

UNIVERSIDAD FASTA

Facultad de Ingeniería

Proyecto Final de
Graduación en Ingeniería Ambiental

“Tratamiento Biológico Combinado

Anaeróbico/Aeróbico

de Estiércol Generado

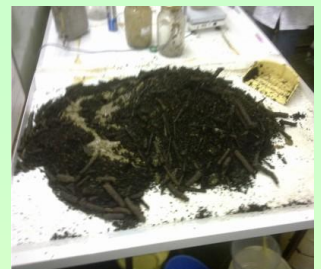
en la Cría Intensiva de Cerdo”

Alumna: Dinamarca Angela Irene

Director: Ing. Máximo Menna

Co-Directora: Ing. Bárbara Corleto

Diciembre 2010



AGRADECIMIENTOS

A mi familia

Mis Padres, Ángel y Mirta, mi Hermano Juan, mi Tía Marta, mi Abuela Natividad, mis Padrinos Ana y César, mi novio Alfredo y sus Padres, Osvaldo y Renata.

A mis Amigos

*Belén, Cynthia, Silvana y Carmen
Inés, Victoria, Juliana, Mariangeles, Teresa, Martín, Fernando y Cristian.*

A mi Director

Máximo Menna

A mi Co-Directora

Bárbara Corleto

A mis Compañeros de la Facultad

Ariel, Rogelio, Wanda y Diego

A todos mis Profesores de la Facultad

A los integrantes del Grupo GEEAA

Guillermo Murcia, Eduardo Garín y Julio Branda

Al Laboratorio Fares-Tai

A Agro-Porc, SuperToledo

A mis Evaluadores y Jurados

INDICE

CAPITULO I	9
INTRODUCCION	9
1. Producción porcina en América y el mundo	9
1.1. Sector porcino en Argentina	10
1.1.1. Sistemas de producción intensiva	13
1.1.1.1. Sistemas bajo confinamiento total	13
1.1.1.2. Sistemas al aire libre	14
1.1.1.3. Sistemas Mixtos	14
2. Planteo del problema	15
3. Justificación	21
4. Objetivos	22
4.1. Objetivo general	22
4.2. Objetivos específicos	22
5. Antecedentes	23
5.1. Experiencias de Tratamiento Biológico Aeróbico	24
5.1.1. Antecedentes Locales	24
5.1.2. Antecedentes Nacionales	26
5.1.3. Antecedentes Internacionales	27
5.2. Experiencias de Tratamiento Biológico Anaeróbico	28
5.2.1. Antecedentes Locales	28
5.2.2. Antecedentes Nacionales	29
5.2.3. Antecedentes Internacionales	31
6. Marco legal	37
6.1. Normativa Nacional	38
6.2. Normativa de la Provincia de Buenos Aires (PBA)	40
6.3. Normativa Específica	41

CAPITULO II	44
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	44
7. Tratamiento biológico anaeróbico	45
7.1. Descripción del Proceso Anaeróbico.....	45
7.1.1. Etapas del Proceso biológico anaeróbico	46
7.1.1.1. Etapa de hidrólisis y fermentación	46
7.1.1.2. Etapa de acetogénesis.....	46
7.1.1.3. Etapa de metanogénesis	47
7.2. Tipos de materias primas	49
7.3. Parámetros de control del tratamiento biológico anaeróbico	51
7.3.1. Parámetros relacionados con la materia prima a tratar.....	52
7.3.1.1. Relación Carbono/Nitrógeno y contenido de otros nutrientes	52
7.3.1.2. Tamaño de las partículas.....	54
7.3.1.3. Concentración de sólidos.....	54
7.3.2. Parámetros relacionados con las condiciones ambientales del proceso.....	56
7.3.2.1. Potencial Redox	56
7.3.2.2. Temperatura.....	56
7.3.2.3. pH y alcalinidad.....	60
7.3.2.4. Presencia de inhibidores.....	61
7.3.3. Parámetros relacionados con la operación del proceso.....	67
7.3.3.1. Agitación.....	67
7.3.3.2. Utilización de inóculos.....	68
7.3.3.3. Velocidad de carga volumétrica y Tiempo de retención hidráulica	70
7.4. Productos finales del tratamiento biológico anaeróbico.....	73
7.4.1. Biogás	73
7.4.2. Efluente.....	75
8. Tecnología de tratamiento biológico anaeróbico.....	76
8.1. Biodigestores	76
8.1.1. Componentes principales	76
8.1.1.1. Cámara de carga.....	76
8.1.1.2. Conducto de carga.....	76

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
***“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”***



8.1.1.3.	Cámara de digestión	77
8.1.1.4.	Conducto de descarga	77
8.1.1.5.	Cámara de descarga.....	78
8.1.1.6.	Gasómetro.....	78
8.1.1.7.	Agitador	78
8.1.2.	Accesorios.....	79
8.1.2.1.	Válvula de salida de biogás	79
8.1.2.2.	Trampa de agua	80
8.1.2.3.	Filtro de Acido Sulhídrico (SH ₂)	81
8.1.2.4.	Manómetro	83
8.1.3.	Clasificación de los biodigestores.....	84
8.1.3.1.	Tipo de alimentación	85
8.1.3.2.	Forma geométrica de la cámara de digestión.....	87
8.1.3.3.	Intensidad de la mezcla	87
8.1.3.4.	Manejo del sustrato	89
8.1.3.5.	Número de Fases.....	94
8.1.3.6.	Tipo de Gasómetro.....	96
8.1.3.7.	Posición respecto de la superficie del terreno	98
8.1.4.	Modelos más difundidos	99
8.1.4.1.	Biodigestor Tipo Hindú	99
8.1.4.2.	Biodigestor Tipo Chino	101
8.1.4.3.	Biodigestor de Desplazamiento Horizontal	102
9.	Ventajas del tratamiento biológico anaeróbico	107
10.	Tratamiento biológico aeróbico	108
10.1.	Descripción del Proceso Aeróbico	108
10.1.1.	Etapas del proceso biológico aeróbico	109
10.1.1.1.	Etapas de latencia.....	109
10.1.1.2.	Etapas mesotérmica (10-40°C).....	109
10.1.1.3.	Etapas termogénica (40-75° C)	110
10.1.1.4.	Etapas de maduración	110
10.2.	Parámetros de control del tratamiento biológico aeróbico	111
10.2.1.	Parámetros relacionados con la materia prima a tratar.....	112
10.2.1.1.	Relación Carbono/Nitrógeno y contenido de otros nutrientes	112
10.2.1.2.	Tamaño de las partículas	113

10.2.2.	Parámetros relacionados con las condiciones ambientales ...	114
10.2.2.1.	Temperatura.....	114
10.2.2.2.	Humedad.....	114
10.2.2.3.	Aireación	116
10.2.2.4.	pH.....	117
10.2.3.	Parámetros relacionados con las condiciones de operación..	119
10.2.3.1.	Utilización de inóculos.....	119
11.	Tecnología de tratamiento biológico aeróbico.....	120
11.1.	Acondicionamiento inicial.....	120
11.2.	Técnica de compostaje	120
11.2.1.	Pilas o Hileras dinámicas	120
11.2.2.	Pilas o Hileras estáticas	122
11.2.3.	Reactores Aeróbicos	123
11.3.	Acondicionamiento final	123
11.3.1.	Maduración del Compost.....	123
11.3.2.	Calidad física, química y biológica del compost.....	124
11.3.2.1.	Materia extraña	125
11.3.2.2.	Metales pesados	125
11.3.2.3.	Microorganismos patógenos	125
11.4.	Acopio y empaque final.....	126
12.	Aspectos ambientales del tratamiento aeróbico.....	127
12.1.1.	Generación de lixiviado	127
12.1.2.	Emanación de gases y olores desagradables	127
13.	Ventajas del tratamiento biológico aeróbico.....	128
14.	Nota al final del capítulo II.....	129
CAPITULO III.....		131
MATERIALES Y METODOS.....		131
15.	Diseño Experimental.....	131
15.1.	Ámbito de trabajo e infraestructura disponible	133
15.2.	Actividades previas a la Experiencia de Laboratorio	138
15.3.	Desarrollo de la experiencia.....	140

15.3.1.	Determinación de la densidad de la materia prima	140
15.3.2.	Carga de Biodigestores	141
15.3.3.	Descarga de Biodigestores.....	143
15.3.4.	Armado de Pila aeróbica	143
15.4.	Seguimiento de los Procesos.....	145
15.4.1.	Controles diarios in situ	145
15.4.1.1.	Tratamiento anaeróbico	145
15.4.1.2.	Tratamiento combinado anaeróbico/aeróbico.....	146
15.4.2.	Controles Analíticos.....	147
15.4.2.1.	Tratamiento anaeróbico	147
15.4.2.2.	Tratamiento anaeróbico/aeróbico combinado:.....	147
15.4.2.3.	Especificaciones técnicas de las determinaciones analíticas.....	148
16.	Nota al final del capítulo III.....	149
 CAPITULO IV.....		151
 RESULTADOS Y DISCUSIONES		151
17.	Tratamiento biológico anaeróbico	151
17.1.	Controles diarios	151
17.1.1.	Volumen de biogás generado.....	151
17.1.2.	Volumen de dióxido de carbono obtenido.....	154
17.2.	Controles analíticos	156
17.2.1.	Resultados iniciales y finales.....	156
18.	Tratamiento combinado anaeróbico/aeróbico	158
18.1.	Controles diarios.....	158
18.1.1.	Temperatura.....	158
18.1.2.	pH	159
18.1.3.	Aireación	160
18.1.4.	Humedad.....	160
18.1.5.	Controles analíticos	160

CAPITULO V	164
CONCLUSIONES	164
CONTENIDO DE TABLAS	166
CONTENIDO DE FIGURAS	167
CONTENIDO DE IMAGENES	168
CONTENIDO DE GRAFICOS	169
ABREVIATURAS Y SIGLAS	170
CONTENIDO ALFABETICO.....	173
BIBLIOGRAFIA	176

RESUMEN

En la actualidad, la problemática asociada a la gestión de los residuos orgánicos del sector ganadero porcino se debe a los sistemas de intensificación productiva. Estos sistemas permiten una mayor eficiencia e incrementos en la producción pero, no obstante, también generan un alto impacto negativo sobre el ambiente. Por esta razón, resulta necesaria la aplicación de una gestión integral para este tipo de residuos, tomando como objetivo fundamental la valorización de los mismos.

En este Trabajo, se evaluó la factibilidad del tratamiento biológico combinado anaeróbico/aeróbico del estiércol porcino, con el objeto de determinar los beneficios ambientales que genera la combinación de estas tecnologías, generando energía en forma de biogás, y compost, un material útil que puede ser utilizado como enmienda orgánica mejoradora de suelos para cultivo no-alimenticio.

Con el objeto de determinar la importancia del grado de dilución de materia prima en la etapa de arranque del proceso anaeróbico, se analizó el desarrollo del mismo en dos biodigestores ante diferente grado de dilución. Cumplido este objetivo, se retiraron los lodos residuales del proceso anaeróbico y se los incorporó a una pila semi-compostada de yerba mate, con el objetivo de que los lodos sean expuestos a las temperaturas propias del tratamiento aeróbico y así, higienizar los mismos.

La evolución de ambos procesos biológicos fue evaluada a través de la determinación de parámetros físicos y químicos.

Las metodologías y tecnologías propuestas, propician una mejora en la gestión de residuos generados en los sistemas de intensificación ganadera, resultando esta experiencia de laboratorio, un paso previo a la escala piloto.

Palabras claves: estiércol porcino, ganadería intensiva, tratamiento biológico, biogás, compost.

CAPITULO I

INTRODUCCION

CAPITULO I

INTRODUCCION

1. PRODUCCION PORCINA EN AMERICA Y EL MUNDO

La cría de cerdos actualmente representa unas de las principales actividades ganaderas y fuente de proteína animal a nivel mundial, equivalente al 42% de la producción total de carne en el mundo, según datos estadísticos de la Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación del año 2009. (FAO, por sus siglas en inglés)

El cerdo y la porcicultura están arraigados considerablemente en las culturas de los países del Continente Americano, constituyendo un pilar importante en la seguridad alimentaria, especialmente en el medio rural a través de la producción familiar.

Junto con ello, en los últimos años se ha desarrollado una exitosa y competente industria porcina acompañada con el avance de tecnologías, lo que ha permitido colocar a la región como la tercera productora mundial de carne de cerdo. Según la FAO (FAO, 2008) en el año 2008 el continente americano registró una faena total de porcinos alrededor de 163 millones de cabezas, lo que equivale a una producción de 18 millones de Tn de carne, contra una faena total mundial de 941 millones, encabezada por la región de Asia con 555 millones, y en segunda posición por Europa con 191 millones de cabezas.

Entre los países de América, de acuerdo con los datos de la FAO, los mayores productores son Estados Unidos, Brasil y Canadá. El primer país, en el año 2008 alcanzó la producción de 95 millones de Ton de carne de cerdo, que equivalen aproximadamente a 860 millones de cabezas, cubriendo 58,2% de la faena total americana. Por otro lado, Brasil, en el mismo año, produjo alrededor de 3 millones de Ton de carne porcina, equivalente a un poco más de 27 millones de cabezas y al 16% de la producción. Y Canadá, representa el 15% con 25 millones de cabezas y alrededor de 2,8 millones de Ton de carne. A conti-

nuación en la Tabla 1, se presenta el ranking mundial de la producción porcina del año 2008.

Tabla 1. RANKING DE PRODUCCION PORCINA MUNDIAL DEL AÑO 2008		
Posición	País	Producción (miles de Ton)
1	China	47178
2	Estados Unidos	9518
3	Alemania	4460
4	España	3469
5	Brasil	3015
6	Canadá	2838
7	Vietnam	2470
8	Francia	2230
9	Dinamarca	2053
10	Holanda	2020
11	Rusia	2009
12	Polonia	1923
13	Filipinas	1607
14	Italia	1557
15	Japón	1248
16	México	1150
17	Corea	1056
18	Bélgica	1004
19	Tailandia	816
20	Reino Unido	692

Fuente: FAO, 2008

1.1. Sector porcino en Argentina

La producción porcina en la Argentina mostró un ritmo de crecimiento que, comenzando a fines del siglo pasado (403.203 cabezas en 1888), continuó en los primeros años del actual para mantenerse constante y luego decrecer a partir de la década del 1950. Así en 1971, 1988, 1993 y 1997 se registraban 4.500.000, 3.800.000, 3.350.000 y 2.085.000 cabezas respectivamente.

En los años siguientes el crecimiento de la faena en nuestro país mostro ciertas variaciones. Según Secretaria de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos de la Nación (SAGP-

yA) en base a datos de la ONCCA (Oficina Nacional de Control Comercial Agropecuario) y el SENASA (Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria), en el período 1998-2008 se registra una tasa promedio de crecimiento anual de la faena de 3,7%, con un mínimo en el año 2003, de 1.812.927 cabezas (158.310 Tn de carne equivalente res) y un máximo registrado en el año 2007 de 3.200.115 cabezas (276.116 Tn de carne equiv. res).

Datos más actuales de la SAGPyA, informan que en el año 2009 Argentina registró una faena total de 3.339.609 (289.833 Ton de carne equiv. res), siendo un 5% mayor que en el año anterior, y la máxima producción desde 1998.

A continuación, en las FIGURA 1 y Figura 2 se muestra la evolución anual de la explotación de la ganadería porcina en Argentina en el periodo 1998-2009.

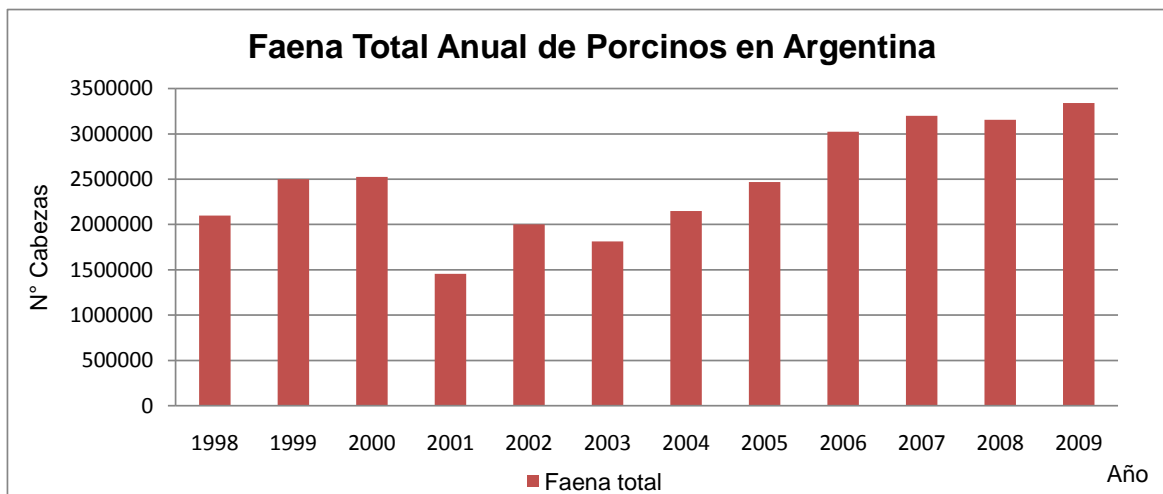


FIGURA 1. Evolución anual de la faena total de porcinos en Argentina en el periodo 1998-2009. Fuente: SAGPyA en base a datos de SENASA y ONCCA.

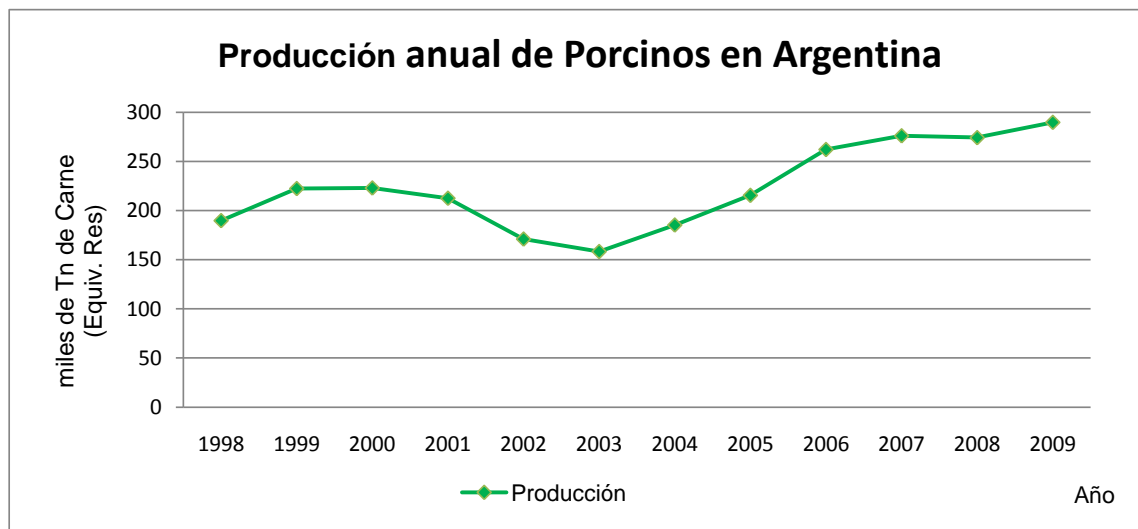


FIGURA 2. Producción porcina anual en miles de toneladas equivalentes res en la Argentina en el periodo 1998-2009. Fuente: SAGPyA en base a datos de SENASA y ONCCA.

Asimismo, las provincias que centralizan la explotación porcina son Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe. En el año 2008, con un 22,7%, 22,1% 15,7% respectivamente del total de los 8169 productores en el país.

Cabe destacar también, que los productores son categorizados por el número de madres en sus planteles, estableciéndose de esta manera sus dimensiones productivas. En Argentina, el 78,71% de los productores poseen entre 1 y 50 madres, con un promedio de 23 unidades.

