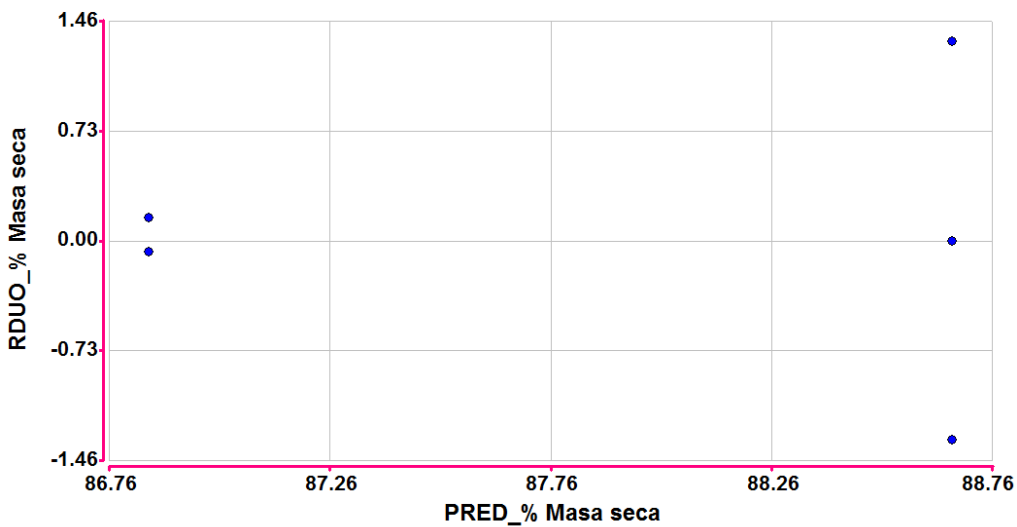
Prueba de independencia de los residuos.

### Normalidad de los residuos ANAVA 4



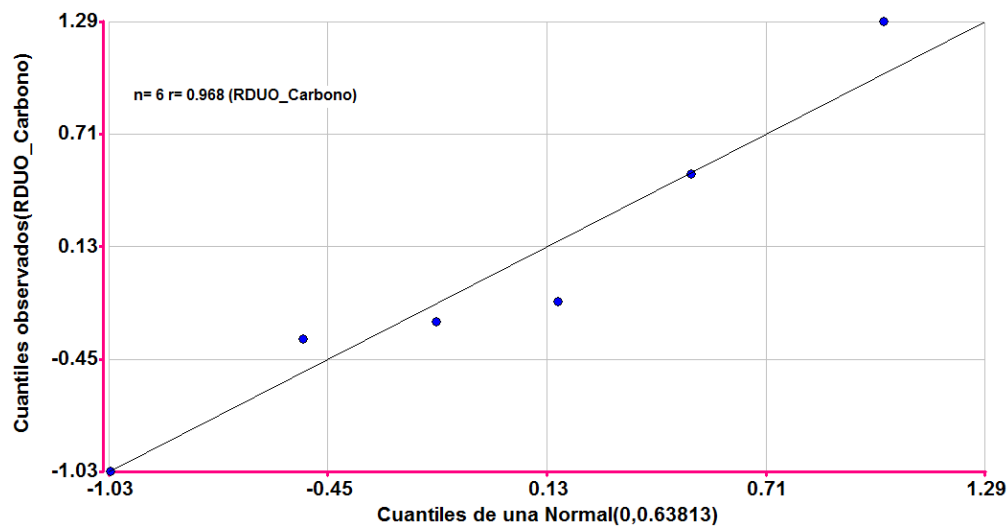
### Prueba de Levene % Masa seca

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.00	1	0.00	0.00	>0.9999
Tratamientos	0.00	1	0.00	0.00	>0.9999
Error	3.57	4	0.89		
Total	3.57	5			



