

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**OPERACIÓN Y REDISEÑO DE UN BIODIGESTOR TUBULAR
EXPERIMENTAL**

Por:

ELIZABETH INES MIRANDA CONDORI

**Proyecto de Grado presentado a consideración de la “UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el grado
académico de Licenciatura en Ingeniería Química.**

Noviembre de 2016

TARIJA-BOLIVIA

El tribunal calificador del presente trabajo, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo éstas responsabilidad del autor.

Este proyecto de grado está dedicado a Dios, a mi esposo Pablo Arduz, a mi hijo Miguel Eduardo y a mis padres Valentin y Herminia.

Agradezco a Dios por permitirme concluir el presente trabajo, a mis padres, hermanas, mi esposo y a mi hijo por su apoyo incondicional, y la RASP Tarija, que por medio de su presidente Jorge Tejerina, apoyaron y financiaron la realización de este proyecto.

ÍNDICE

ADVERTENCIA.	i
DEDICATORIA.	i
AGRADECIMIENTO.	iii
RESUMEN	iv
INTRODUCCIÓN	1
1. ANTECEDENTES.	1
2. OBJETIVOS DEL PROYECTO.	3
2.1. OBJETIVO GENERAL.	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	3
3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.	3
3.1. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA.	3
3.2. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA.	4
3.3. JUSTIFICACIÓN SOCIAL.	4
3.4. JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL.	5
CAPÍTULO I	6
I. MARCO TEÓRICO.	6
I.1. GENERALIDADES DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.	6
I.2. CARACTERÍSTICAS DE LA MATERIA PRIMA.	8
I.3. EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.	11
I.4. MICROORGANISMOS EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.	13
I.4.1. FASE NO METANOGÉNICA - MICROORGANISMOS QUE NO PRODUCEN METANO.	14

I.4.2. FASE METANOGENICA - MICROORGANISMOS QUE PRODUCEN METANO.	18
I.5. ETAPAS DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.	18
I.6. FACTORES QUE INFLUYEN Y CONDICIONES DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.	21
I.6.1. MATERIA ORGÁNICA O SUSTRATO DE ALIMENTACIÓN PARA EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.	21
I.6.2. RELACIÓN CARBONO-NITRÓGENO (C/N).	22
I.6.3. CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES EN LA ALIMENTACIÓN.	23
I.6.4. LA TEMPERATURA.	24
I.6.5. VALOR DEL pH.	25
I.6.6. PROMOTORES E INHIBIDORES DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.	26
I.6.7. LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO.	26
I.6.8. LA CANTIDAD DE COLIFORMES FECALES.	27
I.7. CLASIFICACIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.	27
I.7.1. POR LA FORMA DE LA ALIMENTACIÓN.	28
I.7.2. POR LA TEMPERATURA.	28
I.7.3. POR EL NÚMERO DE ETAPAS.	28
I.8. PRODUCTOS DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.	28
I.8.1. BIOGÁS.	28
I.8.2. BIOL.	30
I.8.3. BIOSOL.	31

I.9. CINÉTICA DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.	31
I.9.1. CINÉTICA DE LAS REACCIONES.	31
I.9.2. CINÉTICA PARA LA DESCOMPOSICIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN EL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL.	33
I.10. BIODIGESTORES.	35
I.10.1. TIPOS DE BIODIGESTORES.	36
I.10.1.1. BIODIGESTOR DE MEZCLA COMPLETA.	36
I.10.1.2. REACTORES DE FILTRO ANAERÓBICO, LECHOS EXPANDIDOS Y FLUIDIZADOS Y LAS UNIDADES U.A.S.B. (UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET).	36
I.10.2. COMPONENTES DE UN BIODIGESTOR.	37
I.10.3. CLASIFICACIÓN DE LOS BIODIGESTORES.	39
I.10.3.1. DE ACUERDO AL ALMACENAMIENTO DE GAS.	39
I.10.3.2. DE ACUERDO A LA FORMA GEOMÉTRICA.	41
I.10.3.3. DE ACUERDO A LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.	43
I.10.3.4. SEGÚN SU POSICIÓN RESPECTO A LA SUPERFICIE TERRESTRE.	43
I.10.4. MODELOS DE BIODIGESTORES.	43
I.10.4.1. MODELO CHINO O DE CÚPULA FIJA.	44
I.10.4.2. MODELO INDIO O DE CÚPULA FLOTANTE.	44
I.10.4.3. MODELOS HORIZONTALES.	45
I.10.4.4. MODELOS BATCH POR LOTES.	46
I.10.4.5. BIODIGESTOR DE POLIETILENO TUBULAR.	46
I.10.4.6. BIODIGESTOR DE LAGUNA CUBIERTA.	47