A continuación, en la Tabla 2 se muestra la cantidad y porcentaje de productores estratificados por número de madres distribuidos en las principales provincias.

Tabla 2. PRODUCTORES ARGENTINOS ESTRATIFICADOS POR NUMERO DE MADRES DISTRIBUIDOS EN LAS PRINCIPALES PROVINCIAS.		TOTAL	1 a 50	51 a 200	201 a 500	501 a 1000	>1000
Provincias	Buenos Aires	1858	1327	444	67	12	8
	Córdoba	1804	1369	380	41	8	6
	Santa Fe	1282	913	314	47	2	6
	Formosa	592	531	59	2	0	0
	Otras	2633	2290	304	28	6	5
N° Total de Productores		8169	6430	1501	185	28	25
% en el total		100	78,71	18,37	2,26	0,34	0,31

Fuente: Relevamiento del Grupo de Intercambio Tecnológico de Explotaciones Porcinas (GITEP), 2008, en base a datos del SENASA.

1.1.1. Sistemas de producción intensiva

La intensificación de la producción animal surge durante la década del cincuenta y en poco tiempo fue adoptada por los productores ganaderos de todo el mundo. Básicamente, implica la concentración de animales por unidad de superficie y el aumento en el uso de insumos. Este sistema productivo contribuye considerablemente al sostenimiento de la actividad, desplazada por el avance de la frontera agrícola, con una mayor eficiencia e incrementos en la producción de carnes.

Los sistemas intensivos aplicados en los establecimientos productores pueden clasificarse en tres tipos: Sistemas confinados, sistemas al aire libre y sistemas mixtos.

1.1.1.1. Sistemas confinados

En este caso, todas las etapas del animal se realizan bajo confinamiento. Generalmente, son establecimientos de gran tamaño que obtienen altas productividades con buenos aumentos diarios de peso y alcanzan máximos niveles de eficiencia. La inversión inicial es alta, resulta necesario el uso de energía para calefaccionar y también ventilar, y los costos de mantenimiento son elevados.



FIGURA 3. Sistemas de producción bajo confinamiento total.

1.1.1.2. Sistemas al aire libre

En este caso, los cerdos están a campo abierto pero la crianza sigue siendo intensiva. Los establecimientos agropecuarios son en general de pequeña y mediana escala. Entre sus ventajas más importantes comparadas con el sistema anterior, cabe mencionar que la inversión inicial en bienes de capital (establecimiento y equipos) es menor, al igual que los costos de mantenimiento y consumos de energía. Con respecto a sus desventajas, estos sistemas obtienen menores productividades y eficiencia reproductiva, con mayor ocupación de superficie del campo.



FIGURA 4. Sistemas de producción al aire libre.

1.1.1.3. Sistemas Mixtos

Actualmente, en nuestro país, los sistemas al aire libre tienden a una combinación con el sistema de confinamiento, siendo entonces relevante agruparlos en esta categoría. La combinación se refiere a que algunas etapas de vida del porcino se desarrollan en confinamiento y otras etapas al aire libre.

En la Argentina, según el relevamiento del GITEP 2006, el 46% de los establecimientos productores de cerdos poseen sistemas mixtos, el 32% corresponde a establecimientos con sistemas confinados y el 22% son al aire libre. (FIGURA 5).

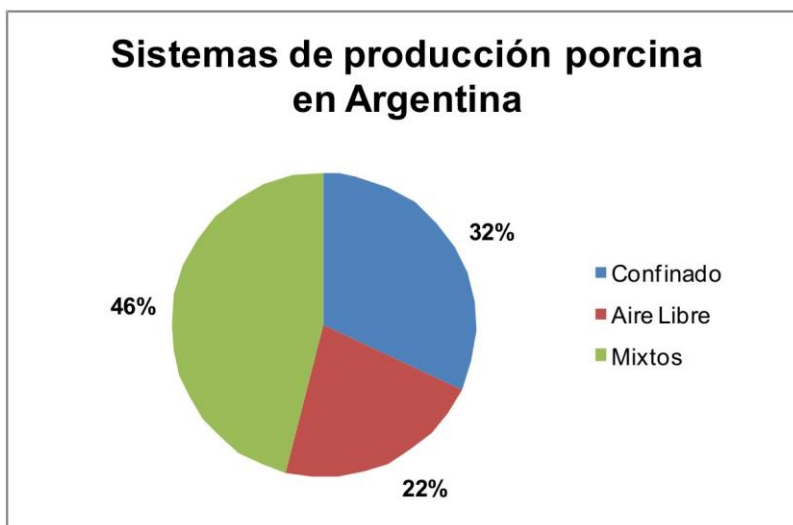


FIGURA 5. Cantidad porcentual de establecimientos según sistemas de producción. Fuente: GITEP, 2006.

2. PLANTEO DEL PROBLEMA

En la actualidad, la intensificación porcina está asociada a importantes impactos ambientales, a nivel local, regional y global, debido principalmente al uso intensivo del recurso suelo y a la eliminación diaria incontrolada de efluentes residuales compuestos por estiércol, orina, alimento desperdiciado, agua de bebida y agua de limpieza, que pueden provocar problemas de contaminación en suelos, aire y agua.

A continuación, en la Tabla 3 se muestra la producción promedio de excretas por etapas productivas del porcino.

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”

Tabla 3. PRODUCCION MEDIA DIARIA DE RESIDUOS DE LAS DIFERENTES ETAPAS DE LA PRODUCCION PORCINA	Estiércol* (kg/animal/día)	Estiércol + Orina (kg/animal/día)	Agua de Limpieza (l/animal/día)
Cerdas en gestación	3,60	11,00	1,83 – 11,83
Cerdas en lactancia	6,40	18,00	
Recría (lechones destetados)	0,35	0,95	
Crecimiento y Terminación	2,30	4,90	
Machos	3,00	6,00	

*Estiércol con 40% de materia seca

Fuente: EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria) y SAGPyA, 2007.

En la Argentina, los procesos de contaminación vinculados con la gestión de los residuos orgánicos del sector porcino, provienen de la acumulación de excretas en los corrales de alimentación y en lagunas abiertas receptoras de efluentes. (Imagen 1). Estas lagunas, es la tecnología más comúnmente aplicada por el sector porcino para tratar sus aguas residuales. Sin embargo, la gran mayoría de ellas no cuenta con diseños que permitan acelerar la estabilización de la materia orgánica y por lo tanto, estos sitios representan una importante fuente de contaminación.

Seguidamente, se describe el escenario actual de los impactos que producen los sistemas de producción porcina intensificados.

Contaminación del suelo

Los principales contaminantes son el nitrógeno (N) y el fósforo (P), que provienen tanto de sistemas al aire libre como confinados, y los metales pesados derivados de porcinos en confinamiento. La acumulación de cualquiera de estos elementos puede afectar la calidad del suelo, e



IMAGEN 1. Gestión del estiércol de cerdo en Argentina. (En fotos de arriba hacia abajo: estiércol de cerdo, limpieza de piso galpón, y laguna de disposición final de efluentes). *Fuente: Alberto Echevarría. “Sistemas de Producción Porcina” Universidad Nacional de Río Cuarto*

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



incidir en la calidad de cuerpos de aguas cercanos y en el aire.

Los contaminantes más relevantes, dentro del grupo de los metales, son el cobre (Cu), el manganeso (Mn) y el zinc (Zn). Sus proporciones dependen de la dieta de los cerdos, eliminándose un 86%, 95% y 79% del Cu, Zn y Mn ingeridos en la dieta (Brumm, 2002)ⁱ. Estos elementos son retenidos por las partículas del suelo, pero al ser arrastrados por escorrentía pueden llegar al agua superficial y por lixiviación a las aguas subterráneas. Sin bien, estos metales se encuentran normalmente en los sistemas biológicos, a partir de ciertas concentraciones pueden producir un efecto tóxico sobre el hombre y otros animales.

Otro impacto posible sobre el suelo es la salinización en los primeros centímetros de la capa superficial a causa del exceso de materia orgánica acumulada.

Contaminación del agua

El N y el P pueden llegar a los cuerpos de agua superficiales (lagos, lagunas o ríos) por escurrimiento desde corrales, por desborde de las lagunas de efluentes a causa de lluvias torrenciales y por deposición atmosférica. Una de las consecuencias, es la eutrofización de los ecosistemas acuáticos, lo que disminuye la concentración de oxígeno en ellos y provoca la mortandad de la fauna acuática presente.

Las aguas subterráneas también pueden ser contaminadas, principalmente por nitratos (NO_3^-). Estos son transportados desde los corrales o desde las lagunas de efluentes mal impermeabilizadas. El P es poco frecuente, ya que los fosfatos se fijan a las partículas coloidales del suelo, aunque altas cargas de este contaminante pueden ocasionar su lixiviado hacia estas aguas. Los acuíferos se vuelven aún más vulnerables cuando hay pozos poco profundos, antiguos y localizados en suelos permeables cercanos a los establecimientos de engorde.

Cabe destacar que las concentraciones elevadas de nitratos en aguas de bebida representan un problema para la salud humana ya que su ingesta reduce la capacidad de transporte del oxígeno por la sangre (metahemoglobinemia o enfermedad de los bebés azules).

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



A continuación, en la Tabla 4 se muestran las cantidades de N y P excretados por día según etapas porcinas.

Tabla 4. CANTIDAD DE N Y P EXCRETADOS POR DÍA EN EL ESTIÉRCOL PORCINO	N (gr/día)	P (gr/día)
Cerda Lactante	133	30
Cerda gestante y no gestante	52	14
Lechón	16	5
Recría	7	3
Terminación	36	12

Fuente: Patricia Millares. SAGPYA, 2007

Otros contaminantes posibles de alterar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas cercanas, son los microorganismos patógenos, hormonas y drogas de uso veterinario. La descarga directa de estos contaminantes a lagunas abiertas genera un alto impacto sobre los ecosistemas y la posibilidad de afectar la salud humana.

Contaminación del aire

Los principales contaminantes del aire provenientes de sistemas ganaderos porcinos intensificados son: gases con efecto invernadero (GEI), amoníaco y ácido sulfhídrico.

Los principales GEI producidos por la ganadería son el metano, el óxido nitroso y el dióxido de carbono. (SAyDS 2007). Tanto el metano como el dióxido de carbono son los principales componentes del biogás, llamado así al conjunto de gases que se obtienen de la descomposición anaeróbica de los residuos orgánicos. El metano, en el sector porcino, se genera de la descomposición anaeróbica del estiércol y, en menor medida, de la fermentación entérica (1 kg/cabeza/año), que surge de la degradación de los carbohidratos del alimento. (Vermorel, 1995)ⁱⁱ. El dióxido de carbono, también se genera en la descomposición anaeróbica del estiércol pero en menor proporción que el metano. El óxido nitroso se forma, como parte del ciclo del nitrógeno, a través de la desnitrificación del nitrógeno orgánico, presente en el estiércol y en la orina. En la tropósfera se considera un gas inerte, mientras que en la estratósfera es oxidado a óxido nítrico, el cual reacciona con el ozono estratosférico, contribuyendo a su destrucción.

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



Seguidamente, en la Tabla 5 se exponen los potenciales de calentamiento de los principales GEI emitidos del sector ganadero.

Tabla 5. POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL DE LOS PRINCIPALES GEI	Potencial de Calentamiento*
Dióxido de Carbono (CO ₂)	1
Metano (CH ₄)	21
Oxido Nitroso (N ₂ O)	310

*Para un horizonte de 100 años

Fuente: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), 1996

En la Argentina, de acuerdo al inventario de GEI para el año 2000 elaborado en el marco de la Segunda Comunicación Nacional a la UNFCCC, el sector ganadero contribuye con 30,5% de las emisiones totales del país.

Según Berra y Finster (INTA, 2002), el sector porcino, a pesar de su escaso número relativo, es el principal responsable de emisiones de metano por inadecuada gestión de sus residuos, debido a que es la especie ganadera que se mantiene con mayor grado de confinamiento en el país y que maneja sus efluentes en forma líquida.

Por su parte, el amoníaco se produce principalmente por la volatilización del N de la urea contenida en la orina y, en menor medida, a partir del N del estiércol. Se percibe a través de un olor desagradable, y a partir de 20 ppm ya produce irritación de las mucosas. Además, en la troposfera, el amoníaco se oxida formando óxidos de nitrógeno, los cuales son precursores de la lluvia ácida, que afecta a los ecosistemas por acidificación de suelos y aguas naturales.

El ácido sulfhídrico, es otro componente del biogás, que aunque se encuentra en bajos porcentajes es altamente perceptible por su olor desagradable (olor a “huevo podrido”). Es tóxico para los seres vivos a bajas concentraciones, produciendo efectos a partir de 8 ppm. En la atmósfera, se oxida generando óxidos de azufre, los cuales por medio de reacciones químicas, producen lluvia ácida.

Los factores que influyen en el proceso de contaminación por amoníaco y ácido sulfhídrico, son el tamaño de la superficie de emisión (áreas donde se concentra el estiércol), la

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



temperatura ambiental, la aireación (dependiente del manejo del estiércol), las características de aguas y suelos afectados (capacidad amortiguadora de pH).

Además de estos impactos, la acumulación de estiércol en corrales y la presencia de efluentes en lagunas, predisponen a la atracción y proliferación de vectores sanitarios (bacterias, insectos y roedores) que pueden afectar el bienestar y a la salud de los animales y humanos del lugar.

En Tabla 6 se exponen los principales impactos ambientales originados de la actividad ganadera porcina con ausencia de una adecuada gestión de sus residuos orgánicos.

Tabla 6. IMPACTOS AMBIENTALES ASOCIADOS AL SECTOR PRODUCTIVO PORCINO	Recurso natural afectado	Impacto	Escala de impacto
Nitratos	Agua y Suelo	Disminución de la calidad del agua y del suelo Eutrofización Toxicidad directa en el hombre	Local Regional Nacional/internacional
Fosfatos	Agua y Suelo	Disminución de la calidad del agua y del suelo Eutrofización Toxicidad indirecta en el hombre (algas)	Local Regional Nacional/internacional
Metales (Zn, Cu y Mn)	Suelo y Aguas	Disminución de la calidad del agua y del suelo Toxicidad directa en seres vivos	Local Regional Nacional/internacional
Metano	Aire	Calentamiento Global	Global
Oxido Nitroso	Aire	Calentamiento Global Destrucción de ozono estratosférico	Global
Amoniaco	Aire, Suelo y Agua	Malos olores Eutrofización Acidificación de suelos y aguas naturales por formación de óxidos de nitrógeno Toxicidad directa en seres vivos	Local Regional Nacional/internacional
Acido sulfhídrico	Aire, Suelo y Agua	Malos olores Acidificación de suelos y aguas naturales, por formación de óxidos de azufre Toxicidad directa en seres vivos	Local Regional Nacional/internacional

Fuente: Adaptación propia de “Producción animal intensiva y medio ambiente” Herrero y Gil , 2008

3. JUSTIFICACIÓN

La selección del tema de este Proyecto Final de graduación en Ingeniería Ambiental, se basó en que resulta necesario la aplicación de una gestión integral de los residuos orgánicos generados en los establecimientos ganaderos, tomando como objetivo fundamental la valorización de los mismos, entendiendo por ello a todos aquellos procesos de reutilización y tratamiento en su forma química, física, biológica, mecánica y energética.

Una de estas alternativas consiste en la recuperación y aprovechamiento del gas metano, componente combustible del biogás, el cual puede obtenerse a través de la degradación biológica anaeróbica de los estiércoles de diverso animales. La otra alternativa es la degradación biológica aeróbica, aprovechando el carácter exotérmico de este proceso que alcanza temperaturas adecuadas para el control de patógenos, y que en su etapa final brinda un producto útil y valioso como enmienda orgánica.

Debido a la potencialidad del metano como GEI (21 veces mayor que el dióxido de carbono), la recuperación y aprovechamiento de este gas es una actividad prioritaria de los mecanismos de desarrollo limpio (MDL), enunciados por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), con el propósito de fomentar la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero.

En este Trabajo Final, se aplica el tratamiento biológico combinado anaeróbico/aeróbico al estiércol porcino, con el objeto de determinar los beneficios ambientales que se obtienen de la combinación de estas tecnologías MDL para mejorar en la gestión de los residuos generados en los procesos de intensificación ganadera, generando como productos finales energía en forma de biogás, que a grandes escalas puede ser utilizado para cubrir diversas necesidades energéticas y, seguidamente, compost con los lodos residuales del proceso anaeróbico, que puede ser utilizado como enmienda orgánica mejoradora de suelos degradados.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Determinar la factibilidad del tratamiento biológico anaeróbico/aeróbico combinado de estiércol de ganado porcino generado en la cría intensiva.

4.2. Objetivos específicos

De los Tratamientos biológicos:

- Monitorear los parámetros de control durante el desarrollo de los procesos biológicos.
- Completar el tratamiento de los lodos residuales del tratamiento anaeróbico incorporándolos al tratamiento aeróbico.
- Determinación del porcentaje de remoción de materia orgánica al final de la combinación de procesos biológicos.
- Determinar la calidad del producto final del proceso combinado.

Del Tratamiento anaeróbico:

- Aplicar distintos grados de dilución de materia prima.
- Determinar el grado de dilución de materia prima más eficiente.

5. ANTECEDENTES

El tratamiento biológico anaeróbico con fines energéticos, es decir para generar biogás, es conocido y aplicado en todos los continentes desde hace varios siglos en la cría intensiva de ganado, pero principalmente se han realizado aplicaciones a gran escala en aquellos países que a diferencia del nuestro no disponen de grandes extensiones de territorio, por lo que se han visto obligados a la cría y engorde intensiva a corral, hoy conocido como feedlots.

Las experiencias más divulgadas de generación de biogás con fines energéticos en la agroindustria se han realizado en Europa, donde existen antecedentes de importancia por la escala y la continuidad de la actividad, como en Italia, Inglaterra, Holanda, Alemania, Dinamarca y Bélgica, incluidas un gran número de experiencias aplicadas específicamente al estiércol de cerdo como materia prima. Además, el avance de esta tecnología se ve acompañada significativamente por numerosos y variados trabajos de investigación a escalas laboratorios del proceso biológico anaeróbico con distintas materias primas provenientes del sector agroindustrial, a fin de obtener mejores rendimientos en la generación de biogás, y posibilitar así, la rentabilidad de estas instalaciones.

Así como existen experiencias con fines energéticos y científicos en el ámbito internacional, las hay en todas las escalas (laboratorio, piloto e industrial) en el ámbito nacional, dentro del sector agroproductivo y de servicio.

En el ámbito local se ha aplicado el tratamiento biológico en distintos tipos de residuos orgánicos, tanto en la investigación universitaria como en los servicios urbanos. En particular el proceso biológico aeróbico se ha aplicado al tratamiento de residuos orgánicos de la agroindustria, y que en el último medio siglo se ha aplicado de forma generalizada al tratamiento de la fracción orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos. Así mismo, un Proyecto Final de la carrera de Ingeniería Ambiental, que aunque no utilizó el estiércol porcino como materia prima, han sido inspirador del presente Proyecto Final.

En base a estas experiencias locales, es que orienté mi tema de Proyecto Final, y es dónde busqué los profesionales formados en la temática, para que me orienten en definir y acotar el tema, y a desarrollar este Trabajo de Proyecto Final en un período aceptable. Actualmente este Trabajo Final se desarrolla en el marco de la Línea de Investigación del

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



Grupo de Estudio de Energías Alternativas y Ambiente (GEEAA) la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP), lo que implica la potencial transferencia al medio productivo.

A continuación se presentan experiencias de tratamiento biológico aeróbico y anaeróbico que se consideran importantes tener en cuenta como antecedentes que comparten aspectos científicos y tecnológicos con este Proyecto Final. Se incluyen experiencias regionales, nacionales e internacionales, realizadas con otro tipo de materia prima y en distinta escala, y se exponen datos específicos de cada experiencia y una breve descripción acerca de los objetivos, metodología y resultados de las mismas.