### Prueba de independencia de los residuos

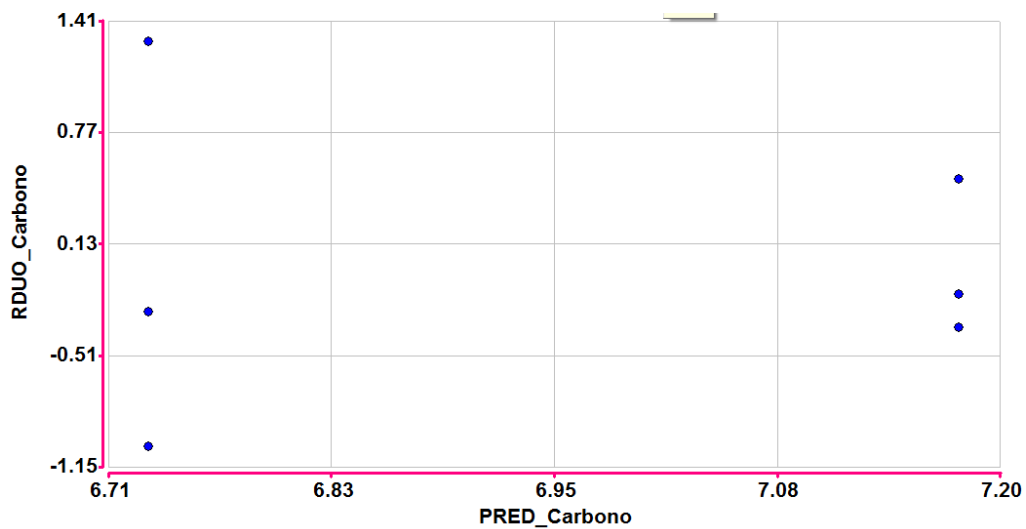
## Normalidad de los residuos ANAVA 5



Prueba de Shapiro Francia

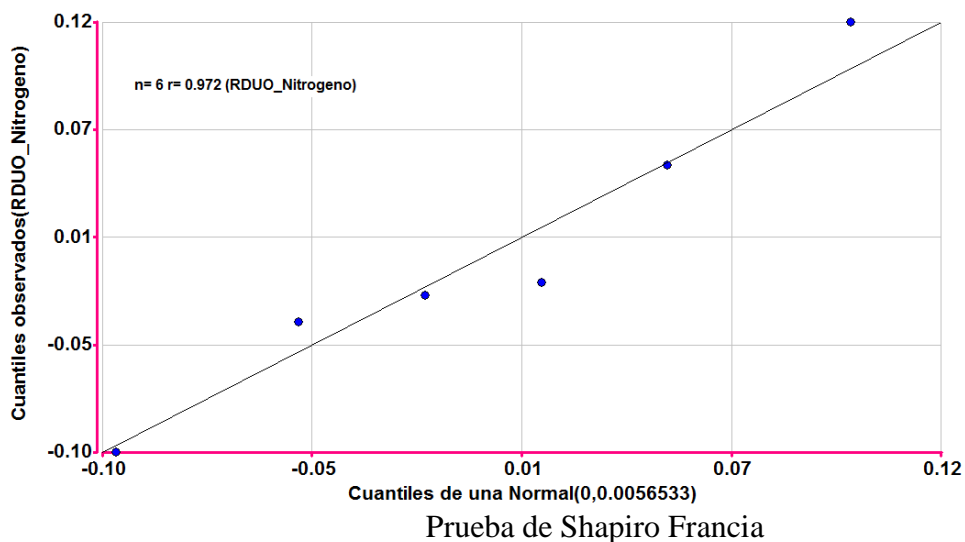
## Prueba de Levene % Carbono

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.00	1	0.00	0.00	>0.9999
Tratamientos	0.00	1	0.00	0.00	>0.9999
Error	3.19	4	0.80		
Total	3.19	5			