I.11. VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES DE COLIFORMES FECALES Y DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO DE ACUERDO A LA LEY DEL MEDIO AMBIENTE N°1333.	48
CAPÍTULO II	49
II. PARTE EXPERIMENTAL.	49
II.1. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA.	49
II.1.1. FACTORES CONSIDERADOS EN EL DISEÑO Y OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR DE POLIETILENO TUBULAR EXPERIMENTAL.	50
II.1.2. DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS PARA LA INSTALACIÓN DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL.	53
II.1.2.1. PRUEBAS PRELIMINARES EN LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL.	60
II.1.3. CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL DE POLIETILENO TUBULAR.	61
II.2. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE MATERIAS PRIMAS.	63
II.2.1. DESCRIPCIÓN DE LA MATERIA PRIMA PARA EL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL: ESTIÉRCOL VACUNO.	63
II.2.2 DESCRIPCIÓN DE ANÁLISIS DE MATERIA PRIMA: ESTIÉRCOL VACUNO Y ESTIÉRCOL PREPARADO.	65
II.2.2.1. PARÁMETROS DETERMINADOS PERSONALMENTE.	66
II.2.2.1.1. MASA.	66
II.2.2.1.2. VOLUMEN.	66
II.2.2.1.3. TEMPERATURA.	66
II.2.2.1.4. POTENCIAL DE HIDRÓGENO, pH.	66
II.2.2.1.5. DENSIDAD.	66

II.2.2.1.6. HUMEDAD.	67
II.2.2.2. PARÁMETROS DETERMINADOS POR EL CEANID.	67
II.2.2.2.1. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO.	67
II.2.2.2.2. COLIFORMES FECALES.	68
II.2.2.2.3. SÓLIDOS TOTALES.	68
II.2.2.2.4. SÓLIDOS VOLÁTILES.	68
II.2.2.2.5. NITRÓGENO TOTAL.	69
II.2.2.2.6. FÓSFORO TOTAL.	69
II.2.2.2.7. POTASIO TOTAL.	69
II.2.2.2.8. pH.	69
II.3. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.	70
II.4. DISEÑO EXPERIMENTAL.	71
II.5. PROCEDIMIENTOS Y TÉCNICAS EMPLEADOS PARA LA OBTENCIÓN DE RESULTADOS.	75
II.5.1. PUESTA EN MARCHA DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL.	75
II.5.2. OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL.	76
II.5.2.1. MATERIAL Y EQUIPO UTILIZADO EN LA OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL.	76
II.5.2.2. CÁLCULO Y PREPARACIÓN DE LA PRIMERA CARGA: ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO.	78
II.5.2.3. OPERACIÓN DIARIA DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL.	79
II.5.3. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL: TEMPERATURA AMBIENTE Y TEMPERATURA EN LA ENTRADA Y SALIDA DEL BIODIGESTOR.	81