5.1. Experiencias de Tratamiento Biológico Aeróbico

5.1.1. Antecedentes Locales

NOMBRE: “Tratamiento Biológico Aeróbico de los residuos generados en el procesamiento industrial de la papa”

FUENTE: Facultad de Ingeniería. Universidad de Fraternidad de Agrupaciones Santo Tomás de Aquino (FI-FASTA). Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

AUTOR: Bárbara Corleto

DIRECCIÓN: Máximo Menna

DESCRIPCIÓN:

- *Ámbito De Trabajo:* GEEAA-UNMDP, Pcia. Buenos Aires.
- *Materia Prima y Soporte:* Papa entera y papa tipo bastón – chipeado de poda.
- *Área/Lugar fuente materia prima:* Planta industrial de la empresa McCain S.A. Ruta Provincial N° 226 a la altura del Km 61.5, Balcarce, Pcia. de Buenos Aires.
- *Tipo de Recolección/Transporte:* Particular.
- *Época del año:* Invierno
- *Objetivos:* Evaluar la factibilidad del tratamiento biológico aeróbico aplicado a los residuos generados en el procesamiento industrial de la papa.
- *Escala y Metodología:* Experiencia a escala laboratorio. Pilas con volteos manuales en ambiente interno, independiente del clima exterior.

Resultados: El tratamiento biológico aeróbico resultó adecuado para el tratamiento de los residuos de papa, alcanzando la categoría de enmienda orgánica según Ley Nacional 20466/73 de Fertilizantes y Enmiendas Orgánicas.

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



NOMBRE: “Tecnología regional simple para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica municipal”

FUENTE: GEEAA-FI-UNMDP.

AUTOR: Máximo Menna, Gloria Plaza, Julio Branda y Guillermo Murcia.

DESCRIPCIÓN:

- *Ámbito De Trabajo:* GEEAA-UNMDP.
- *Materia Prima Tratada y Soporte:* FOM (Fracción Orgánica Municipal) - bolsas red.
- *Área/Lugar fuente materia prima:* Muestreo de viviendas de la ciudad de Mar del Plata, Partido Gral. Pueyrredón, Pcia de Buenos Aires.
- *Tipo de Recolección/Transporte:* Diferenciada Particular.
- *Época del año:* Verano
- *Objetivos:* Evaluar la factibilidad del tratamiento biológico aeróbico aplicado a la FOM de la ciudad de Mar del Plata. Evaluar la tecnología propuesta y comparar con el método de pila convencional.
- *Escala y Metodología:* Escala laboratorio. Bolsas de red como soporte del sustrato de aproximadamente 16 L de capacidad colgadas en un ambiente amplio, reparado de vientos y de sol directo, con intercambio de aire con la atmósfera.
- *Resultados:* El tratamiento biológico aeróbico resultó adecuado para el tratamiento de la FOM de la ciudad de Mar del Plata. No se alcanzó la higienización completa del sustrato según EPA, 1992, no obstante, los porcentajes de remoción de materia orgánica indican que la tecnología evaluada resulta aceptable.

NOMBRE: “Experiencia piloto de compostaje de barros primarios cloacales de Mar del Plata”

FUENTE: Obras Sanitarias Sociedad de Estado (OSSE) de Mar del Plata

AUTORES: Elisabet Peralta, Roberto González, Gabriela Von Haeften, Ana Paula Comino, Gustavo Gayoso, Sergio Vergara, Carlos Genga, y Marcelo Scagliola.

DESCRIPCIÓN:

- *Ámbito De Trabajo:* Vivero “Van Heden”. Ruta Nacional N°88 a la altura del Km 22, Mar del Plata, Pcia. Buenos Aires.
- *Materia Prima Tratada y Soporte:* barros primarios cloacales - chipeado de poda.
- *Área/Lugar fuente materia prima:* Planta de Pre-Tratamiento “Ing. Baltar” Km 507 de la ruta N° 11, Mar del Plata Pcia. de Buenos Aires.
- *Tipo de Recolección/Transporte:* Contenedores Particulares.
- *Época del año:* Verano e invierno

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



- *Objetivos:* Evaluar la factibilidad de compostaje aplicado a barros primarios. Caracterizar la calidad química y microbiológica del producto final.
- *Escala y Metodología:* Escala piloto. Hileras con volteos mecánicos.
- *Resultados:* El tratamiento biológico aeróbico resultó adecuado para el tratamiento de los barros primarios cloacales de Mar del Plata, Pcia. Buenos Aires. El producto final obtenido cumple con la categoría tipo A1 de la Resolución Nacional 97/01 para barros y la Clase A de la EPA 1993, sin restricción de uso; y alcanza la categoría de enmienda orgánica según Ley Nacional 20466/73 de Fertilizantes y Enmiendas Orgánicas.

5.1.2. Antecedentes Nacionales

NOMBRE: “Experiencia en elaboración de Compost en el Relleno Sanitario Norte III”

AUTOR: Guillermo D. Vica

FUENTE: Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad de Estado (CEAMSE)

DESCRIPCIÓN:

- *Ámbito De Trabajo:* Relleno Sanitario Norte III. Camino del Buen Ayre a la altura del Km 6.8, San Martín, Pcia. Buenos Aires.
- *Materia Prima Tratada y Soporte:* residuos provenientes del mercado fruti-hortícola – chipeado de residuos de poda.
- *Área/Lugar fuente materia prima:* Ciudad Autónoma De Buenos Aires y el Gran Buenos Aires.
- *Tipo de Recolección/Transporte:* Diferenciada.
- *Época del año:* todo el año
- *Objetivos:* Disminuir el volumen de residuos a disponer. Aumentar la vida útil del relleno sanitario.
- *Escala y Metodología:* Experiencia a escala real. Hileras estáticas aireadas embolsadas.
- *Resultados:* Se logra una reducción del peso de la pila de, aproximadamente, un 70 % y su volumen disminuye un 60%.

NOMBRE: “Planta de compostaje de biosólidos: investigación y desarrollo en Bariloche, Argentina”

FUENTE: Grupo de Suelos del Centro Regional Universitario Bariloche (CRUB) – Universidad Nacional del Comahue.

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



AUTORES: Francisca Laos, María Julia Mazzarino, Patricia Satti, Lucia Roselli, Susana Moyano, Marcelo Ruival y Leonardo Moller Poulsen.

DESCRIPCIÓN:

- *Ámbito De Trabajo:* Predio de un productor local. Ruta Nacional N°258 a la altura del Km 8, Bariloche, Pcia. de Rio Negro.
- *Materia Prima Tratada y Soporte:* lodos secundarios cloacales – aserrín y viruta de madera o chipeado de poda.
- *Área/Lugar fuente materia prima:* Planta de Tratamiento de Efluentes de Líquidos Cloacales, Bariloche, Pcia. de Rio Negro.
- *Tipo de Recolección/Transporte:* Volquetes herméticos particulares.
- *Época del año:* todo el año.
- *Objetivos:* Evaluar la factibilidad de compostaje aplicado a lodos secundarios cloacales. Determinar las condiciones adecuadas para el compostaje: tipo de soporte, proporciones lodos/soporte y cambios estacionales. Caracterizar la calidad química y microbiológica del producto final.
- *Escala y Metodología:* Experiencia a escala real. Hileras con volteos mecánicos con exposición al viento y sin sombreado.
- *Resultados:* El tratamiento biológico aeróbico resultó adecuado para el tratamiento de toda la producción de barros secundarios cloacales de Bariloche, Pcia. Rio Negro. El producto final obtenido cumple con la categoría Clase A de la EPA 1993, sin restricción de uso. Además, ha sido aprobado provisoriamente por el SENASA (VITAPLANTA, Registro N° 13.283) y, actualmente, se distribuye o vende entre productores regionales.

5.1.3. Antecedentes Internacionales

NOMBRE: “Experiencias sobre compostaje de lodos de digestión aeróbica y anaeróbica”

FUENTE: División Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

AUTORES: Gabriela Castillo, María Pía Mena y Carola Alcota.

DESCRIPCIÓN:

- *Ámbito De Trabajo:* División Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Universidad de Chile, Ciudad de Santiago, Chile.
- *Materia Prima Tratada y Soporte:* lodos secundarios cloacales – pasto, viruta de madera y chipeado de poda.
- *Área/Lugar fuente materia prima:* Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Ciudad de Santiago, Chile.

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



- *Tipo de Recolección/Transporte:* No se publica.
- *Época del año:* Verano e Invierno.
- *Objetivos:* Evaluar la eficiencia del proceso de compostaje con respecto a la higienización aplicado a lodos secundarios cloacales, según criterios de CONAMA-Chile, 2001¹. Determinar las condiciones adecuadas para el compostaje: tipo de soporte, proporciones lodos/soporte y cambios estacionales.
- *Escala y Metodología:* Experiencia a escala piloto. Pilas con volteos manuales.
- *Resultados:* El compost obtenido de los lodos secundarios cloacales de la ciudad de Santiago de Chile, clasifica dentro de la Clase B bajo las condiciones de operación de este trabajo experimental.

5.2. Experiencias de Tratamiento Biológico Anaeróbico

5.2.1. Antecedentes Locales

NOMBRE: “Seguimiento del proceso de generación de biogás en digestores de laboratorio mediante la cuantificación de gases y determinación de parámetros simples de laboratorio”

AUTORES: Máximo Menna, Julio Branda, Guillermo Murcia, Eduardo Garín, Gustavo Belliski y Eleonora Moschione.

FUENTE: GEEA-FI-UNMDP.

DESCRIPCIÓN:

- *Ámbito De Trabajo:* Grupo de Estudio De Energías Alternativas y Ambiente (GEE-AA) - Universidad Nacional de Mar del Plata, Pcia. Buenos Aires.
- *Materia Prima Tratada:* Estiércol de vaca
- *Área/Lugar fuente materia prima:* Pdo. de Gral. Pueyrredón, Pcia. de Buenos Aires.
- *Tipo de Recolección/Transporte:* Particular
- *Objetivos:* Evaluar el funcionamiento del biodigestor utilizado. Evaluar la metodología de seguimiento del proceso, en cuanto permite conocer indirectamente las condiciones internas del biodigestor y posibilita la toma de decisiones acerca de su manejo.
- *Escala y Metodología:* Experiencia a escala laboratorio. Biodigestor Discontinuo acoplado a un dispositivo de medición de volumen de gases y este último conec-

¹ Anteproyecto de Reglamento para la “Disposición y reuso de lodos no peligrosos” desarrollado por la Comisión Nacional de Medio Ambiente de Chile.

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



tado a un recipiente de 13,5 L de capacidad, especialmente acondicionado para la acumulación del biogás obtenido.

- *Resultados:* El equipo utilizado resultó adecuado para la realización de experiencias a pequeña escala con sustratos metanogénicos, y la metodología de seguimiento seleccionada resultó apropiada para la observación de las condiciones de avance y de finalización del ciclo metanogénico.

NOMBRE: “Tratamiento biológico anaeróbico de estiércol de pequeños rumiantes en la Granja Productiva/Educativa La Piedra”

AUTORES: Oscar Noguera, Máximo Menna, Gustavo Bacino y Susana Jacob.

FUENTE: GEEAA-FI-UNMDP.

DESCRIPCIÓN:

- *Ámbito De Trabajo:* Granja Productiva/Educativa “La Piedra”, Ruta Provincial N° 88 a la altura del Km 12, Estación Chapadmalal, Partido Gral. Pueyrredón, Pcia. Buenos Aires.
- *Materia Prima Tratada:* Estiércol de oveja y cabra.
- *Área/Lugar fuente materia prima:* Tambo de ovejas y cabras, Granja Productiva/Educativa “La Piedra”, Ruta Provincial N° 88 a la altura del Km 12, Estación Chapadmalal, Partido Gral. Pueyrredón, Pcia. Buenos Aires.
- *Tipo de Recolección/Transporte:* Manual, mediante carretilla desde los establos hasta la cámara de carga del biodigestor.
- *Objetivos:* Evaluar la factibilidad del tratamiento biológico anaeróbico aplicado al estiércol de pequeños rumiantes generados en el establecimiento agropecuario “La Piedra”. Evaluar el funcionamiento del biodigestor diseñado. Promover el uso de fuentes de energía no convencionales en la región. Aprovechar el biogás generado para calefaccionar instalaciones de la granja.
- *Escala y Metodología:* Experiencia a escala piloto. Biodigestor Continuo tipo Hindú, calefaccionado a una temperatura aproximada de 33 °C, con campana gasométrica flotante y sistema de remoción por medio de cadenas colgantes.
- *Resultados:* No se publicaron.

5.2.2. Antecedentes Nacionales

NOMBRE: “Biodigestión de Estiércoles y Purines de Cerdos”

AUTORES: Jorge A. Hilbert y Steffen Gruber.

FUENTE: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)

DESCRIPCIÓN:

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



- *Ámbito De Trabajo:* Cabañas Argentinas del Sol, Planta Marcos Paz, Pcia. Buenos Aires.
- *Materia Prima Tratada:* Estiércol y purín de cerdo.
- *Área/Lugar fuente materia prima:* Establos de Cerdos, Empresa Agropecuaria Cabañas Argentinas del Sol, Dr. Gómez 890, Marcos Paz, Pcia. Buenos Aires.
- *Tipo de Recolección/Transporte:* Sistema de caños de carga superficiales y subterráneos. Los primeros son zanjas que colectan el estiércol del área de granja y los subterráneos son cañerías que conducen el estiércol hacia el biodigestor.
- *Objetivos:* Lograr un manejo sustentable y sostenible del estiércol de cerdo generado en el establecimiento Cabañas Argentinas del Sol, Marcos Paz. Minimizar los impactos ambientales negativos producidos por la cría intensiva de cerdos. Generar energía a partir del biogás recuperado.
- *Escala y Metodología:* Experiencia a escala real. Biodigestor Continuo Tipo Balón construido a partir de geomembrana con agitación hidráulica.
- *Resultados:* El tratamiento biológico aplicado al estiércol de cerdo resultó adecuado para la gestión ambiental de estos residuos dentro del establecimiento. A partir del biogás recuperado, la empresa obtiene un importante beneficio económico. Con la energía obtenida, se abastece una planta de desactivación de soja que involucra un proceso térmico, el sistema de calefacción de los establos y se genera electricidad a través de un motor F100 convertido a gas, produciendo 60 KVA.

NOMBRE: “Puesta en marcha del biodigestor anaeróbico para el tratamiento de residuos orgánicos”

AUTORES: Eduardo Gropelli, Orlando Giampaoli, Edgardo Maroni, Alejandro Lespinard y Julio Muesati.

FUENTE: Revista AIDIS Argentina Ingeniería Sanitaria y Ambiental N° 73

DESCRIPCIÓN:

- *Ámbito De Trabajo:* Escuela Agrotécnica Particular Incorporada N° 2050 “Monseñor Zazpe” en la comuna de Emilia, Pcia. de Santa Fe.
- *Materia Prima Tratada:* Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Domiciliarios (FO-RSD).
- *Área/Lugar fuente materia prima:* Comuna de Emilia, Pcia. de Santa Fe.
- *Tipo de Recolección/Transporte:* Diferenciada.
- *Época del año:* Primavera.
- *Objetivos:* Evaluar la factibilidad del tratamiento biológico anaeróbico aplicado a la FO-RSD generada por pequeñas comunidades. Evaluar las cualidades del efluente líquido descargado del biodigestor como mejorador de suelos.

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
**“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”**



- *Escala y Metodología:* Experiencia a escala real. Biodigestor Continuo Tipo Flujo Pistón Alargado.
- *Resultados:* El tratamiento biológico anaeróbico resultó adecuado para el tratamiento de la FO-RSD de la comuna de Emilia, Pcia. de Santa Fe. La producción de biogás que se obtuvo fue de aproximadamente 25 m³/día, lo que permite sustituir 12 kg/día de gas envasado en la misma escuela. Se comprobó que el efluente líquido puro genera un mayor rendimiento en el crecimiento de la biomasa.

NOMBRE: “Diseño de un biodigestor para obtener gas metano y fertilizantes a partir de la fermentación de excrementos de vacas lecheras en la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de la Pampa”.

AUTORES: Celina Filippín, Jorge Alberto Follari y Jorge Vigil

FUENTE: Facultad de Agronomía - Universidad Nacional de la Pampa.

DESCRIPCIÓN:

- *Ámbito De Trabajo:* Campo de Facultad de Agronomía de la de la Universidad Nacional de La Pampa, Ruta Provincial N° 35 a la altura del Km 334, Santa Rosa, La Pampa.
- *Materia Prima Tratada:* Estiércol de vaca.
- *Área/Lugar fuente materia prima:* Tambo de vacas, Campo de Facultad de Agronomía de la de la Universidad Nacional de La Pampa, Ruta Nacional N° 35 a la altura del Km 334, Santa Rosa, La Pampa.
- *Tipo de Recolección/Transporte:* Rampa que conduce el estiércol desde los establos hacia la cámara de mezcla del biodigestor por gravedad.
- *Objetivos:* Promover el uso del estiércol como fuente de energía no convencional en los establecimientos agropecuarios para la mejora de la gestión ambiental de estos residuos. Evaluar el funcionamiento del biodigestor diseñado. Aprovechar el biogás generado para calefaccionar instalaciones del campo.
- *Escala y Metodología:* Experiencia a escala real. Biodigestor Continuo Tipo Hindú, calefaccionado a una temperatura aproximada de 35 °C, con campana gasométrica flotante y sistema de remoción por medio de cadenas colgantes.
- *Resultados:* No se publicaron.

5.2.3. Antecedentes Internacionales

NOMBRE: “Co-digestión anaeróbica de residuos animales (estiércol de aves de corral y el estiércol de cerdo) con residuos vegetales”

AUTORES: Beatriz Molinuevo, María Cruz García, María Cristina León, Milagros Acitores.

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



FUENTE: Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACyL)

DESCRIPCIÓN:

- *Ámbito De Trabajo:* Dirección General del ITACyL, Finca Zamadueñas, Valladolid, Castilla y León, España.
- *Materia Prima Tratada:* Estiércol de cerdo y de gallina.
- *Área/Lugar fuente materia prima:* Granjas de Ávila, Palencia y Segovia, España.
- *Tipo de Recolección/Transporte:* Particular
- *Época del año:* Primavera.
- *Objetivos:* Evaluar el tratamiento anaeróbico conjunto del estiércol de cerdo con residuos hortícolas en diferentes proporciones. Evaluar el tratamiento anaeróbico conjunto del estiércol de gallina con residuos hortícolas en diferentes proporciones. Comparar ambas experiencias. Determinar la proporción de mayor rendimiento de producción de biogás para cada materia prima.
- *Escala y Metodología:* Experiencia a escala laboratorio. Biodigestores Discontinuos de mezcla completa. Temperatura del proceso de 35 ± 2 ° C durante 68 días.
- *Resultados:* El tratamiento anaeróbico conjunto del estiércol con residuos hortícolas resultó ser más productivo que el tratamiento anaeróbico del estiércol sólo. Lo mismo para el tratamiento anaeróbico del estiércol de gallina con residuos hortícolas. Para ambos ensayos, la proporción de mayor rendimiento fue la 3:1, siendo la de cerdo más productiva que la de gallina.

NOMBRE: “Digestión anaerobia de purines de cerdo y co-digestión con residuos de la industria alimentaria”

AUTORES: Xavier Flotats, Elena Campos, Jordi Palatsi y August Bonmatí

FUENTE: Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. Universidad de Lleida. España.