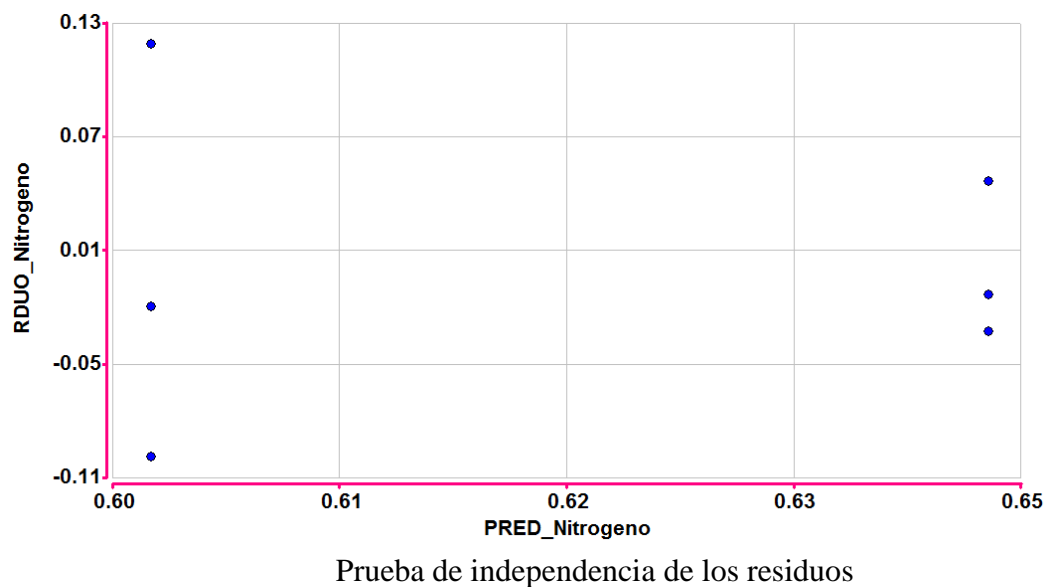
Prueba de independencia de los residuos

### Normalidad de los residuos ANAVA 6



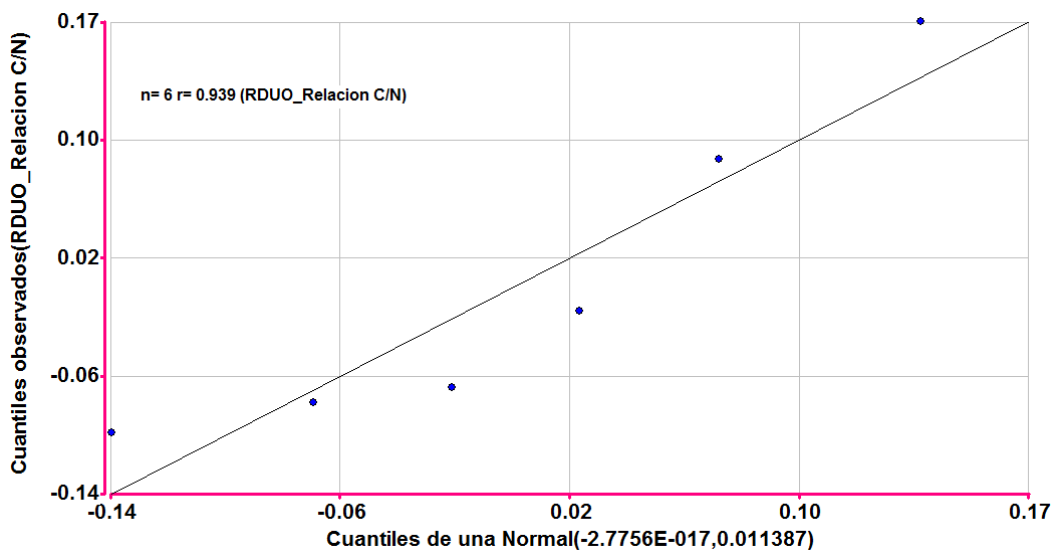
### Prueba de Levene % Nitrógeno

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.00	1	0.00	0.00	>0.9999
Tratamientos	0.00	1	0.00	0.00	>0.9999
Error	0.03	4	0.01		
Total	0.03	5			





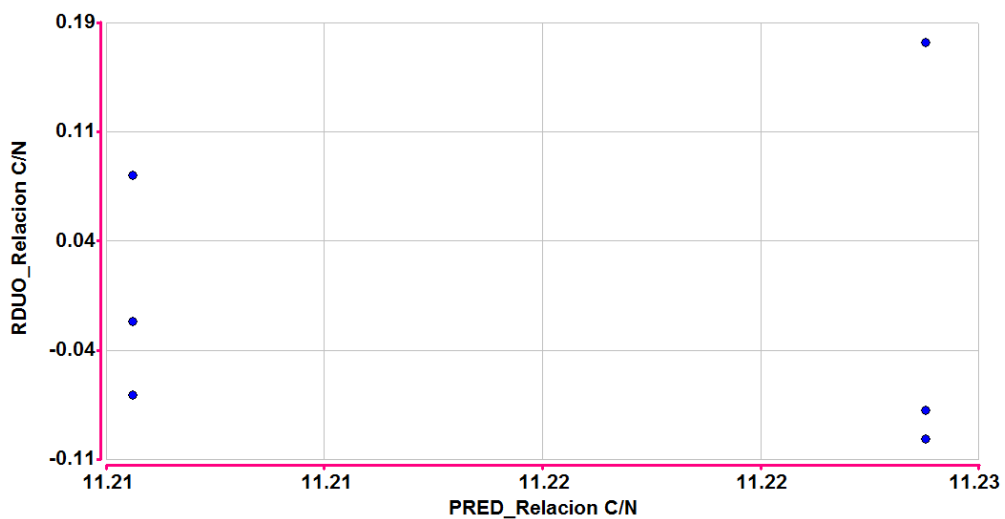
## Normalidad de los residuos ANAVA 7



Prueba de Shapiro Francia

## Prueba de Levene Relación C/N

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.00	1	0.00	0.00	>0.9999
Tratamientos	0.00	1	0.00	0.00	>0.9999
Error	0.06	4	0.01		
Total	0.06	5			



Prueba de independencia de los residuos