II.5.3.1. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA AMBIENTE.	81
II.5.3.2. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA ENTRADA Y SALIDA DEL BIODIGESTOR.	81
II.5.4. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA: ESTIÉRCOL VACUNO Y ESTIÉRCOL PREPARADO.	82
II.5.4.1. MUESTREO DE ESTIÉRCOL VACUNO.	82
II.5.4.2. MEDICIÓN DE PARÁMETROS DEL ESTIÉRCOL VACUNO.	83
II.5.4.2.1. MEDICIÓN DE LA DENSIDAD DEL ESTIÉRCOL VACUNO.	83
II.5.4.2.2. MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DEL ESTIÉRCOL VACUNO.	84
II.5.4.3. MEDICIÓN DE PARÁMETROS DEL AGUA DE MEZCLA DE ESTIÉRCOL PREPARADO.	84
II.5.4.3.1. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA DEL AGUA.	84
II.5.4.3.2. MEDICIÓN DEL pH DEL AGUA.	84
II.5.4.4. MEDICIÓN DE PARÁMETROS Y ANÁLISIS DEL ESTIÉRCOL PREPARADO.	85
II.5.4.4.1. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA DEL ESTIÉRCOL PREPARADO.	85
II.5.4.4.2. MEDICIÓN DEL pH DEL ESTIÉRCOL PREPARADO.	85
II.5.4.4.3. MEDICIÓN DE LA DENSIDAD DEL ESTIÉRCOL PREPARADO.	85
II.5.4.4.4. TOMA DE MUESTRA DEL ESTIÉRCOL PREPARADO PARA ANÁLISIS EN EL CEANID.	85
II.5.5. CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO: BIOL.	87
II.5.5.1. MEDICIÓN DE PARÁMETROS Y ANÁLISIS DE BIOL.	87

II.5.5.1.1. MEDICIÓN DE VOLUMEN DE BIOL PRODUCIDO.	87
II.5.5.1.2. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA DEL BIOL.	88
II.5.5.1.3. MEDICIÓN DEL pH DEL BIOL.	88
II.5.5.1.4 MEDICIÓN DE LA DENSIDAD DEL BIOL.	89
II.5.5.1.5. TOMA DE MUESTRA DE BIOL PARA ANÁLISIS CEANID.	89
CAPÍTULO III.	91
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	91
III.1. PRESENTACIÓN ORDENADA Y SISTEMÁTICA DE TODOS LOS RESULTADOS OBTENIDOS.	91
III.1.1. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL: TEMPERATURA AMBIENTE Y TEMPERATURA EN LA ENTRADA Y SALIDA DEL BIODIGESTOR.	91
III.1.1.1. TEMPERATURA AMBIENTE.	91
III.1.1.2. TEMPERATURA EN LA ENTRADA DEL BIODIGESTOR.	94
III.1.1.3. TEMPERATURA EN LA SALIDA DEL BIODIGESTOR.	95
III.1.2. PROPIEDADES DE LA MATERIA PRIMA.	99
III.1.2.1. HUMEDAD Y DENSIDAD DEL ESTIÉRCOL VACUNO.	99
III.1.2.2. TEMPERATURA Y pH DEL AGUA.	100
III.1.2.3 TEMPERATURA Y pH DEL ESTIÉRCOL PREPARADO.	102
III.1.2.4. RESULTADO DE ANÁLISIS DE ESTIÉRCOL PREPARADO.	104
III.1.3. PROPIEDADES DEL PRODUCTO BIOL.	104
III.1.3.1. VOLUMEN, TEMPERATURA, pH Y DENSIDAD DEL BIOL.	104
III.1.3.2. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE BIOL.	106
III.2. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	108

III.2.1. DETERMINACIÓN DE CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR DE POLIETILENO TUBULAR.	108
III.2.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.	109
III.2.3. CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO BIOL.	112
III.2.4. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO, COLIFORMES FECALES, SÓLIDOS TOTALES Y SÓLIDOS VOLÁTILES.	115
III.2.5. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DEL CONTENIDO DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO TOTAL.	117
III.2.6. DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE DESCOMPOSICIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN EL BIODIGESTOR.	117
III.2.6.1. DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE LA VARIACIÓN DE COLIFORMES FECALES CF.	117
III.2.6.2. DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE LA VARIACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO DBO5.	128
III.2.7. REDISEÑO DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL.	135
III.2.7.1. CÁLCULO DEL TIEMPO DE RETENCIÓN TOMANDO EN CUENTA LA CINÉTICA EN BASE A COLIFORMES FECALES.	135
III.2.7.2. CÁLCULO DEL TIEMPO DE RETENCIÓN TOMANDO EN CUENTA LA CINÉTICA EN BASE A LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO.	139
III.2.7.3. REDISEÑO DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL.	143
III.3. ESTIMACIÓN DE COSTOS DEL PROYECTO.	146
CAPÍTULO IV.	148
IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	148
IV.1. CONCLUSIONES.	148

IV.2. RECOMENDACIONES.	152
BIBLIOGRAFÍA.	155
ANEXO A.	1
ANEXO B.	16
ANEXO C.	17
ANEXO D.	18
ANEXO E.	19
ANEXO F.	20
ANEXO G.	23
ANEXO H.	29
ANEXO I.	32

ÍNDICE DE TABLAS Y CUADROS.