DESCRIPCIÓN:

- *Ámbito De Trabajo:* Laboratorio de Ingeniería Ambiental. Universidad de Lleida. España.
- *Materia Prima Tratada:* Estiércol de cerdo, pulpa de pera y tierras decolorantes de aceite de oliva.
- *Área/Lugar fuente materia prima:* Mas el Cros, Santa Pau-Olot, granja ubicada en el Parque Natural de la zona volcánica de la Garrotxa, Pcia. de Girona, España.
- *Tipo de Recolección/Transporte:* Particular
- *Objetivos:* Evaluar el tratamiento anaeróbico conjunto del estiércol de cerdo con pulpa de pera en diferentes proporciones. Evaluar el tratamiento anaeróbico conjunto del estiércol de cerdo con tierras decolorantes de aceite de oliva en diferen-

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



tes proporciones. Evaluar el tratamiento anaeróbico del estiércol de cerdo sólo en diferentes diluciones. Comprobar si la co-digestión permite mejorar la producción de biogás del estiércol y posibilita una vía de estabilización y producción energética de los residuos de la industria alimenticia.

- *Escala y Metodología:* Experiencia a escala laboratorio. Biodigestores Discontinuo en paralelo. Temperatura del proceso de 35° C durante 75 días.
- *Resultados:* El tratamiento anaeróbico conjunto del estiércol con los residuos industriales resultó ser más productivo que el tratamiento anaeróbico de cada residuo por separado. Se comprobó que no es posible la digestión anaerobia estable de los dos sustratos de origen industrial solos, y que el estiércol de cerdo aporta la alcalinidad y los nutrientes necesarios.

NOMBRE: “Ensayos en discontinuo de co-digestión anaerobia termofílica de purines de cerdo y lodos residuales. Efecto del amonio”

AUTORES: Xavier Flotats, August Bonmatí, Elena Campos y Montserrat Antunez.

FUENTE: Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. Universidad de Lleida. España.

DESCRIPCIÓN:

- *Ámbito De Trabajo:* Laboratorio de Ingeniería Ambiental. Universidad de Lleida. España.
- *Materia Prima Tratada:* Estiércol de cerdo y lodo de aguas residuales.
- *Área/Lugar fuente materia prima:* Mas el Cros, Santa Pau-Olot, granja ubicada en el Parque Natural de la zona volcánica de la Garrotxa, Pcia. de Girona, España. Estación depuradora biológica de aguas residuales de ciudad de Lleida, España.
- *Tipo de Recolección/Transporte:* Particular
- *Objetivos:* Ensayar el tratamiento anaeróbico termofílico del estiércol de cerdo a diferentes temperaturas y diluciones para evaluar el efecto de diferentes concentraciones de nitrógeno. Comprobar si el tratamiento anaeróbico conjunto del estiércol con lodo residual resulta ser más productivo que el tratamiento anaeróbico de cada materia prima por separado.
- *Escala y Metodología:* Dos experiencia a escala laboratorio. 1) Biodigestores tipo Discontinuo. Mezcla nula. Temperatura del proceso de 49° C durante 42 días mantenida por un baño termostático. 2) Biodigestores tipos discontinuos. Mezcla completa a través de un sistema de agitación mecánica de 200 rpm. Temperatura del proceso de 52 °C por 46 días y 55 °C por 48 días mantenida por un baño termostático.
- *Resultados:* El tratamiento anaeróbico termofílico del estiércol de cerdo a distintas temperaturas no resultó ser significativo en relación a la producción de biogás. El efecto inhibitor del amonio se manifestó en los ensayos de mayor concentración de sustrato. El tratamiento anaeróbico conjunto del estiércol de cerdo con lodo de

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



aguas residuales resultó ser más productivo que el tratamiento anaeróbico de cada residuo por separado.

NOMBRE: “Digestión anaerobia para el tratamiento de residuos orgánicos: estudio de las necesidades para la implantación en Perú”

AUTOR: Laura Jarauta Rovira

DIRECCIÓN: Rosario Pastor Zegarra

FUENTE: Departamento de Ingeniería Química. Universidad Politécnica de Cataluña. España.

DESCRIPCIÓN:

- *Ámbito De Trabajo:* Mas el Cros, Santa Pau-Olot, granja ubicada en el Parque Natural de la zona volcánica de la Garrotxa, Pcia. de Girona, España. Planta Lemvig, Dinamarca.
- *Materia Prima Tratada:* Estiércol de cerdo.
- *Área/Lugar fuente materia prima:* Granja Mas el Cros, Pcia. de Girona, España, con capacidad de 400 madres, en ciclo cerrado.
- *Tipo de Recolección/Transporte:* El estiércol se conduce desde los establos hacia la cámara de mezcla del biodigestor por gravedad.
- *Objetivos:* Lograr un manejo sustentable y sostenible del estiércol generado en la granja de Mas el Cros, España. Generar energía a partir del biogás recuperado para autoconsumo. Minimizar los impactos ambientales negativos producidos por la cría intensiva de animales.
- *Escala y Metodología:* Experiencia a escala real. Biodigestores Continuos de desplazamiento horizontal flujo tipo pistón, subterráneos. Temperatura del proceso 32-35°C y 15 días de retención hidráulica. Sistema de agitación tipo neumática. Gasómetro de plástico inflable.
- *Resultados:* El tratamiento biológico anaeróbico aplicado al estiércol de cerdo resultó factible para la minimización de impactos negativos sobre el medio físico derivados de la cría intensiva de animales, para la recuperación de energía y para la redistribución de nutrientes a partir del uso de los lodos residuales de digestión como enmienda para suelos destinados al cultivo de pastos para terneros. Se estima una producción media de 140 m³/día de biogás. El ahorro medio neto de energía es de 125,5 MWh/año, a partir del cual se genera calor y electricidad para autoconsumo.

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”

NOMBRE: “Planta de Biogás en Holsworthy”

AUTORES: Jørgen Fink, Mark Christensen

FUENTE: Consejo del Condado de Devon, Reino Unido.

DESCRIPCIÓN:

- *Ámbito De Trabajo:* Planta Holsworthy, Devon, Reino Unido.
- *Materia Prima Tratada:* Estiércol de vaca, cerdo y pollo. Residuos de alimentos.
- *Área/Lugar fuente materia prima:* Granjas locales dentro de un radio de 8 a 10 Km de la planta.
- *Tipo de Recolección/Transporte:* Camiones particulares.
- *Objetivos:* Lograr un manejo sustentable y sostenible del estiércol generado en las granjas de Holsworthy, Devon. Reducir el riesgo de propagación de enfermedades. Minimizar los impactos ambientales negativos producidos por la cría intensiva de animales. Generar energía a partir del biogás recuperado. Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el área. Reducir el uso de fertilizantes sintéticos.
- *Escala y Metodología:* Experiencia a escala real. Biodigestor Continuo de mezcla completa. Temperatura del proceso 37° C y 20 días de retención hidráulica.
- *Resultados:* El tratamiento biológico anaeróbico aplicado al estiércol generado en la actividad agropecuaria de Holsworthy resultó factible para la minimización de impactos negativos sobre el medio físico de la zona, para la reducción del riesgo de propagación de enfermedades derivados de esta actividad y la recuperación de energía. Se estima una producción de 6 millones de m³ de biogás por año a partir del cual, se genera calor y electricidad a través de dos motores. Se obtienen aproximadamente 2.7 MW por año.
Los lodos producidos a partir de la digestión anaeróbica del residuo son transportados hacia las granjas fuentes de materia prima, para ser usado como enmiendas.



IMAGEN 2. Planta de biogás de Holsworthy, Reino Unido. Fuente: “Desafíos y Estrategias para Implementar la Digestión Anaeróbica en los Agroecosistemas” Methane to Markets, INTI, INTA, SECyT, SAyDS y SAGPyA.

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”

NOMBRE: “Plantas de Biogás Centralizadas en Dinamarca”

AUTORES: Teodorita Al Seadi

FUENTE: Departamento de Bioenergía, Universidad del Sur de Dinamarca.

DESCRIPCIÓN:

- *Ámbito De Trabajo:* Planta Lemvig, Dinamarca.
- *Materia Prima Tratada:* Estiércol de vaca, cerdo y pollo. Residuos de alimentos y lodos procedentes de tratamientos de aguas residuales.
- *Área/Lugar fuente materia prima:* Granjas locales dentro de un radio promedio de 7.5 Km de la planta.
- *Tipo de Recolección/Transporte:* Camiones particulares.
- *Objetivos:* Lograr un manejo sustentable y sostenible del estiércol generado en las granjas de Lemvig, Dinamarca. Minimizar los impactos ambientales negativos producidos por la cría intensiva de animales. Generar energía a partir del biogás recuperado.
- *Escala y Metodología:* Experiencia a escala real. Biodigestor Continuo Tipo Silo. Temperatura del proceso 52.5° C y 21 días de retención hidráulica.
- *Resultados:* El tratamiento biológico anaeróbico aplicado a residuos agropecuarios resultó factible para la minimización de impactos negativos sobre el medio físico derivados de la cría intensiva de animales, para la recuperación de energía y para la redistribución de nutrientes a partir del uso de los lodos residuales de digestión como enmiendas para suelos por los agricultores de la zona. Se estima una producción de 5.4 millones de m³ de biogás por año, equivalente a 39 millones KWh de energía por año aprox., a partir del cual se genera calor y electricidad.



IMAGEN 3. Planta de biogás en Lemvig, Dinamarca. *Fuente: Pagina web*
<http://www.lemvigbiogas.com/ES.htm>. Consulta: 17/11/2010 20:30 hs.

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
**“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”**



NOMBRE: “Digestión Anaeróbica de estiércol porcino: Planta de Biogás a escala real en Sung-Hwan, Corea”

AUTORES: K.J. Chae, S.K. Yim, K.H. Choi, W.K. Park y D.K. Lim

FUENTE: División de Medio Ambiente y Ecología Agrícola. Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología Agrícola, Corea.

DESCRIPCIÓN

- *Ámbito De Trabajo:* Planta de Biogás ubicada en Sung-Hwan
- *Materia Prima Tratada:* Estiércol de cerdo
- *Área/Lugar fuente materia prima:* Granja de cerdo ubicada en Sung-Hwan.
- *Tipo de Recolección/Transporte:* Particular
- *Objetivos:* Evaluar la factibilidad y conocer los criterios de funcionamiento de los digestores de bajo presupuesto como fuente de ingresos para las explotaciones de ganado porcino en Corea.
- *Escala y Metodología:* Experiencia a escala real. Biodigestor Semicontinuo de mezcla completa mediante recirculación de gases por tubo de aspiración a través de una bomba externa. Temperatura del proceso de $35\pm 0,8^{\circ}\text{C}$ obtenida por un intercambiador de calor externo.
- *Resultados:* El tratamiento de estiércol de cerdo aplicado resultó eficiente para la recuperación de energía y la minimización de los impactos ambientales asociados a la cría intensiva de cerdo. Se obtuvo una reducción de SV del 55% y una producción de biogás de $0,70 \text{ m}^3/\text{kg SV}$ agregado.

6. MARCO LEGAL

Según legislación vigente, los tratamientos biológicos anaeróbico y aeróbico y la actividad ganadera intensiva, se enmarcan en las siguientes normativas nacionales y provinciales:

6.1. Normativa Nacional

- Artículo 41 de la Constitución Nacional
- Ley N° 25.675. Ley General del Ambiente. Presupuestos mínimos para el logro de una gestión sustentable y adecuada del ambiente, la preservación y protección de la diversidad biológica y la implementación del desarrollo sustentable. (Sancionada el 06/11/2002 y promulgada parcialmente el 27/11/2002 por el Decreto 2413/02 y publicada el 28/11/2002 Boletín Oficial N° 30036)
- Ley N° 25.831. Ley de Libre Acceso a la Información Pública Ambiental. Presupuestos mínimos de protección ambiental para garantizar el derecho de acceso a la información ambiental que se encontrare en poder del Estado. (Sancionada el 26/11/2003 y promulgada el 06/01/2004 y publicada el 07/01/2004 Boletín Oficial N° 30312).
- Ley N° 25.612. Ley de Gestión Integral de Residuos Industriales y de Actividades de Servicio. Presupuestos mínimos de protección ambiental sobre la gestión integral de residuos de origen industrial y de actividades de servicio, que sean generados en todo el territorio nacional y derivados de procesos industriales o de actividades de servicios. (Sancionada el 03/07/2002, promulgada parcialmente el 25/07/2002 por el Decreto 1343/02 y publicada el 29/07/2002 Boletín Oficial N° 29950).

La norma complementaria a esta ley que se destaca es la siguiente:

- Resolución 3587/06. Normas Argentinas Mínimas para la Protección Ambiental en el Transporte y Distribución de Gas Natural y Otros Gases por

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
***“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”***



Cañerías. (Sancionada el 18/09/2006 y publicada el 29/09/2006 Boletín Oficial N° 31001)

- Ley N° 25688. Régimen de Gestión Ambiental de Aguas. Establece los presupuestos mínimos ambientales para la preservación de las aguas, su aprovechamiento y uso racional, sobre el vertido de sustancias en aguas superficiales. (Sancionada el 28/11/2002, promulgada el 30/12/2002 y publicada el 03/01/2003 Boletín Oficial N° 30060).
- Ley N° 26.093. Ley Nacional de Biocombustibles. Régimen de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentable de Biocombustibles (Sancionada el 19/04/2006, promulgada el 12/05/2006 y publicada el 15/05/2006 Boletín Oficial N° 30905) y su Decreto Reglamentario 109/07.

Entre las normas complementarias a esta ley se destaca la siguiente normativa:

- Resolución 1296/08. Condiciones mínimas que deben cumplir las Plantas de Elaboración, Almacenamiento y Mezcla de Biocombustibles en relación a la seguridad en caso de incendio. (Sancionada el 13/11/2008 y publicada el 18/11/2008 Boletín Oficial N° 31534)
- Ley N° 26.190. Ley de Energías Renovables. Régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica. (Sancionada el 06/12/2006, promulgada el 27/12/2006 y publicada el 02/01/2007 Boletín Oficial N° 31064) y su Decreto Reglamentario 562/09.
- Ley N° 24.295. Ley de Aprobación de la CMNUCC. (Sancionada el 07/12/1993, promulgada el 30/12/1993 y publicada el 11/01/1994 Boletín Oficial N° 27805)
- Ley N° 25.438. Ley de Aprobación del Protocolo de Kyoto de la CMNUCC, adoptado en Kyoto - Japón. (Sancionada el 20/06/2001, promulgada el 13/07/2001 y publicada el 19/07/2001 Boletín Oficial N° 29692)

Entre las normas a destacar que complementan a esta ley se encuentran:

- Disposición Nacional 166/01. Creación del Programa Nacional de Energías y Combustibles Alternativos y Sustentables. (Sancionada el 16/10/2001 y publicada el 24/10/2001 Boletín Oficial N° 29759)
- Resolución 1076/01. Creación del Programa Nacional de Biocombustibles. (Sancionada el 08/08/2001 y publicada el 29/08/2001 Boletín Oficial N° 29720)
- Ley N° 20.466. Ley de Fiscalización de Fertilizantes y Enmiendas. (Sancionada y promulgada el 23/05/1973 y publicada el 06/06/1973 Boletín Oficial N° 22681) y su Decreto Reglamentario 4830/73.
- Resolución 97/01. Reglamento para el manejo sustentable de barros generados en plantas de tratamiento de efluentes líquidos. (Sancionada el 22/11/2001 y publicada el 28/11/2001 Boletín Oficial N° 29784)
- Resolución 70/01. Creación del registro de establecimientos pecuarios de engorde a corral, en el ámbito de la Dirección Nacional de Sanidad Animal. (Sancionada el 22/01/2001 y publicada el 06/02/2001 Boletín Oficial N° 29582)

6.2. Normativa de la Provincia de Buenos Aires (PBA)

- Artículo 28 de la Constitución de la PBA
- Ley N° 11.723. Ley Integral del Medio Ambiente y los Recursos Naturales. (Sancionada el 09/11/1995, promulgada el 06/12/1995 por el Decreto 4371/95 y publicada 22/12/1995 Boletín Oficial N° 23036)
- Ley N° 13.592. Ley de Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU). (Sancionada y Promulgada el 14/12/2006 por el Decreto 3401/2006 y publicada 20/12/2006 Boletín Oficial N° 25560)

Se desataca la siguiente norma complementaria a la ley anterior:

- Resolución 1143/02. Pautas para la disposición de residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios. (Sancionada y Promulgada el 13/08/2002 y publicada el 18/09/2002 Boletín Oficial N° 24562).
- Ley 12257. Código de Aguas. Régimen de protección, conservación y manejo del recurso hídrico de la Prov.de Bs. As. (Sancionada 09/12/1998 y Promulgada el 26/01/1999 y publicada el 09/02/1999 Boletín Oficial N° 23756)
- Ley N° 13.719. Ley adherida al régimen previsto por la Ley Nacional 26.093 (Sancionada el 08/08/2007, promulgada parcialmente el 10/09/2007 por el Decreto 2189/07 y publicada el 20/09/2007 Boletín Oficial N° 25743).

6.3. Normativa Específica

No existe en el país legislación específica de orden técnico respecto al tratamiento biológico anaeróbico y aeróbico de residuos orgánicos para la generación de biogás y la elaboración de compost y enmiendas orgánicas respectivamente ni tampoco vinculadas con el manejo de emisiones y residuos de la producción animal.

Dentro de las leyes vigentes relacionadas a las plantas de generación de biogás, Argentina presenta la Ley de Biocombustibles N° 26.093 y la Ley de Energías Renovables N° 26.190, las cuales fomentan la producción y uso de fuentes renovables de energía, mediante un régimen promocional, que incluye desde la disminución de impuestos hasta el incentivo de la investigación, cooperación y transferencia de tecnología a partir de programas específicos.

En la escala global, el más difundido es el Protocolo de Kyoto (1997), que propone la reducción de la emisión de los GEI mediante aplicación de Mecanismos de Desarrollo Limpio entre los cuales se encuentran los procesos biológicos aeróbico y anaeróbico. La Argentina mediante la Ley N° 24.295 aprobó la Convención sobre el Cambio Climático y a través de la Ley N° 25.438 ratificó este Protocolo.

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
***“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”***



En cuanto a la utilización del compost como producto final, Argentina sólo cuenta con la Ley de Fertilizantes y Enmiendas Orgánicas N° 20.466, que fija las normas para el control de calidad y comercialización de fertilizantes y enmiendas.

Asimismo, la Resolución Nacional 97/01, que constituye el reglamento para el manejo de barros generados en plantas de tratamiento de efluentes líquidos considera al compostaje y a la digestión anaeróbica como procesos que reducen fuertemente los patógenos.

Dentro del marco internacional, una de las normativas respecto de la calidad del producto final del proceso aeróbico adoptada por el grupo de suelos CRUB de Bariloche en sus trabajos con biosólidos y por la Gerencia de Calidad de Obras Sanitarias Mar del Plata en su prueba piloto con barros primarios cloacales de Mar del Plata, ha sido de la EPA, Registro Federal 58: 9248-9415, sobre normas de uso o disposición de barros cloacales, sancionada el 19/02/1993.

Tanto la resolución nacional 97/01 como esta normativa establecen indicadores de maduración del compost obtenido del proceso aeróbico y regula los límites de la reducción de patógenos que aseguran la calidad del producto final. Si bien estas normas están referidas a lodos o barros cloacales, los parámetros establecidos en ellas pueden ser aplicables al compost de residuos orgánicos generados en la cría intensiva ganadera. Tanto las normativas de la EPA como la resolución Nacional 97/01, categorizan el producto final como clase A o B, según superen o no los valores límites establecidos en cada una de ellas. Esta clasificación tiene el objeto de restringir el uso y la aplicación del producto final. Los valores límites considerados en este trabajo, son aquellos que determinan un producto final apto para ser utilizado como un mejorador de suelos degradados cuyos usos estén permitidos según la calidad final obtenida.

CAPITULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

CAPITULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Uno de los procesos más importantes en los ecosistemas es la *mineralización*. En este proceso la materia orgánica muerta, procedente de animales y plantas, es transformada de manera lenta pero continua, por acción de bacterias a formas químicas estables y asimilables por los productores primarios.

Así, se logra el reciclaje de la materia orgánica en la naturaleza y según transcurra en ausencia o presencia de oxígeno, este proceso biológico se denomina anaeróbico o aeróbico respectivamente.

Cuando estos procesos se reproducen de forma controlada con los residuos orgánicos provenientes de actividades antropogénicas, se los conoce como tratamientos biológicos.

Según Bonmatí A. y Magrí A, 2007ⁱⁱⁱ, "*un tratamiento es una operación o conjunto de operaciones que cambian las características físicas, químicas o biológicas de un residuo con el objetivo de neutralizar las sustancias tóxicas, recuperar materiales valorizables, facilitar su uso como fuente de energía o favorecer su disposición final*".

Los tratamientos biológicos de aplicación en este Proyecto de Trabajo Final son los siguientes:

- **Tratamiento biológico anaeróbico o biodigestión anaeróbica:** Los residuos orgánicos son degradados, obteniéndose como productos finales *biogás* y un efluente o lodo más estable que el residuo inicial.
- **Tratamiento biológico aeróbico o compostaje:** Los residuos orgánicos son degradados dando como productos finales *compost*, dióxido de carbono y agua.

7. TRATAMIENTO BIOLÓGICO ANAERÓBICO

7.1. Descripción del Proceso Anaeróbico

La fermentación o biodigestión anaeróbica es un proceso natural constituyente del ciclo del carbono en la naturaleza. La degradación de la materia orgánica por medio de este proceso se basa en la acción de grupos de bacterias que, en ausencia total de oxígeno libre, transforman dicha materia en compuestos más sencillos y estables; entre ellos, una mezcla de gases denominada *biogás*, compuesto mayoritariamente por metano y dióxido de carbono, y trazas de nitrógeno, hidrógeno y ácido sulfhídrico.

La condición de anaerobiosis² durante el desarrollo de todo el proceso le da el nombre de anaerobio o anaeróbico, tanto al proceso como a las bacterias mismas. Además de esta condición, las bacterias anaeróbicas como microorganismos requieren para su desarrollo y reproducción de otras condiciones ambientales, que se describirán más adelante, así como también, la presencia de nutrientes.

Durante la evolución del proceso, se producen numerosas reacciones metabólicas en microorganismos de distintas poblaciones que difieren en sus características nutricionales e interactúan de forma secuencial y simbiótica. Así, los productos finales resultantes de la actividad metabólica de una generación de microorganismos son utilizados como alimento o fuente de energía por otra generación de microorganismos. De esta manera, se produce una sucesión natural de poblaciones que continua hasta que queda insuficiente material orgánico. Cualquier exceso o falta de actividad de algún grupo de bacterias tiende a desestabilizar el equilibrio de este sistema ecológico, provocando un cambio en las condiciones del medio desfavorable para alguna población bacteriana, lo que conlleva a una merma o incluso a la interrupción en la producción de biogás.

² Anaerobiosis: Ambiente desprovisto de oxígeno. Condición ambiental en ausencia de aire, aunque se lo utiliza específicamente respecto del oxígeno.

7.1.1. Etapas del Proceso biológico anaeróbico

Debido a la complejidad del proceso anaeróbico, se hace difícil establecer etapas bien definidas. En la bibliografía consultada, distintos autores explican este proceso mediante tres o cuatro etapas presentando ciertas divergencias entre ellos. En este trabajo se considera que las etapas intervinientes son las siguientes:

- Etapa de hidrólisis y fermentación
- Etapa de acetogénesis
- Etapa de metanogénesis

A continuación se describen las características de cada una de estas Etapas, según las poblaciones de microorganismos que intervienen y los productos resultantes de la actividad metabólica de cada una de ellas:

7.1.1.1. Etapa de hidrólisis y fermentación

Un grupo de bacterias denominadas *hidrolíticas* transforman las macromoléculas orgánicas insolubles, por medio de enzimas, en cadenas carbonadas más simples solubles en el medio acuoso. A continuación, estos compuestos experimentan un proceso de fermentación, en el que intervienen las mismas bacterias junto con otro grupo denominadas *fermentativas*, dando origen a ácidos grasos volátiles (AGV), entre ellos el ácido acético, propiónico y butírico en mayor proporción, ácidos grasos de cadena larga y alcoholes con liberación de hidrógeno molecular y dióxido de carbono.

7.1.1.2. Etapa de acetogénesis

Un grupo de bacterias denominadas *acetogénicas* degradan los ácidos orgánicos y alcoholes, generados en la etapa anterior, a ácido acético, hidrógeno molecular y dióxido de carbono.

7.1.1.3. Etapa de metanogénesis

Dos subgrupos de bacterias denominadas *metanogénicas*, son las responsables de la formación de metano. Un subgrupo de bacterias llamadas *hidrogenotróficas* reduce dióxido de carbono a partir de hidrógeno molecular, liberando metano y agua. Otro subgrupo de bacterias denominado *acetoclásticas*, transforman el acetato en metano y dióxido de carbono a través de una descarboxilación, liberando iones bicarbonatos al medio. El 70% del total de metano producido se obtiene a través de este último subgrupo. Cabe mencionar, que las bacterias metanogénicas son las más sensibles de toda la comunidad bacteriana a los cambios en las condiciones del medio.

Además, existen otras dos especies de bacterias intervinientes. Un grupo de bacterias anaeróbicas estrictas llamadas *sulfato-reductoras*, en presencia de sulfatos, compiten con las metanogénicas y acetogénicas por algunos productos intermedios como el hidrógeno, acético, propiónico y otros ácidos, produciendo finalmente ácido sulfhídrico. Este gas es el responsable del mal olor del proceso, (olor a "huevo podrido"), y como se verá más adelante, pertenece al conjunto de sustancias inhibidoras del proceso. El resultado de aquella competición es la que determina la proporción de sulfhídrico y metano en el biogás generado. El otro grupo de bacterias llamadas *desnitrificantes* reducen los óxidos de nitrógeno del medio a nitrógeno gaseoso. Estas son importantes ya que remueven el oxígeno disuelto en el sustrato próximo a digerir, creando las condiciones de anaerobiosis necesarias para que se desarrollen las bacterias productoras de biogás.

Una de las relaciones interespecíficas más importantes dentro de la comunidad bacteriana es la asociación simbiótica existente entre las bacterias acetogénicas y las metanogénicas hidrogenotróficas. Estas últimas consumen el hidrógeno molecular producido por las acetogénicas, y de esta manera la presión parcial de este gas se mantiene en un rango favorable para el equilibrio del proceso. Cualquier disminución en la actividad metabólica de las bacterias metanogénicas, provoca un aumento en la concentración de hidrógeno molecular y, por ende, de su presión, lo cual inhibe la actividad de las acetogénicas y, por consiguiente, bloquea la producción de acetato. Como consecuencia, el medio se acidifica por un aumento en la concentración de AGV y se interrumpe la generación de biogás.

La Figura 6 representa las diferentes Etapas del proceso anaeróbico, los principales microorganismos, y los productos intermedios.

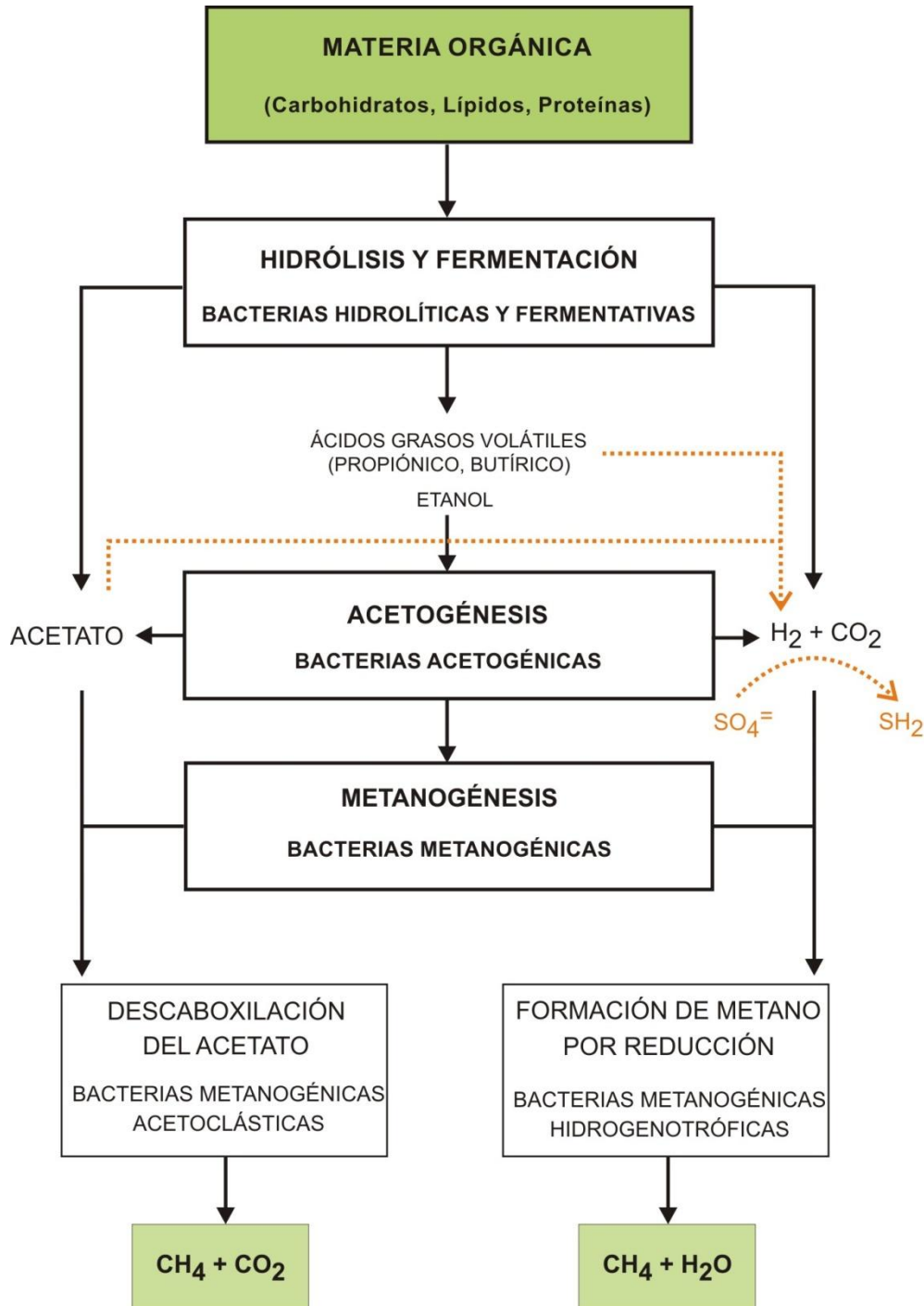


FIGURA 6. Esquema de las etapas del proceso anaeróbico. Fuente. Adaptación propia de El camino de la biodigestión. Ambiente y tecnología socialmente aprobada (2001) .Groppelli E., Giampaoli O. Universidad Nacional del Litoral.

7.2. Tipos de materias primas

Las materias primas que suelen ser utilizadas en el tratamiento biológico anaeróbico son:

- Residuos agrícolas y ganaderos, tales como estiércoles animales y restos de cosecha.
- Aguas y residuos sólidos industriales provenientes de la producción de alcohol, procesado de fruta, verdura, lácteos, carnes e industrias alimenticias en general.
- Aguas residuales municipales y fracción orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FO-RSU)
- Cultivos energéticos, como el sorgo granífero

Los objetivos de aplicación del tratamiento anaeróbico pueden ser diferentes. A continuación en la Figura 7 se muestra un esquema con los objetivos buscados en cada caso.

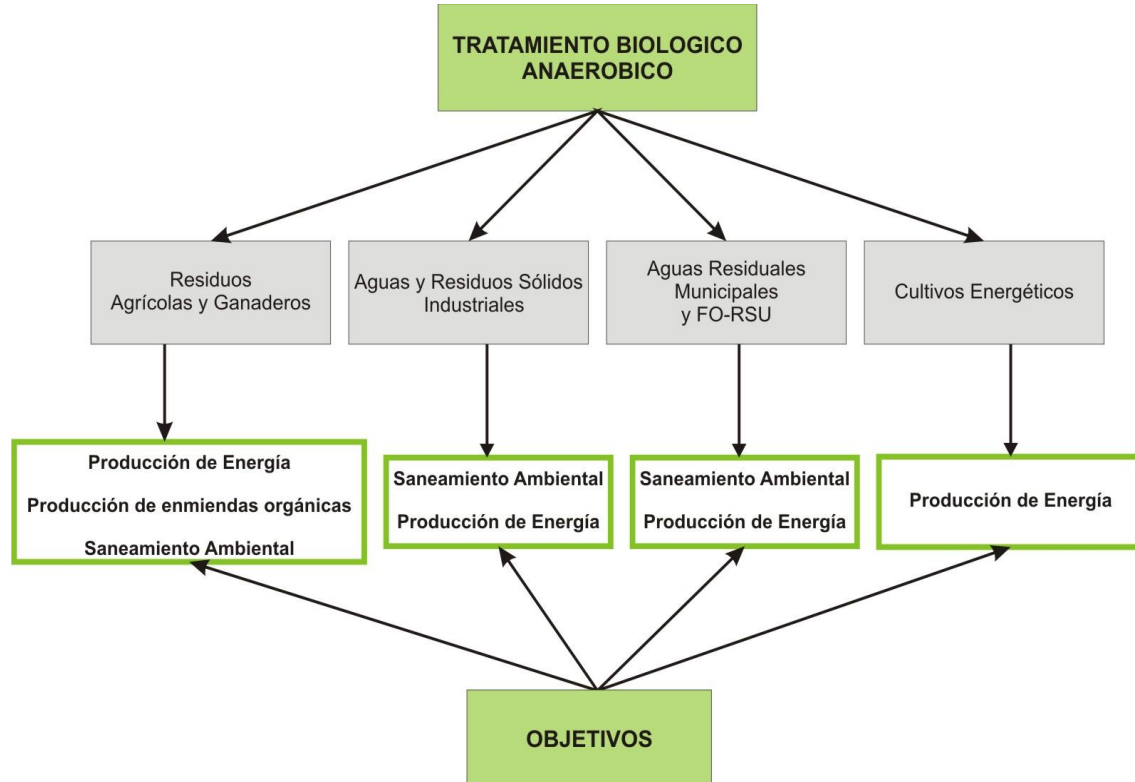


FIGURA 7. Esquema de objetivos del tratamiento anaeróbico según materias primas utilizadas. *Fuente: Adaptación propia del Manual para la Producción de Biogás (2003). Hilbert. J. INTA-Castelar*

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
**“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”**



El objetivo de *saneamiento ambiental* se refiere a obtener un efluente de características físicas, químicas y biológicas tales que su disposición final no represente un riesgo de contaminación.

El objetivo de *producción de energía* se refiere a obtener máximos rendimientos en la producción de metano o la mayor conversión de materia orgánica (sólidos volátiles) en biogás.

El objetivo de *producción de enmiendas orgánicas* se refiere a obtener un efluente estabilizado, química y biológicamente, de manera que su aplicación directa a los suelos para cultivos no represente un riesgo de contaminación ni un peligro para la Salud Pública.

El logro de estos objetivos está determinado por las condiciones del proceso, tanto ambientales como de operación, y el tipo de biodigestor utilizado, ambos puntos descriptos más adelante.

A continuación, en la Tabla 7 se muestran los potenciales de generación de biogás para diferentes materias primas.

Tabla 7. POTENCIALES DE GENERACIÓN DE BIOGÁS PARA DISTINTAS MATERIAS PRIMAS	POTENCIALES DE BIOGÁS (L de biogás/Kg de sólido fresco)	% SÓLIDOS VOLÁTILES
Estiércol Vacuno	15-40	83,00
Estiércol Porcino	50-70	80,00
Estiércol Aviar Parrilleros	30-50	66,00
Estiércol Aviar Ponedoras	35-55	90,00
Desechos Huerta	39-63	94,00
Residuos Amiláceos o Azucarados (Papas, Mandioca, Remolacha)	100	94,00
Residuos de Comida	75-120	90,60
Sorgo Granífero	550	98,00

Fuente: El camino de la biodigestión. Ambiente y tecnología socialmente aprobada (2001) .Groppelli E., Giampaoli O. Universidad Nacional del Litoral.

7.3. Parámetros de control del tratamiento biológico anaeróbico

La biodigestión anaeróbica para degradar los residuos orgánicos y/o producir biogás, al ser un proceso biológico necesita condiciones ambientales propicias y un manejo adecuado para que el sistema funcione eficientemente, desde que se carga el biodigestor hasta la producción del gas y salida del efluente.

El control de parámetros que inciden en el desarrollo del proceso es para mantenerlos en determinados rangos para lograr óptimos rendimientos en la producción de metano.

Los parámetros a controlar pueden agruparse en relación a:

- Materia prima a tratar
- Condiciones ambientales del proceso
- Condiciones de operación del proceso

Parámetros relacionados con la materia prima a tratar:

- Relación Carbono/Nitrógeno y contenido de otros nutrientes
- Tamaño de las partículas
- Concentración de sólidos

Parámetros relacionados con las condiciones ambientales del proceso:

- Potencial Redox
- Temperatura
- pH y alcalinidad
- Presencia de inhibidores

Parámetros relacionados con las condiciones de operación del proceso:

- Agitación
- Utilización de inóculos
- Velocidad de carga volumétrica y Tiempo de retención hidráulica (TRH)

7.3.1. Parámetros relacionados con la materia prima a tratar

7.3.1.1. Relación Carbono/Nitrógeno y contenido de otros nutrientes

El carbono y el nitrógeno son las fuentes principales de alimentación de las bacterias, y son consumidos en determinada proporción por ellas; el carbono es fuente de energía y el nitrógeno es un elemento necesario para las síntesis de proteínas, esenciales para el crecimiento y reproducción bacteriana. La relación C/N, expresa las unidades de carbono por unidades de nitrógeno que contiene un material orgánico y es una medida del balance óptimo de nutrientes requeridos por los microorganismos del proceso. Esta condición se da en relaciones C/N entre 15 y 30 (Speece, 1987)^{iv}.

Si esta relación es inferior a 15, indica que la materia prima a degradar contiene relativamente más nitrógeno del necesario, favoreciendo la liberación de nitrógeno amoniacal que resulta ser tóxico para las bacterias a partir de cierta concentración.

Aquellas materias primas con relaciones C/N superiores a 30, tales como residuos vegetales con altos contenidos de lignina y celulosa, no se hidrolizan fácilmente, siendo ésta etapa la que limita la velocidad del proceso, y como consecuencia, ralentiza la generación de biogás. No obstante, poseen mayor potencial de producción de biogás que las materias nitrogenadas por su alto contenido de materia orgánica.

Según la FAO, (FAO, 1986), *"mientras que los primeros 10 días de fermentación las materias primas nitrogenadas generan de 34,4%-46% del total de gas producido, las ricas en carbono solo aportan el 8,8%"*.

Entre las materias primas más utilizadas para la generación de biogás, las excretas de humanos y de animales son ricas en nitrógeno, con una relación C/N inferior a 25, pero en general, caen dentro del rango óptimo mencionado.

En la Tabla 8 se muestra el contenido de nitrógeno y las relaciones carbono/nitrógeno normales de algunos materiales orgánicos. Cabe mencionar que si se dispone de una materia prima con una relación C/N no apropiada para iniciar un proceso de digestión anaeróbica, es conveniente mezclarlo con otros materiales (co-digestión) para lograr una relación aceptable, y así conseguir un buen rendimiento de biogás.