Tabla I 1 Análisis de Diversos Sustratos	9
Tabla I 2 Características de los Estiércoles	10
Tabla I 3 Características de otros sustratos de origen animal, utilizados para carga en biodigestores.	11
Tabla I 4 Residuos vegetales y posible producción de biogás.	11
Tabla I 5 Bacterias comúnmente encontradas en la fase no metanogénica.	16
Tabla I 6 Clasificación de las Metano bacterias.	18
Tabla I 7 Relación C/N de sustratos que se utilizan para el proceso.	22
Tabla I 8 Análisis ST y SV de Diversos Sustratos.	23
Tabla I 9 Contenido de sólidos totales de diferentes sustratos utilizados en zonas rurales.	24
Tabla I 10 Rendimiento de gas a distintas temperaturas.	24
Tabla I 11 Concentración inhibidora de inhibidores comunes.	26
Tabla I 12 Propiedades del Biogás.	29
Tabla I 13 Cualidades principales del Biogás.	29
Tabla I 14 Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpo de agua Clase B.	48
Tabla II 1 Coordenadas GPS del establo.	64
Tabla II 2 Matriz del diseño experimental.	73
Tabla II 3 Registro de toma de muestra de estiércol preparado para análisis de estiércol preparado.	86
Tabla II 4 Registro toma de muestra para análisis de biol.	90
Tabla III 1 Temperatura ambiente.	91
Tabla III 2 Temperatura en la entrada del biodigestor.	94

Tabla III 3 Temperatura en la salida del biodigestor.	96
Tabla III 4 Diferencia entre las temperaturas en la entrada y salida del biodigestor.	97
Tabla III 5 Humedad y densidad del estiércol vacuno.	99
Tabla III 6 Temperatura y pH del agua.	100
Tabla III 7 Temperatura, pH y densidad del estiércol preparado.	102
Tabla III 8 Resultados de análisis del estiércol preparado.	104
Tabla III 9 Resultados de análisis de N, P y K total del estiércol preparado.	104
Tabla III 10 Volumen, temperatura, pH y densidad del biol.	104
Tabla III 11 Resultados de análisis de biol: Coliformes fecales.	106
Tabla III 12 Resultados de análisis de biol: DBO5.	107
Tabla III 13 Resultados de análisis de biol: pH.	107
Tabla III 14 Resultados de análisis de biol: ST, SV, N, P y K.	107
Tabla III 15 Condiciones de operación del biodigestor de polietileno tubular.	108
Tabla III 16 Propiedades del estiércol vacuno.	110
Tabla III 17 Propiedades del agua.	110
Tabla III 18 Propiedades del estiércol preparado.	111
Tabla III 19 Propiedades del estiércol preparado: N, P y K.	111
Tabla III 20 Propiedades del biol.	113
Tabla III 21 Propiedades del biol: CF, ST, SV, N, P Y K.	113
Tabla III 22 Coliformes fecales, demanda bioquímica de oxígeno, sólidos totales y sólidos volátiles del estiércol preparado y del biol.	115
Tabla III 23 Eficiencia de remoción de Coliformes fecales, Demanda bioquímica de oxígeno, Sólidos totales y Sólidos volátiles.	116
Tabla III 24 Eficiencia de remoción de Nitrógeno, Fósforo y Potasio Total.	117