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”

Tabla 8. CONTENIDO DE NITRÓGENO Y RELACIÓN CARBONO/NITRÓGENO (C/N basada en pesos secos totales)	% N	C/N
Residuos de procesamiento de comida		
▪ Residuos de fruta	1,52	34,8
▪ Residuos mezcla de mataderos	7 - 10	2
▪ Cáscara de papas	1,5	25
Estiércoles		
▪ Estiércol de vaca	1,7	18
▪ Estiércol de caballo	2,3	25
▪ Estiércol de cerdo	3,75	20
▪ Estiércol de aves de corral	6,3	15
▪ Estiércol de oveja	3,75	22
Fangos		
▪ Fangos digeridos activados	1,88	15,7
▪ Fangos crudos activados	5,6	6,3
Madera y paja		
▪ Residuos de aserraderos	0,13	170
▪ Paja de avena	1,05	48
▪ Aserrín	0,1	200 – 500
▪ Paja de trigo	0,3	128
▪ Madera de pino	0,07	723
Papel		
▪ Papel mezclado	0,25	173
▪ Papel periódico	0,05	983
▪ Papel marrón	0,01	4.490
▪ Revistas comerciales	0,07	470
Residuos de jardín		
▪ Recortes de césped	2,15	20,1
▪ Hojas (caídas recientemente)	0,5 – 1	40 – 80
Biomasa		
▪ Jacinto de agua	1,96	20,9
▪ Hierba de bermuda	1,96	24

Fuente: Tchobanoglous, et al., 1998⁴.

Además del carbono y nitrógeno, las bacterias anaeróbicas necesitan de otros elementos para su desarrollo en menores concentraciones, tales como el fósforo, azufre, potasio, magnesio, sodio, calcio y hierro; y en concentraciones trazas, elementos tales como el cobalto, cobre, manganeso, molibdeno, níquel, selenio, vanadio y zinc.

Generalmente, estos elementos se encuentran en las cantidades necesarias en todos los materiales orgánicos habitualmente utilizados para la generación de biogás.

7.3.1.2. Tamaño de las partículas

Esta condición también influye sobre la velocidad de generación de biogás. Cuanto menor es el tamaño de las partículas mayor es la superficie de contacto entre las bacterias y éstas. De esta manera, se obtienen mayores velocidades de degradación de la materia orgánica^{3,vi} y, por consiguiente, menores tiempos de permanencia de ella dentro del biodigestor, lo que significa menor volumen de los biodigestores.

Sin embargo, existe un límite para esta variable. Una trituración excesiva de las partículas, por el contrario, puede provocar inestabilidad en el desarrollo del proceso. Por lo tanto, resulta conveniente reducir el tamaño de las partículas, en los casos que sea necesario, hasta lograr diámetros entre 5 mm y 25 mm. Además, cabe mencionar que un tamaño adecuado evita obstrucciones en las conducciones del biodigestor, en el caso que sea continuo.

7.3.1.3. Concentración de sólidos

La materia prima que se destina a la alimentación de los biodigestores, está compuesta por una fracción sólida y una cantidad determinada de agua.

La eficiencia y producción de biogás depende de la concentración de sólidos dentro del biodigestor. Altas concentraciones pueden provocar la desestabilización del sistema anaeróbico, causando una acumulación de ácidos que puede llegar a paralizar el proceso. Este fenómeno comúnmente se denomina *sobrecarga orgánica*, y es más crítico durante el arranque del biodigestor.

Desde el punto vista biológico, esta desestabilización se debe a que la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato, se ve limitada de manera creciente a medida que aumenta la concentración de sólidos dentro del biodigestor. Según el INTA y la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE, 1981)^{vii}, los mejores resultados para biodigestores se obtienen con porcentajes de sólidos entre 7% y 9%. Para el caso del estiércol

³ Tanto Angelidaki y Ahring (2000) como Sharma *et al.* (1988) observaron incrementos en la producción específica de biogás, del orden del 20%, al disminuir el tamaño de las partículas.

aviar, la concentración debe disminuirse a un 6% por su alto contenido de amoníaco (INTA, 1983).

En la Figura 8, se muestra la producción diaria de biogás en función del porcentaje de sólidos para el caso de un biodigestor cargado con estiércol vacuno.

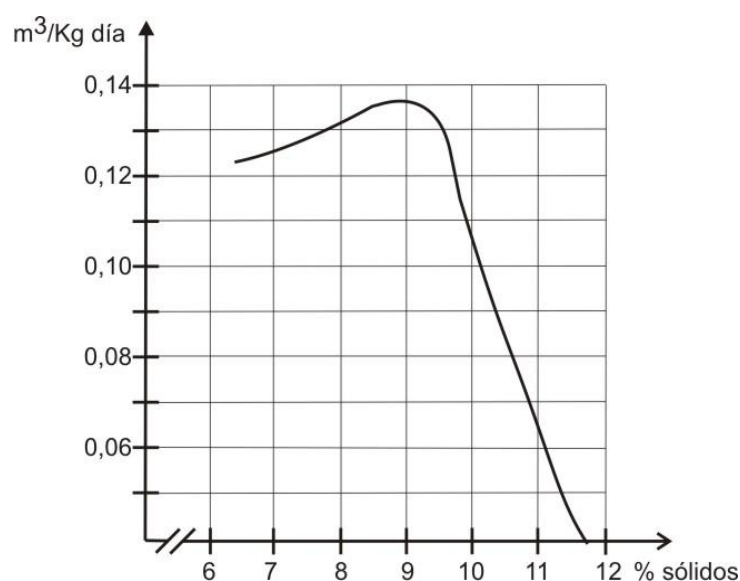


FIGURA 8. Producción de biogás en función del porcentaje de sólidos totales. Fuente: Adaptación propia de *Generación de Energía-Biogás*. GEEAA-FI-UNMDP.

La concentración de sólidos en una materia prima se determina aplicando el método analítico de sólidos totales (ST)⁴ a una muestra. A partir de este valor, se calcula el volumen de agua necesario para diluir la materia prima hasta el nivel pretendido antes de que ingrese al biodigestor.

A continuación, en Tabla 9, se muestran los contenidos de sólidos totales de algunas materias primas que comúnmente se cargan en biodigestores rurales.

⁴ Standard Methods 2540 B. Sólidos totales secados a 103-105 °C.

Tabla 9. CONTENIDO DE SÓLIDOS TOTALES DE ALGUNAS MATERIAS PRIMAS	ST (%)	Humedad (%)
Paja de arroz	83	17
Paja de trigo seca	82	18
Tallo de maíz	80	20
Pasto verde	24	76
Excretas humanas	20	80
Estiércol de cerdo	18	82
Estiércol de vaca	17	83

Fuente: Taylhardat, 1986^{viii}

Sin embargo, cabe realizar una aclaración que se han detectado generaciones importantes de biogás en rellenos sanitarios, los cuales tienen un elevado contenido de sólidos.

7.3.2. Parámetros relacionados con las condiciones ambientales del proceso

7.3.2.1. Potencial Redox

Este es un parámetro clave para el buen funcionamiento del proceso, ya que las bacterias metanogénicas son anaeróbicas estrictas, por lo que pequeñas cantidades de oxígeno resultan tóxicas para su metabolismo. Para asegurar un ambiente fuertemente reductor, óptimo para el desarrollo de estos microorganismos, el potencial redox debe mantenerse entre los -330 mV y -300 mV.

7.3.2.2. Temperatura

La temperatura es una de las condiciones más importantes a controlar en el proceso, ya que influye sobre el crecimiento y la supervivencia bacteriana y, también, sobre los aspectos físicos y químicos del medio anaeróbico.

El proceso de biodigestión puede desarrollarse en tres rangos de temperatura: Psicrófilo, por debajo de 20°C; Mesófilo, entre 20°C y 40°C; y Termófilo, entre 40°C y 65°C; Este proceso se caracteriza por ser endotérmico, por lo tanto requiere de una fuente externa de calor para alcanzar estas temperaturas. La actividad biológica, y por tanto la producción de biogás, aumenta con la temperatura; aunque, a temperaturas superiores a

65°C la actividad bacteriana disminuye rápidamente debido a daños enzimáticos irreversibles en ellas.

Dentro de cada rango existe un intervalo óptimo para el desarrollo bacteriano. Para las bacterias mesofílicas, la temperatura óptima se encuentra entre 30°C y 37°C mientras que para las bacterias termofílicas la temperatura óptima se encuentra entre 52°C y 56°C. Para las psicrófilas, el rango óptimo se encuentra entre 10°C y 20°C, sin embargo posee una velocidad de degradación muy lenta que a los fines de generar biogás a gran escala, su viabilidad depende de los objetivos de cada caso, siendo un factor comprometedor cuando el principal objetivo es generar energía.

A continuación, en la Figura 9, se muestra el volumen de biogás generado en función del tiempo de retención hidráulica (TRH), es decir, del tiempo de permanencia del sustrato dentro del biodigestor, para distintas temperaturas de trabajo.

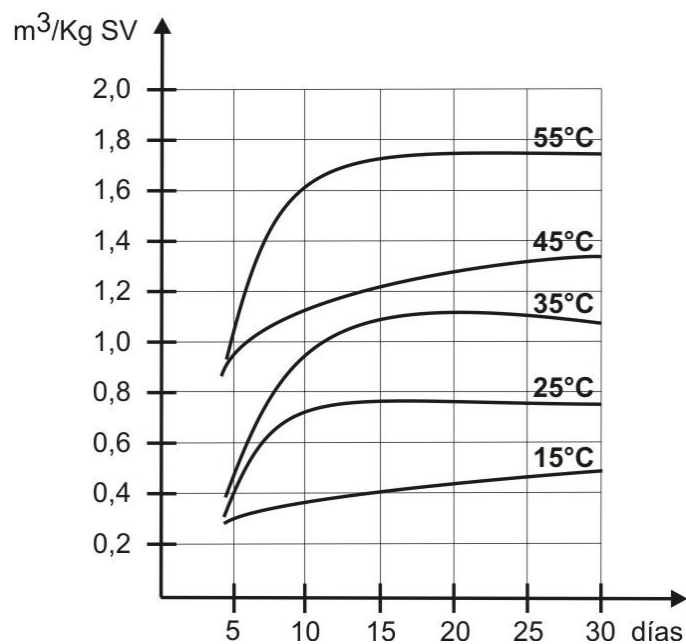


FIGURA 9. Producción de biogás a distintas temperaturas. Fuente: Adaptación propia de Generación de Energía-Biogás. GEEAA-FI-UNMDP.

Además del rango óptimo, las bacterias requieren que las temperaturas se mantengan casi constantes, ya que son sensibles a las variaciones térmicas del medio donde se des-

arrollan. A continuación, la Tabla 10 muestra el grupo de bacterias que predomina en cada rango de temperatura y la sensibilidad térmica de cada grupo.

Tabla 10. SENSIBILIDAD TÉRMICA DE BACTERIAS ANAERÓBICAS		
Grupo de Bacterias	Rango de Temperaturas	Sensibilidad
Psicrofílicas	Por debajo de 20°C	± 2°C/hora
Mesofílicas	entre 20°C y 40°C	± 1°C/hora
Termofílicas	entre 40°C y 70°C	±0,5°C/hora

Fuente: Adaptación propia del Manual para la producción de Biogás (2003). Hilbert J. INTA-Castelar

Con respecto a los aspectos físicos y químicos dependientes de la temperatura, se pueden citar la solubilidad de los gases y sales, equilibrios químicos y la viscosidad.

La solubilidad de los gases desciende al aumentar la temperatura, lo que favorece la transferencia líquido-gas. Esto supone un efecto positivo, si se reducen las concentraciones en el medio acuoso de gases tales como sulfhídrico e hidrógeno, dada la toxicidad de estos compuestos sobre las bacterias anaeróbicas. Por otro lado, si la solubilidad del dióxido de carbono desciende, el pH del medio acuoso tiende incrementarse y esto puede desencadenar un efecto tóxico en caso de altas concentraciones de amonio.

Asimismo, la solubilidad de la mayoría de las sales aumenta con la temperatura, y en mayor grado en las sales orgánicas, por lo que a mayores temperaturas la materia a degradar es más accesible para los microorganismos. Sin embargo, si se trata de compuestos tóxicos, al aumentar la solubilidad, serán potencialmente más tóxicos provocando una mayor inhibición de la actividad biológica.

La temperatura, además, influye directamente sobre determinados equilibrios químicos de gran importancia para el proceso anaeróbico, como los del amonio-amoniaco y los AGV con sus sales. En general, a mayores temperaturas se favorecen las formas no ionizadas que resultan ser más tóxicas para los microorganismos.

La viscosidad del medio disminuye al aumentar la temperatura, favoreciendo la sedimentación de sólidos y menores requerimientos energéticos para la agitación del medio, que se tratará más adelante.

Finalmente, existen ventajas y desventajas según el rango de temperaturas en que se desarrolle el proceso de anaeróbico. A continuación se presentan las principales para el rango termofílico.

Ventajas del rango termofílico

- Mayor velocidad y rendimiento de generación de biogás.
- Mayor velocidad de hidrólisis
- Baja tasa de generación de lodos residuales lo que facilita el post-tratamiento de los mismos, junto con una menor producción de olores.
- Menor TRH, por lo tanto, menor volumen de biodigestor para digerir un determinado volumen de materia prima y en un cierto tiempo.
- Higienización de la materia prima, ya que se destruyen patógenos presentes en ella, así como también, semillas de malas hierbas, huevos y larvas de insectos.

Desventajas del rango termofílico

- Mayor sensibilidad de las bacterias a las variaciones térmicas.
- Mayor gasto energético para el mantenimiento de la temperatura. Esto establece la necesidad de realizar un balance energético que verifique energía neta producida.
- Mayor efecto inhibitor del amoníaco y ácidos grasos volátiles.
- Se requiere mayor control del proceso.
- Mayor complejidad de las instalaciones.

Las desventajas listadas para el rango termofílico resultan ser motivo para la elección de trabajo en el rango mesofílico.

7.3.2.3. pH y alcalinidad

El pH es otro parámetro que condiciona el desarrollo de las bacterias anaeróbicas, y por consiguiente, la producción de biogás.

Durante el arranque del proceso, se van produciendo ciertas variaciones de pH como consecuencia a los cambios constantes en la composición química del sustrato. De esta manera, el medio va ejerciendo una selección sucesiva del tipo de microorganismo que sobrevive a los cambios que se presentan. Una vez alcanzada la estabilización, el pH se mantiene dentro de un rango cercano a la neutralidad, entre 6,5 y 7,5; siendo éste el rango óptimo para todo el conjunto bacteriano.

El comportamiento del pH en el curso de la biodigestión es influenciado por tres equilibrios ácido-base que se describen a continuación:

- El equilibrio químico *amonio/amoniaco*, con una constante ácida de disociación (pKa) de 9,25 a 25°C. Éste se origina cuando se degradan las proteínas y tiene mayor influencia cuanto más nitrogenado es el sustrato. El desplazamiento de este equilibrio hacia el amoniaco provoca un aumento del pH del medio pudiendo llegar a inhibir el proceso.
- El equilibrio químico entre los *AGV* y *sus sales*, en los que predominan el ácido acético, propiónico y butírico, con un pKa de 4,75, 4,87 y 4,81 respectivamente a 25°C. Éste se origina en la etapa fermentativa y acetogénica del proceso. El desplazamiento de este equilibrio hacia los ácidos no disociados es la principal causa de la disminución del pH pudiendo inhibir el proceso por acidificación.
- El equilibrio químico *dióxido de carbono/bicarbonato*, con un pKa₁ de 6,35 a 25°C. Éste tiene mayor influencia durante la metanogénesis, y es de gran importancia ya que constituye el sistema amortiguador o *buffer* del proceso. Ante variaciones en las condiciones del medio, este equilibrio regula el pH dentro del rango óptimo como muestra la Figura 10:

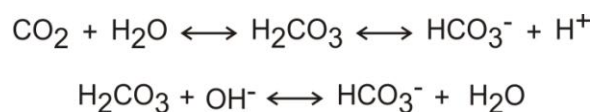


FIGURA 10. Reacciones de equilibrio ácido-base reguladoras de pH. Fuente: Elaboración propia.

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



Así, a pH cercanos a 7 existe un equilibrio entre las fase acetogénica y metanogénica y las especies químicas que predominan en el medio son el ácido carbónico, bicarbonato, sales de ácidos y sales de amoníaco.

Sin embargo, esta capacidad amortiguadora puede romperse fácilmente ante variaciones muy pronunciadas, como cambios bruscos de temperatura, sobrecargas en la alimentación o la presencia de algún tóxico, inhibiendo inmediatamente la metanogénesis que es la etapa más sensible. Esto provoca un desequilibrio en el proceso que conlleva a la acumulación de ácidos, y por consiguiente, la disminución del pH. Este descenso será más o menos rápido, en función de la alcalinidad del medio. Según Fannin (1987)^{ix}, la alcalinidad del bicarbonato debe mantenerse por encima de 2500 mg/L para asegurar la estabilidad del biodigestor.

Así, a pesar de que el pH se considera una variable importante para la evaluación del ambiente bacteriano, la alcalinidad es un parámetro de control más rápido, ya que el pH cambia una vez que se ha consumido dicha capacidad: una pequeña disminución de pH implica un gran consumo de alcalinidad de bicarbonato. Por lo tanto resulta importante evaluar ambos parámetros simultáneamente. En el caso de los residuos ganaderos, que presentan altas alcalinidades, la disminución de pH es poco importante incluso aunque se produzcan importantes acumulaciones de ácidos.

Según Jenkins *et.al* (1983)^x, un criterio simple para determinar la estabilidad de un biodigestor es la relación entre la alcalinidad parcial debida al bicarbonato medida hasta un pH igual a 5,75 y la alcalinidad total debida a los ácidos orgánicos, medida hasta un pH de 4,30. Esta relación debe permanecer por encima de un valor de 0,5 para evitar la acidificación del biodigestor. Otra relación útil es la de Acidez/Alcalinidad, que según Borja (1989)^{xi}, se debe mantener por debajo de 0,40; valor que este autor considera como condición de falla.

7.3.2.4. Presencia de inhibidores

Existen muchas sustancias que se comportan como inhibidores del proceso anaeróbico ya que provocan toxicidad sobre las bacterias. Una situación de inhibición puede ser detectada rápidamente por una reducción en la producción de biogás y por un aumento de los AGV del proceso.

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



La magnitud del efecto tóxico depende de la concentración de la sustancia inhibidora en solución, antagonismos, sinergismos, formación de complejos y aclimatación de los microorganismos a estas sustancias.

Un arranque lento o un aumento gradual de la concentración de estos tóxicos en el biodigestor puede favorecer la aclimatación de los microorganismos, soportando así, mayores concentraciones o permitiendo el recupero de la actividad biológica con mayor rapidez.

Se pueden considerar tres situaciones de inhibición:

- Ingreso de inhibidores al biodigestor junto con el sustrato
- Ingreso de inhibidores al biodigestor en forma accidental
- Generación desequilibrada de productos intermedios durante el proceso

Dentro del primer caso, se distinguen metales pesados y otros cationes, antibióticos y aditivos, detergentes y otros compuestos orgánicos tales como organoclorados y derivados bencénicos. Dentro del segundo caso, el inhibidor más frecuente es el oxígeno, que afecta principalmente a las metanogénicas, anaeróbicas estrictas. Por último, en el tercer caso, se destacan los AGV, el amoníaco, el hidrógeno y el ácido sulfhídrico.

A continuación se describen brevemente las sustancias que comúnmente presentan problemas de toxicidad con el sustrato utilizado en este Trabajo Final.

Metales pesados y otros iones

Todos los cationes pueden ser tóxicos para las bacterias dependiendo de su concentración soluble en el medio.

Los metales pesados provocan toxicidad a bajas concentraciones. Según Hayes y Theis (1978)^{xii}, el orden de toxicidad de estos elementos es $Ni > Cu \gg Cr(IV) \approx Cr(III) > Pb > Zn$. Sin embargo, hay dos factores que minimizan el efecto tóxico de estos metales o, mejor dicho, permiten que las bacterias toleren mayores concentraciones: por un lado, la aclimatación de las bacterias a ellos, en el caso que sean introducidos en forma gradual; y por otro, la presencia de sulfuros y carbonatos en el medio, los cuales forman precipitados con los metales y reducen así, la biodisponibilidad de estos inhibidores en la solución. Cabe aclarar, que la solubilidad de los metales aumenta a medida que desciende el pH,

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



por lo tanto a pH bajos la formación del precipitado no se favorece, y el efecto tóxico de los metales no se reduce. En el caso de los residuos porcinos, el Cu y el Zn son los metales más frecuentes ya que son introducidos en la dieta en carácter de suplementos. El Cu es inhibidor a partir de 40 mg/L y el Zn lo es a partir de 400 mg/L. Ambos son tóxicos a partir de 70 mg/L y 600 mg/L respectivamente. (Hayes y Theis ,1978).

Otros cationes como el potasio, sodio, calcio y magnesio resultan inhibidores cuando se encuentran a altas concentraciones. La concentración de inhibición depende, en gran parte, de la presencia de antagonistas, es decir, de otros iones que provocan una reducción en la toxicidad de aquellos. Así, el potasio es antagonista del sodio, del magnesio y del calcio; el sodio, del potasio, del calcio y del magnesio y; el calcio y el magnesio lo son del potasio. (Kugelman y Chin, 1971)^{xiii}. Otro inhibidor importante es el ión cianuro, el cual es altamente tóxico para las bacterias metanogénicas, aunque pueden soportar concentraciones superiores si están aclimatadas.

Antibióticos

Los antibióticos se agregan a las dietas de los animales o son aplicados directamente a ellos con el objetivo de controlar enfermedades y mejorar la producción. Estas sustancias son eliminadas a través de las excretas modificando las características biológicas de éstas; por lo cual, cuando son tratadas por medio de la biodigestión anaeróbica, inhiben la actividad biológica del proceso. Según Massé *et al.* (2000)^{xiv} la penicilina y la tetraciclina, utilizados en la cría de cerdos, tienen un efecto inhibitorio sobre el proceso, aunque las bacterias parecen presentar una buena aclimatación a ellos. Hilpert *et al.* (1987)^{xv} encontraron que los antibióticos, monensina y lasalocid, también inhiben el proceso, aunque el segundo precisa una concentración muy alta. Sin embargo, muchos antibióticos no han mostrado ningún efecto sobre el proceso, como flavomicina y bacitracina (Hilpert *et al.*, 1987) y tilosina, lincomisina, sulfametazina, y carbadox (Massé *et al.*, 2000).

Detergentes

Los restos de detergentes, procedentes de la limpieza y desinfección de las granjas pueden resultar tóxicos para las bacterias anaeróbicas y la magnitud del efecto depende básicamente de la concentración, de la biodegradabilidad de los mismos y del tiempo transcurrido desde su utilización hasta la entrada del residuo al biodigestor. Los surfactan-

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



tes, agentes activos de los detergentes, están compuestos generalmente por Alquilbenzen sulfonatos (ABS), detergentes no biodegradables, o de Alquilbenzen sulfonatos lineales (LAS), detergentes biodegradables. Sin embargo, los LAS son biodegradables en condiciones aeróbicas pero en mínima proporción en condiciones anaeróbicas. Así, tanto los LAS como los ABS provocan inhibición del proceso. Según Hilper *et al.* (1982)^{xvi}, los detergentes son mucho más activos que los antibióticos, pudiendo provocar una disminución en la producción de biogás hasta del 90% a bajas concentraciones.

Oxígeno

Entre los inhibidores que pueden ingresar al biodigestor en forma accidental, el más frecuente es el oxígeno y la causa es el defecto de estanqueidad del sistema. Esta situación se trata de evitar haciendo trabajar al biodigestor a una sobrepresión de 10 a 20 cm columna de agua. Una vez detectado y solucionado el problema, la magnitud del efecto inhibitorio puede reducirse rápidamente, ya que el oxígeno es agotado por los microorganismos aeróbicos que proliferan luego de su ingreso.

Ácidos Grasos Volátiles

Éstos se generan en mayor proporción durante la etapa fermentativa. Como ya se ha dicho, estos se comportan como inhibidores del proceso cuando se produce una acumulación excesiva de los mismos, que conlleva a la acidificación del medio y, en consecuencia, una disminución de la producción de biogás. Conocer su evolución, permite detectar rápidamente problemas de sobrecargas o de inhibición por algún otro tóxico, ya que muestran un rápido incremento antes variaciones en el medio. (Ahring *et al.*, 1995)^{xvii}. A pH cercanos al óptimo, la totalidad de los ácidos se encuentran disociados y su efecto inhibitor es reducido. Esto se debe a que las membranas celulares de las bacterias son relativamente impermeables al paso de iones, pero el ácido no disociado las atraviesa, se disocia en el interior celular y modifica el pH interno perjudicando así, el metabolismo bacteriano. El ácido propiónico es el primero que afecta al proceso, mientras que el butírico y el acético provocan la inhibición a mayores concentraciones.

Según el INTA (INTA, 2003)^{xviii}, concentraciones de AGV más de 2000 mg/L en el rango mesofílico y de 3600 mg/L en el rango termofílico inhiben la producción de biogás.

Nitrógeno Amoniaco

El amoníaco se produce durante la hidrólisis de las proteínas, y normalmente se combina con dióxido de carbono para formar bicarbonato de amonio; sal constituyente del buffer del proceso y además, fuente de nitrógeno esencial para el crecimiento bacteriano.

Sin embargo, una concentración excesivamente alta de amoníaco limita el crecimiento de las bacterias, siendo las metanogénicas las más afectadas. El efecto inhibitor del amoníaco depende de su concentración, la temperatura y del pH, ya que influyen en el equilibrio amonio-amoníaco, siendo este último el causante de la inhibición por ser más permeable a la membrana celular.

Como ya se mencionó, la biodigestión de materias primas con relaciones C/N inferiores al rango óptimo, liberan altas concentraciones de amoníaco al medio que favorecen la inhibición del proceso. Por otro lado, el efecto inhibitor del amoníaco es mayor en el rango termofílico que en el mesofílico por el aumento de su concentración al aumentar la temperatura y a la mayor sensibilidad de las bacterias termofílicas al amoníaco libre. Con respecto al pH, el efecto tóxico se ve favorecido a pH superiores a 8, que desplazan el equilibrio hacia la formación de amoníaco. (Angelidaki y Ahring, 1994)^{xix}

Los límites de inhibición varían según la temperatura de trabajo, y existe una gran dispersión en la bibliografía respecto a este tema. El nivel de amoníaco debe mantenerse por debajo de los 2000 mg NH₃/L para un correcto funcionamiento de los biodigestores. (INTA, 1983)^{xx},

Hidrógeno gaseoso

Se produce durante la etapa fermentativa y acetogénica. Como se vio anteriormente, su acumulación en el medio, provoca la inhibición de las bacterias acetogénicas, y consecuentemente, la acumulación de AGV.

Las reacciones bioquímicas de la etapa acetogénica son termodinámicamente favorables a ciertas presiones de este gas. La oxidación del ácido propiónico a acetato solo es posible cuando la presión parcial de hidrógeno se reduce a 10⁻⁴ atm. En cuanto al butírico, su oxidación es favorable a una presión de 10⁻³ atm.

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



Acido sulfhídrico

Se produce a partir de la reducción microbiológica de sulfatos presentes en el medio, originados en la hidrólisis de las proteínas o, también, provenientes del agua utilizada para diluir el sustrato. La forma tóxica es la no ionizada SH_2 ($\text{pK}_{a1}=7,02$ y $\text{pK}_{a2}=13,88$ a 25°C), ya que puede atravesar la membrana celular, y se ve favorecida a pH bajos y a bajas temperaturas debido a la mayor solubilidad de esta sustancia en la fase líquida. Así, en el rango termofílico la toxicidad de este compuesto desciende debido a la transferencia líquido-gas, que lo hace menos disponible para las bacterias.

Ciertas cantidades de azufre son necesarias para el crecimiento bacteriano, pero los efectos de inhibición comienzan notarse a partir de $200 \text{ mg SH}_2/\text{L}$ (INTA, 1983), con un pH en el medio menor a 6,5.

A continuación, en Tabla 11 se muestran valores de concentraciones de los inhibidores más comunes.

Tabla 11. INHIBIDORES DEL PROCESO ANAERÓBICO	CONCENTRACIÓN INHIBITORIA (mg/L)
Sulfatos	5000
Cloruro de Sodio	40000
Nitrato (según contenido de nitrógeno)	50
Cobre	100
Cromo	200
Níquel	200 - 500
Cianuro	25*
Detergente sintético (ABS)	20 - 40
Sodio	3500 – 5500
Potasio	2500 – 4500
Calcio	2500 – 4500
Magnesio	1000 – 1500

*Concentración de inhibición cuando las bacterias metanogénicas ya se han aclimatado a 2-10 mg/L

Fuente: Adaptación propia del Manual para la producción de Biogás (2003). Hilbert J. INTA-Castelar

7.3.3. Parámetros relacionados con la operación del proceso

7.3.3.1. Agitación

La agitación del medio durante el proceso anaeróbico es una operación que resulta muy favorable, ya que acelera el inicio de la producción de metano debido principalmente al mayor contacto que se obtiene entre el sustrato y las bacterias. A continuación se mencionan otros objetivos que se buscan con esta operación:

- Remover los productos de la actividad metanogénica ya que favorece la salida de gases.
- Uniformar la densidad bacteriana en el medio y así, evitar la formación de espacios sin actividad biológica que reducirían el volumen efectivo del biodigestor.
- Evitar la formación de espumas y capas superficiales como así también la sedimentación.
- Evitar la formación de caminos preferenciales para impedir que parte del sustrato abandone el biodigestor sin haberse degradado lo suficiente
- Eliminar la estratificación térmica y así, mantener una temperatura uniforme en todo el biodigestor.

Sin embargo, una agitación demasiado intensa puede romper los flóculos o agregados bacterianos que son los que fomentan la colonización de todo el sustrato, conllevando a una merma en la producción de biogás. La velocidad de agitación óptima es la que permite una buena homogeneización del sustrato y una correcta formación de estos agregados. Según Stafford (1982)^{xxi}, una velocidad alta, por encima de 700 rpm, puede ocasionar perturbaciones en el proceso.

La agitación puede ser de varios tipos:

- Mecánica, mediante dispositivos mecánicos sumergidos como hélices, paletas o tornillos de Arquímedes.
- Hidráulica, mediante la recirculación del efluente por bombeo

- Neumática, mediante la inyección de biogás comprimido dentro de la cámara produciendo burbujeo.

Para biodigestores que operan en el rango mesofílico de temperaturas, se requiere una leve agitación, siendo suficiente un movimiento intermitente realizado por algún dispositivo mecánico manual o automático.

En el caso de trabajar en el rango termofílico, la agitación debe ser continua para mantener una temperatura uniforme en todo el biodigestor. Esto se logra mediante la agitación mecánica por paletas, recirculación del efluente por bombeo o la inyección de biogás desde la parte superior hacia el fondo del biodigestor.

Según Muñoz Valero *et al.* (1987)^{xxii}, para biodigestores de gran tamaño la agitación neumática es la que presenta mayores ventajas, tanto por su efecto de mezclado, como por su sencillez de diseño y operación.

Por otro lado, algunos tipos de biodigestores pueden funcionar bien sin ningún sistema agitación, basándose solamente en el arrastre de partículas de materia a medida que asciende el biogás. Estos diseños resultan adecuados para sustratos con un elevado contenido en sólidos o sustratos básicamente solubles con regímenes de flujo tipo pistón.

7.3.3.2. Utilización de inóculos

El crecimiento de las bacterias dentro de un biodigestor sigue tres etapas bien definidas: el arranque, luego la estabilización y finalmente la declinación (FIGURA 11).

Se conoce como inóculo al material que contiene una carga bacteriana suficientemente grande y en plena actividad, que sirve para acelerar el proceso de degradación de una porción mucho mayor de materia orgánica. En el caso del proceso anaeróbico, la utilización de inóculos es necesario para acelerar la etapa de arranque del biodigestor, y así, adelantar el inicio de producción de biogás (etapa de estabilización). Esto es particularmente importante en los biodigestores discontinuos que deben ser arrancados frecuentemente.

La efectividad de un inóculo depende básicamente de su naturaleza y de la proporción añadida al sustrato a degradar.

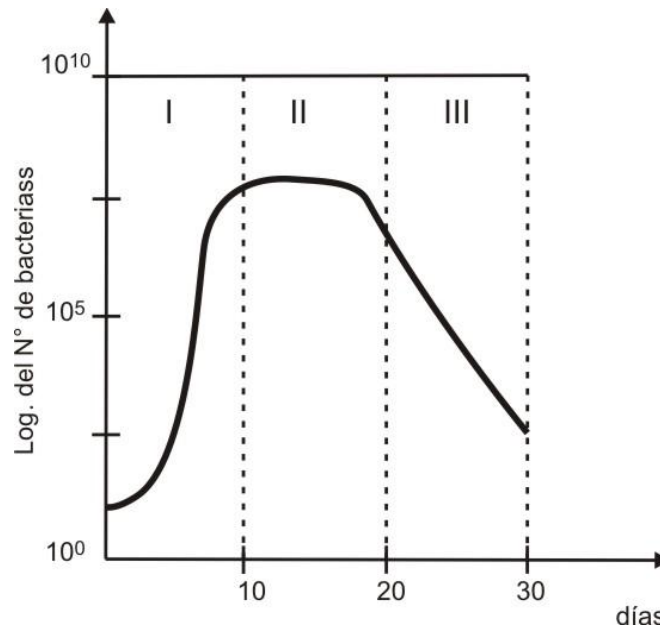


FIGURA 11. Etapas del crecimiento bacteriano. I) Arranque II) Estabilización III) Declinación

Fuente: *Adaptación propia de Generación de Energía-Biogás. GEEAA-FI-UNMDP.*

Según su naturaleza, el inóculo apropiado es aquel que posee una alta capacidad para aclimatarse a las condiciones del nuevo medio, una alta capacidad de amortiguamiento de pH y la ausencia de cualquier sustancia inhibidora. Usualmente, se recurre al empleo de lodos procedentes de otros biodigestores que se encuentren ya estabilizados. Otras fuentes de inóculo alternativas que poseen características similares son los lodos activados, los lodos provenientes de fosas sépticas, estiércol de vaca, estiércol de cerdo, sedimentos de lagunas y lodos de lagunas anaeróbicas. Cabe destacar, que la aclimatación del inóculo será más rápida si proviene del mismo material que se va a tratar.

Con respecto a la proporción utilizada, ciertamente cuanto mayor es, menor es el tiempo de arranque de un biodigestor. Sin embargo, esto significa una limitación cuando se trabaja a grandes escalas. Por lo tanto, resulta necesario conocer el porcentaje de inóculo óptimo, es decir, el mayor porcentaje posible sin comprometer la factibilidad de la escala de trabajo. En la bibliografía, los porcentajes de inoculación utilizados en procesos de

digestión anaerobia con alto contenido en sólidos suelen oscilar entre 10 y 50% (Hachimoto, 1989)^{xxiii}.

En la FIGURA 12, se muestra la producción de biogás por cada kg. de estiércol en función del TRH para distintos porcentajes de inóculo agregado.

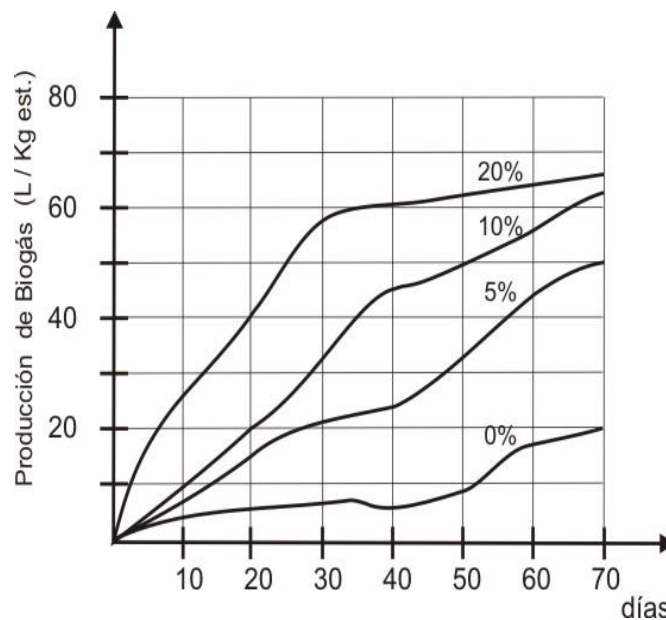


FIGURA 12. Velocidad de producción de biogás para distintos porcentajes de inóculo. Fuente: Adaptación propia de Generación de Energía-Biogás. GEEAA-FI-UNMDP.

7.3.3.3. Velocidad de carga volumétrica y Tiempo de retención hidráulica

Ambos son parámetros de diseño de biodigestores.

La velocidad de carga volumétrica se define como el volumen de sustrato que se carga diariamente al biodigestor y es expresada normalmente con las siguientes unidades:

- Kg de materia/día
- Kg de ST/día
- Kg de Sólidos Volátiles SV/día

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
**“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”**



Todas expresadas por m^3 del biodigestor. El contenido de SV de un sustrato indica la cantidad materia orgánica biodegradable y se determina aplicando el método analítico de SV a una muestra⁵.

La importancia de este parámetro se debe a que determina la capacidad de tratamiento de un biodigestor de un volumen determinado y tiene una relación de tipo inversa con el TRH, dado que a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de retención.

El TRH se define como el tiempo conveniente que debe dejarse el sustrato dentro del biodigestor para que, por medio del proceso biológico, el contenido inicial de sólidos volátiles se reduzca hasta que se logre la estabilización del sustrato. Este parámetro se expresa normalmente en días.

En los *sistemas discontinuos o de tipo batch*, los cuales se desarrollaran más adelante, el TRH coincide con el tiempo de permanencia del sustrato dentro del biodigestor antes de vaciar el mismo. Por otro lado, en los *sistemas continuos*, el TRH se define como el cociente entre el volumen del biodigestor y la velocidad de carga volumétrica.

Además, el TRH depende de tipo de materia prima a tratar y de la temperatura de trabajo. Cuanto mayor sea la temperatura elegida menores serán los TRH requeridos y consecuentemente menor será el volumen del biodigestor necesario para digerir un determinado volumen de sustrato por día. Sin embargo, el mínimo del TRH se alcanza a temperaturas alrededor de los $55^{\circ}C$, para luego volver a aumentar, junto con la temperatura, hasta el cese de la actividad biológica (Figura 13).

La relación con la materia prima se debe a que cuanto mayor es el contenido de moléculas carbonadas resistentes como la celulosa, la degradación completa demandará mayores TRH. A continuación, en la Figura 14, se muestra la variación de producción de biogás en función del TRH para materias primas con distintos porcentajes de celulosa.

⁵ Standard Methods 2540 E. Sólidos fijos y volátiles por ignición a $550^{\circ}C$

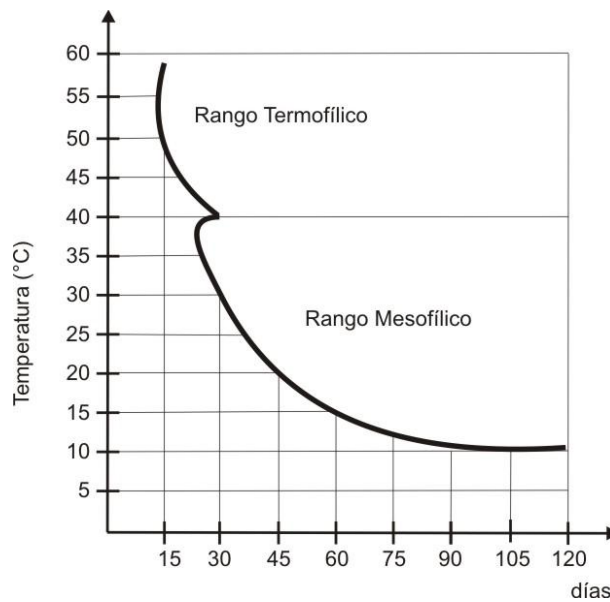


FIGURA 13. Efectos de la temperatura sobre el Tiempo de Retención Hidráulica. Fuente: Adaptación propia de El camino de la biodigestión. Ambiente y tecnología socialmente aprobada (2001). Gropelli E., Giampaoli O. Universidad Nacional del Litoral.