Tabla III 25 Datos obtenidos del ajuste gráfico de la curva Coliformes fecales vs tiempo de retención – Primera etapa.	122
Tabla III 26 Pendiente media en cada punto mediante el método de los tres puntos – Primera etapa.	122
Tabla III 27 Logaritmo natural de CF y la pendiente media – Primera etapa.	123
Tabla III 28 Datos obtenidos del ajuste gráfico de la curva Coliformes fecales vs tiempo de retención – Segunda Etapa.	126
Tabla III 29 Pendiente media en cada punto mediante el método de los tres puntos - Segunda etapa.	126
Tabla III 30 Logaritmo natural de CF y la pendiente media - Segunda etapa.	127
Tabla III 31 Datos obtenidos del ajuste gráfico de la curva Demanda bioquímica de oxígeno vs tiempo de retención.	132
Tabla III 32 Pendiente media en cada punto mediante el método de los tres puntos - DBO ₅ .	132
Tabla III 33 Logaritmo natural de DBO ₅ y la pendiente media.	133
Tabla III 34 Costos del Biodigestor de Polietileno Tubular Experimental.	146
Tabla III 35 Financiamiento recibido por parte de la RASP Tarija.	146
Tabla III 36 Costo Total del Proyecto de Investigación.	147
Tabla IV 1: Propiedades del estiércol vacuno, el estiércol preparado y el agua utilizada.	148
Tabla IV 2: Propiedades del Biol.	150
Cuadro I 1 Avances en el Proceso de Biodigestión Anaerobia.	7
Cuadro II 1 Resumen de la planificación del experimento.	72
Cuadro II 2 Parámetros de control del biodigestor experimental.	73

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura I 1 Degradación anaerobia de la materia orgánica.	14
Figura I 2 Efecto de la temperatura y tiempo de retención sobre la producción de gas.	25
Figura I 3 Esquema del biodigestor experimental.	33
Figura I 4 Esquema operativo del sistema Biodigestor - Gasómetro.	38
Figura I 5 Biodigestor de cúpula fija.	39
Figura I 6 Biodigestor de cúpula móvil.	40
Figura I 7 Biodigestor con depósito flotante o de presión constante.	40
Figura I 8 Biodigestor con gasómetro de caucho o material plástico.	40
Figura I 9 Biodigestor de cámara vertical cilíndrica.	41
Figura I 10 Biodigestor de cámara esférica.	41
Figura I 11 Biodigestor de cámara ovalada.	42
Figura I 12 Biodigestor de cámara rectangular.	42
Figura I 13 Biodigestor de cámara cuadrada.	42
Figura I 14 Biodigestor modelo chino: capacidad 150 m ³ .	44
Figura I 15 Biodigestor modelo indio: capacidad 150 m ³ .	45
Figura II 1 Polietileno de 250 micrómetros de espesor.	54
Figura II 2 Cinta adhesiva fuerte.	55
Figura II 3 Goma de neumático.	55
Figura II 4 Tubería de PVC de 1 in.	56
Figura II 5 Tubería de PVC de 1/2 in.	56
Figura II 6 Bridas de 1/2 in y de 3/4 in.	57
Figura II 7 Válvula de bola metálica de 1/2 in.	57

Figura II 8 Accesorios de tubería de 1/2 in.	58
Figura II 9 Cinta teflón.	59
Figura II 10 Láminas de plastoformo.	59
Figura II 11 Conducción de biogás y válvula de seguridad.	62
Figura II 12 Biodigestor de polietileno tubular experimental.	62
Figura II 13 Biodigestor de polietileno tubular experimental con focos y protección.	63
Figura II 14 Establo en El Rancho.	64
Figura II 15 Proceso como una caja negra.	70
Figura II 16 Balanza analítica.	76
Figura II 17 pHmetro.	77
Figura II 18 Balanza de humedad.	77
Figura II 19 Primera carga, sellado de agua de la tubería de entrada.	79
Figura II 20 Mezcla de entrada al biodigestor: Estiércol preparado.	80
Figura II 21 Carga del biodigestor.	80
Figura II 22 Lugar de obtención y muestreo de materia prima.	82
Figura II 23 Muestra de estiércol vacuno.	83
Figura II 24 Muestra de estiércol preparado para análisis en el CEANID.	86
Figura II 25 Primer día de producción de Biol, día 24.	87
Figura II 26 Biol almacenado de más de un día.	88
Figura II 27 Muestra de biol para análisis en el CEANID.	90
Figura III 1 Gráfica de Coliformes fecales CF en función del tiempo de retención t.	118
Figura III 2 Coliformes fecales vs tiempo de retención - Acondicionamiento.	121

Figura III 3 Gráfica de $\ln(-d(CF)/dt)$ vs $\ln(CF)$ – Primera etapa.	123
Figura III 4 Coliformes fecales vs tiempo de retención - Segunda etapa.	125
Figura III 5 Gráfica de $\ln(-d(CF)/dt)$ vs $\ln(CF)$ - Segunda etapa.	127
Figura III 6 Gráfica de Demanda bioquímica de oxígeno DBO5 en función del tiempo de retención t.	129
Figura III 7 Gráfica de $\ln(-d(DBO5)/dt)$ vs $\ln(DBO5)$.	133
Figura III 8 Esquema biodigestor experimental como un reactor de flujo pistón.	135
Figura III 9 Esquema biodigestor experimental como un reactor de flujo pistón.	139

NOMENCLATURA, ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA UTILIZADA.

NOMENCLATURA

$(-r_{\text{DBO}_5})$	Cinética o velocidad de variación de la Demanda bioquímica de oxígeno DBO_5 .
$(-r_{\text{CF}})$	Cinética o velocidad de variación de Coliformes Fecales CF.
(DBO_5)	Concentración de la Demanda Bioquímica de Oxígeno.
(CF)	Concentración de Coliformes Fecales.
L	Longitud del biodigestor.
D	Diámetro del biodigestor.
V	Volumen del biodigestor.
V_L	Volumen de líquido en el biodigestor.
V_G	Volumen de gas en el biodigestor.
A_t	Área transversal de un cilindro.
t	Tiempo de retención.
E	Caudal volumétrico de entrada al biodigestor.
E_a	Caudal volumétrico de agua de alimentación diaria al biodigestor.
E_e	Caudal volumétrico o másico de estiércol de entrada al biodigestor.
m_e	Masa de estiércol vacuno.
V_e	Volumen de estiércol vacuno.
V_a	Volumen de agua.
ρ_e	Densidad del estiércol vacuno.
ρ_{ep}	Densidad del estiércol preparado.

ρ_b	Densidad del biol.
T_{amb}	Temperatura ambiente.
T_{ent}	Temperatura en la entrada del biodigestor.
T_{sal}	Temperatura en la salida del biodigestor.
ΔT	Diferencia entre la temperatura de entrada y salida del biodigestor.
Hm_e	Humedad del estiércol vacuno.
V_b	Volumen del biol.
T_b	Temperatura del biol.
η	Eficiencia de remoción.
η_{CF}	Eficiencia de remoción de CF.
η_{DBO_5}	Eficiencia de remoción de DBO_5 .
DBO_{5ep}	Demanda bioquímica de oxígeno del estiércol preparado.
DBO_{5b}	Demanda bioquímica de oxígeno del biol.
η_{ST}	Eficiencia de remoción de Sólidos totales.
η_{SV}	Eficiencia de remoción de Sólidos volátiles.
ST_{ep}	Sólidos totales del estiércol preparado.
ST_b	Sólidos totales del biol.
SV_{ep}	Sólidos volátiles del estiércol preparado.
SV_b	Sólidos volátiles del biol.
k	Coefficiente cinético.
n	Orden de reacción.
\ln	Logaritmo Natural.
CF_0	Concentración de Coliformes Fecales Inicial.

CF_f	Concentración de Coliformes Fecales Final.
F_{CF0}	Flujo de Coliformes Fecales inicial.
F_{CFf}	Flujo de Coliformes Fecales final.
X_{CF0}	Fracción inicial de Coliformes Fecales convertida en producto.
X_{CFf}	Fracción final de Coliformes Fecales convertida en producto.
S	Caudal Volumétrico de salida del biodigestor.
dV	Diferencial de volumen líquido del biodigestor.
DBO_0	Demanda Bioquímica de Oxígeno Inicial.
DBO_f	Demanda Bioquímica de Oxígeno Final.
F_{DBO0}	Flujo de DBO inicial.
F_{DBOf}	Flujo de DBO final.
X_{DBO0}	Fracción inicial de DBO consumida.
X_{DBOf}	Fracción final de DBO consumida.
V_{BDG}	Volumen del Biodigestor.
H_m	Humedad.
$\%L$	Porcentaje de humedad.

ABREVIATURAS.

DBO_5	Demanda bioquímica de oxígeno.
CF	Coliformes fecales.
CEANID	Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo.
UAJMS	Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.
LOU	Laboratorio de Operaciones Unitarias.
ST	Sólidos Totales.

SV	Sólidos Volátiles.
NMP	Número Más Probable.
GLP	Gas Licuado de Petróleo.

SÍMBOLOS.

ρ	Densidad
π	Pi (Coeficiente entre la longitud de la circunferencia y su diámetro)
CH ₄	Metano
O ₂	Oxígeno
H ₂ O	Agua
N	Nitrógeno
P	Fósforo
K	Potasio
pH	Potencial de Hidrógeno
°C	Grado Centígrado

TÉRMINOS TÉCNICOS.

Biodigestor o Digestor: Recipiente o cámara cerrada herméticamente donde ocurre la degradación de la materia orgánica por medio de microorganismos en ausencia de oxígeno, proceso denominado digestión anaerobia.

Biosol: Fracción sólida del producto de un biodigestor.

Biogás: Producto gaseoso de un biodigestor, es una mezcla de gases donde predomina el metano (60 % de CH₄, 40 % de CO₂ y trazas de otros gases).

Biol: Efluente líquido de un biodigestor.

Coliformes fecales: Grupo de microorganismos que forman parte de los coliformes totales; está formado por bacterias Gram-negativas. Este grupo no incluye una especie determinada sin embargo la más prominente es *Escherichia coli*.

Demanda bioquímica de oxígeno: Cantidad de oxígeno que los microorganismos, especialmente bacteria aerobias o anaerobias facultativas consumen durante la degradación de materia orgánica contenida en la muestra líquida.

Biodigestión: Proceso biológico de degradación de materia orgánica donde participan bacterias.

Anaerobio: Se aplica al organismo que vive y se desarrolla en ausencia de oxígeno. Proceso desarrollado en ausencia de oxígeno libre.

Biomasa: Material orgánico que puede descomponerse procedente de un proceso biológico que puede aprovecharse como fuente de energía.

Metabolismo: Conjunto de reacciones que se producen continuamente en las células vivas, mediante las cuales esta obtiene y transforma materia y energía.

Metanogénesis: Forma de metabolismo microbiano donde los microorganismos forman metano. Etapa de la digestión anaerobia donde ocurre la formación de metano.

Hidrólisis: Descomposición de una sustancia por su reacción con el agua.

Acidogénesis: Etapa de la digestión anaerobia donde los compuestos solubles son fermentados a ácidos grasos volátiles (acético, propiónico, butírico), alcoholes hidrógeno y CO₂. Esta etapa se conoce también como fermentativa. Es un periodo de producción intensiva de ácidos.

Acetogénesis: Etapa de la digestión anaerobia donde las bacterias producen acetato: oxidan el ácido propiónico y el butírico hasta ácido acético e hidrógeno.

Efluente: Producto líquido o descarga de una planta, equipo de tratamiento o sistema de alcantarillado hacia la red pública o cuerpo receptor.

Reactor: Recipiente o cámara donde se verifica una reacción química.

Biorreactor: Recipiente o sistema que mantiene un ambiente biológicamente activo. Recipiente donde se verifican un proceso químico en el que participan microorganismos.

Mohos: Hongos que se encuentran tanto al aire libre como en lugares húmedos y con baja luminosidad. Existen muchas especies de mohos que son especies microscópicas pluricelulares o unicelulares.

Mesófila: Se aplica a organismos cuya temperatura de crecimiento óptima está entre los 15 y los 35 °C.

Termófila: se aplica a organismos vivos que pueden soportar condiciones extremas de temperatura relativamente altas, por encima de los 45°C.