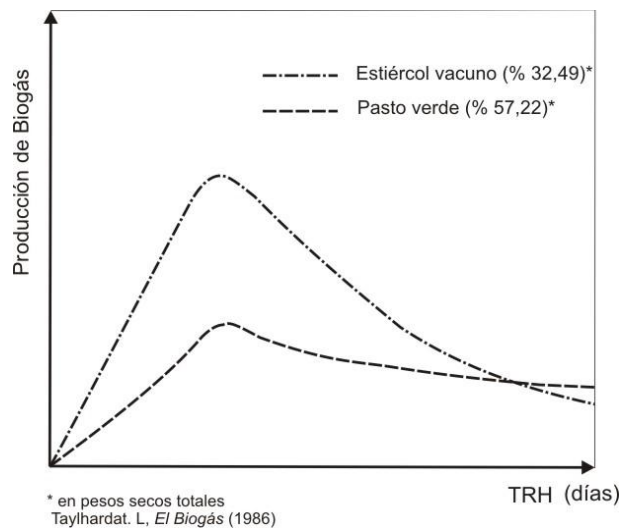


FIGURA 14. Producción de biogás en función del TRH para distintas materias primas. Fuente: Adaptación propia del Manual para la producción de Biogás (2003). Hilbert J. INTA-Castelar

El TRH mínimo está dado por la tasa de reproducción de las bacterias metanogénicas debido a que la salida continua del efluente del biodigestor arrastra dichos microorganismos. Si el TRH es muy corto, éstos no permanecen el tiempo suficiente en contacto con el sustrato y, por lo tanto, no degradan toda la materia orgánica presente, obteniéndose bajos rendimientos de biogás.

Con respecto al máximo, está claro que la fracción de materia orgánica degradada aumenta al aumentar el TRH, sin embargo la producción de metano disminuye una vez superado el óptimo. Es por tanto necesario determinar el tiempo de retención que optimiza el proceso según el tipo de sustrato y la temperatura de trabajo elegida.

En la Tabla 12, se observa los valores de TRH más utilizados en la biodigestión de estiércoles a temperatura mesofílica.

Tabla 12. TIEMPO DE RETENCION HIDRAULICA PARA DISTINTOS SUSTRATOS GANADEROS	TRH (días)
Estiércol porcino líquido	15 – 25
Estiércol vacuno líquido	20 – 30
Estiércol aviar líquido	20 – 40

Fuente: Adaptación propia del Manual para la producción de Biogás (2003). Hilbert J.. INTA-Castelar

7.4. Productos finales del tratamiento biológico anaeróbico

7.4.1. Biogás

El biogás, como ya se mencionó anteriormente, es una mezcla gaseosa cuyos principales componentes son el metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2). El metano es un gas combustible, incoloro e inodoro. La combustión de este gas produce una llama azul y productos no contaminantes, principalmente agua y dióxido de carbono.

La composición del biogás depende del tipo de materia prima utilizada y de las condiciones del proceso. Su composición promedio se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. COMPOSICIÓN PROMEDIO DEL BIOGAS	
Metano	55-65%
Dióxido de carbono	34-45%
Nitrógeno	0-3%
Hidrógeno	0-1%
Acido Sulfhídrico	0-1%

Fuente: De Gouveia et al., 1988^{xxiv}

El biogás, por su alto contenido de metano, es una fuente de energía que puede ser utilizado para los mismos fines que se utiliza el gas natural o envasado. Su valor energético se encuentra entre 20-25 MJ/m³ mientras que el del gas natural se ubica entre 33-38 MJ/m³.

A continuación, en la Figura 15 se muestra las posibles aplicaciones del biogás como fuente de energía.

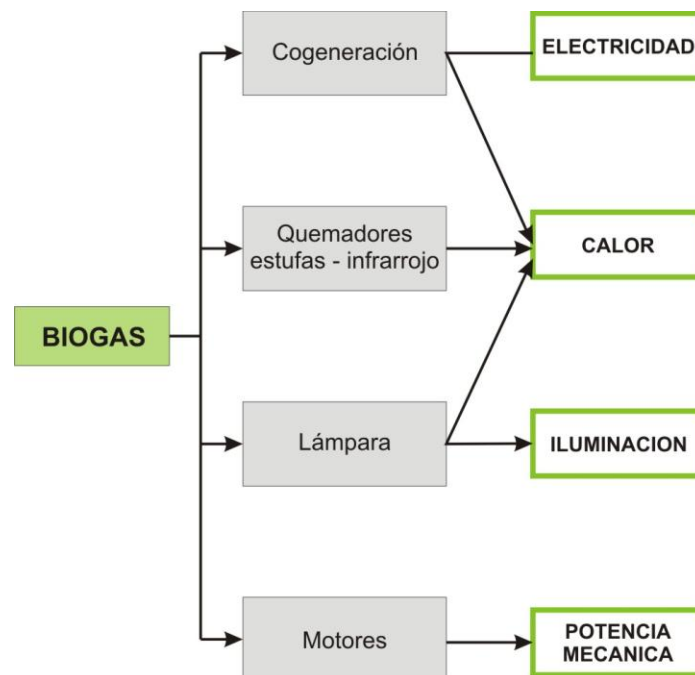


FIGURA 15. Usos posibles del biogás como fuente de energía. Fuente: J. Hilbert, "Manual para la producción de biogás", INTA, 2003.

7.4.2. Efluente

El efluente obtenido del tratamiento biológico anaeróbico es una fuente importante de nutrientes. La calidad química y biológica del mismo depende de la materia prima utilizada, del TRH y de las condiciones ambientales del proceso. Si se encuentra en forma sólida o semisólida es llamado lodo.

Los contenidos de fósforo y potasio presente en la materia prima se mantienen en el efluente luego de la biodigestión anaeróbica. Con respecto al nitrógeno, un porcentaje no significativo pasa a formar parte del biogás (Tabla 13), y el resto permanece en el efluente, presentando así una relación C/N considerablemente menor que la materia prima, por efecto de la producción de metano.

En comparación con el *afluente*, la viscosidad del efluente es menor producto de la reducción de sólidos volátiles durante el proceso anaeróbico, alrededor de un 50% de éstos son degradados. (INTA, 2003). Esto significa que el efluente presenta un mayor grado de estabilización química, con la consecuente minimización de olores. Además, su pH tiende a ser ligeramente alcalino, alrededor de 7,5.

Por sus características de estabilización y su alto contenido en nutrientes, el efluente puede ser utilizado directamente como mejorador de suelos. No obstante, sus características biológicas tienden a limitar su uso debido a que la higienización del residuo no siempre se asegura con el proceso de biodigestión, y esto depende de las temperaturas de trabajo y los tiempos de retención del proceso.

8. TECNOLOGIA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO ANAERÓBICO

8.1. Biodigestores

Un biodigestor es un diseño ingenieril que consiste en un contenedor cerrado, hermético e impermeable dentro del cual se deposita el material orgánico a digerir en determinada proporción con agua, para que a través del proceso biológico anaeróbico se obtengan como productos finales biogás y un efluente, en forma de lodo, reducido en sólidos volátiles y, por ende, más estable.

8.1.1. Componentes principales

Seguidamente, se describen los componentes principales de un biodigestor de funcionamiento continuo:

8.1.1.1. Cámara de carga

Es el recipiente en el cual se prepara la mezcla homogénea de materia prima/agua, en determinadas proporciones, que va a ser introducida en la cámara de digestión. Para ello cuenta con un sistema de alimentación de agua para realizar las diluciones y algún mecanismo de agitación para homogeneizar la carga. Esta cámara puede tener distintas formas o tamaños según el diseño del biodigestor adoptado. Según el INTA (INTA, 2003), debe tener una capacidad equivalente al volumen de dos días de carga.

El agua agregada puede ser precalentada, para evitar un choque térmico dentro de la cámara de digestión, y además favorecer a la homogenización de la mezcla y a la velocidad de degradación.

8.1.1.2. Conducto de carga

Es el que comunica la cámara de carga con la cámara de digestión. La materia prima ya diluida y homogeneizada, circula por acción de la gravedad debido a que la cámara de carga está ubicada por encima del nivel del sustrato de la cámara de digestión. En el caso de biodigestores de gran tamaño, la mezcla se introduce por bombeo.

Es conveniente que este conducto sea recto, sin curvas que puedan producir obstrucciones en el ingreso, y que permita también una fácil limpieza. Para su construcción, se suelen utilizar caños de fibrocemento o de PVC (Policloruro de Vinilo) reforzados, de diámetros entre 160 y 300 mm, según sea el caudal de carga que se desea. (Groppelli y Giampaoli, 2001).

8.1.1.3. Cámara de digestión

Es el recinto donde se lleva a cabo el proceso biológico anaeróbico de la materia prima cargada. Independientemente del diseño del biodigestor, la cámara de digestión debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- *Impermeabilidad al gas y al agua*, para evitar que la fracción líquida del sustrato alcance las aguas freáticas y las contamine, y también, evitar pérdidas de biogás que disminuyan la eficiencia y seguridad de todo el sistema, ya que significarían un riesgo de explosiones en las cercanías del biodigestor.
- *Aislación térmica*, para mantener la temperatura de digestión y evitar posibles variaciones. Además, obtener máximos rendimientos energéticos en caso de biodigestores que trabajan a temperaturas mesofílicas y termofílicas.
- *Mínima relación superficie/volumen*, a fin de economizar costos de material y mano de obra, así como también reducir la superficie de intercambio de calor.
- *Estabilidad estructural*, capaz de soportar cargas estáticas y dinámicas. Los materiales de construcción más empleados son el hierro, cemento armado, mampostería y plásticos tales como PVC, PU (Poliuretano), PRFV (Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio) y polietileno de alta densidad.

8.1.1.4. Conducto de descarga

Es el que comunica la cámara de digestión con la cámara de descarga, posibilitando la extracción del material estabilizado (efluente) que ya ha cumplido con el TRH determinado. El movimiento del efluente puede ser por principio de vasos comunicantes o, en el caso de biodigestores de gran tamaño, por bombeo. El movimiento por medio de aquél

principio significa que al ingresar una cantidad determinada de mezcla a digerir, se descarga simultáneamente un volumen igual de efluente.

Para su construcción, se suelen utilizar las mismas consideraciones mencionadas para el conducto de carga.

8.1.1.5. Cámara de descarga

Es el recipiente en el cual se deposita el efluente obtenido del proceso. Esta cámara puede tener distintas formas o tamaños según el diseño del biodigestor adoptado. Como mínimo deberá tener un volumen 2 a 3 veces superior al volumen de descarga diaria. (INTA, 2003)

8.1.1.6. Gasómetro

Es el recinto o cámara donde se almacena el biogás generado que no es utilizado inmediatamente. El volumen del gasómetro depende del consumo diario y generalmente se diseña de volumen no menor al 50% de la producción diaria de biogás. Puede estar incorporado al biodigestor oficiando como cubierta superior o separado del mismo. La presión adecuada para la circulación de biogás es de 35cm de columna de agua (CA⁶), presión a la cual funcionan correctamente los artefactos domésticos. Existen distintos tipos de gasómetros, que se describirán más adelante, de los cuales ninguno supera como presión máxima de trabajo los 100 cm de CA (INTA, 2003).

8.1.1.7. Agitador

Como ya se mencionó en el inciso 7.3.3.1, la mayoría de los procesos de biodigestión requieren de agitadores para lograr un mayor rendimiento, y el agitador más conveniente depende del diseño del biodigestor y del tipo de sustrato a degradar. A continuación se muestran imágenes de algunos agitadores mecánicos, de hélice y paleta, que ya se encuentran instalados dentro de biodigestores.

⁶ 1 cm CA = 0,001 Kg/cm²



IMAGEN 4. Agitadores de tipo mecánico instalados en biodigestores. *Fuente: Gabriel Moncayo Romero, "Manejo ecológicamente compatible de las cuencas del Tungurahua" Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.*

8.1.2. Accesorios

Los accesorios principales de una instalación de biodigestión están involucrados en la conducción y acondicionamiento del biogás, previo al consumo. Las técnicas de acondicionamiento aseguran un permanente y buen funcionamiento de los equipos de la línea de consumo, y dentro de las principales se pueden citar el secado del biogás y la eliminación del ácido sulfhídrico.

8.1.2.1. Válvula de salida de biogás

Es la llave que comunica la salida de biogás con la red de distribución para consumo. También es llamada válvula de seguridad, ya que permite cerrar el paso de biogás a esta red, en caso de detectar alguna pérdida. Se debe colocar lo más cerca posible del gasómetro, y si hay bifurcaciones desde la línea central de conducción de biogás, se recomienda colocar otras válvulas de paso al inicio de éstas para evitar el cierre generalizado ante operaciones de mantenimiento o reparación. Se recomienda que todas las llaves empleadas sean de un material resistente a la corrosión, debido a la presencia de vapor de agua y ácido sulfhídrico en la composición del biogás.

8.1.2.2. Trampa de agua

Este dispositivo es utilizado para lograr el secado del biogás. Este gas, como ya se dijo, se encuentra saturado de vapor de agua y a medida que se enfría, el vapor se condensa en las cañerías, dificultando, y en ocasiones impidiendo, el flujo normal del biogás. Para evitar este inconveniente, se utilizan trampas de aguas que consisten en recipientes instaladas en la cota mínima de la red de distribución a donde convergen las cañerías, colocadas con una pendiente mínima del 1%. A continuación, en la Figura 16 se muestra algunos de los diseños más utilizados.

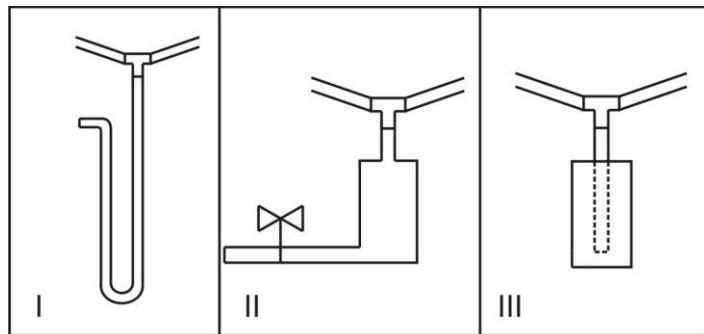


FIGURA 16. Distintos diseños de trampas de agua utilizados en la red de distribución de biogás. I) Trampa de agua en U. II) Trampa de agua con válvula. III) Trampa de agua tipo botella. Fuente: Elaboración Propia.



IMAGEN 5. Trampa de agua en U. Fuente: "Manual de instalación de un biodigestor familiar tipo manga para zonas alto-andinas". Universidad Politécnica de Cataluña.

La IMAGEN 5 muestra una trampa de agua en U enterrada. Se debe controlar que siempre este llena de agua, para evitar la salida de biogás. La IMAGEN 6, muestra una trampa de agua tipo botella. El recipiente se mantiene con un nivel constante de agua, formando un sello hidráulico con la cañería sumergida. Posee dos orificios: uno en la parte superior para ir llenándola y otro en la parte lateral, por donde drena el agua afuera de la trampa, manteniendo así el nivel de agua en la botella.

En ambos casos, el nivel del agua se debe controlar en épocas de evaporación para evitar que el biogás se escape por ausencia de agua. En el caso de la trampa con válvula, se deben revisar cada 2 o 3 días para dejar salir el agua.



IMAGEN 6. Trampa de agua tipo botella. Fuente: Jaime Martí Herrero, “Biodigestores familiares. Guía de diseño y manual de instalación”. Cooperación técnica Alemana (GTZ). Programa de Desarrollo Agropecuario (PROAGRO).

8.1.2.3. Filtro de Acido Sulfhídrico (SH₂)

Este dispositivo es utilizado para retener el ácido sulfhídrico presente en el biogás. Este componente es altamente corrosivo para los equipos con partes metálicas, tales como los motores de combustión interna alimentados con biogás para generar energía eléctrica.

Para eliminarlo, se instala un filtro en serie con la conducción de biogás que consiste en un tubo hermético que se rellena con partes iguales de viruta de hierro oxidada (hidróxido de hierro) y viruta de madera, que retiene la humedad dentro del tubo. Cuando el biogás pasa lentamente por este dispositivo, reacciona con el hierro formando sulfuro de hierro.

Esta reacción es reversible y el hidróxido de hierro es formando nuevamente exponiendo la viruta al aire como muestran las reacciones químicas intervinientes:



FIGURA 17. Reacciones químicas de eliminación de ácido sulfhídrico. *Fuente: Manual para la producción de biogás (2003). Hilbert J. INTA-Castelar*



IMAGEN 7. Pequeños objetos de hierro oxidado, utilizados en la eliminación del ácido sulfhídrico. *Fuente: Torres Guillén, D. y Arteaga Chávez, L. "Desarrollo de un Sistema de Biodigestores y Energías Limpias". Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Lima, Perú.*

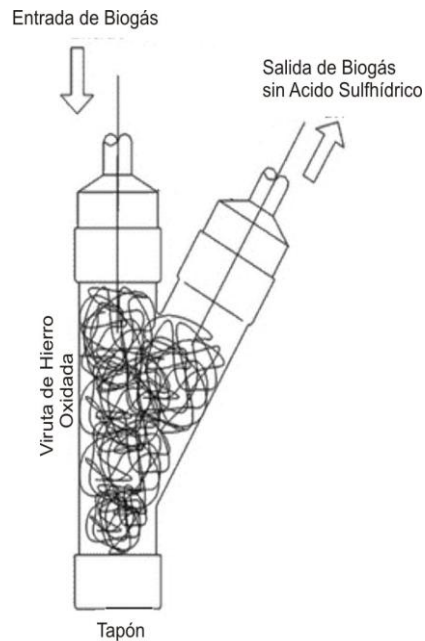


FIGURA 18. Filtro de ácido sulfhídrico para acondicionamiento del biogás. Fuente: José Antonio Guardado Chacón “Tecnología del biogás”. Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba.

8.1.2.4. Manómetro

Este instrumento debe conectarse para conocer la presión dentro del biodigestor y en la red de distribución de biogás y así, mejorar la eficiencia de los equipos conectados a la línea como también detectar posibles fugas de este gas. Existen varios tipos de manómetros. El manómetro de agua en forma de U es de fácil construcción y se muestra en imagen de la derecha.

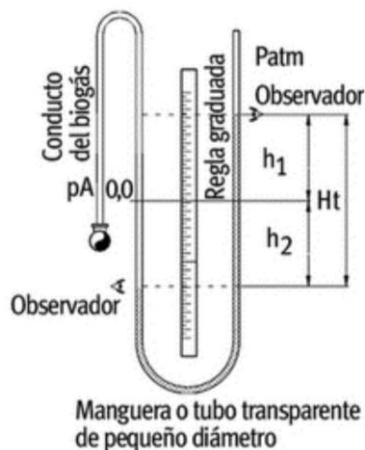


IMAGEN 8. Manómetro de agua en forma de U. Fuente: José Antonio Guardado Chacón “Tecnología del biogás”. Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba.

8.1.3. Clasificación de los biodigestores

La elección de la tecnología más conveniente dependerá de los objetivos del tratamiento, de las características de la materia prima a tratar, de las restricciones legales, técnicas y del medio físico natural, y de la relación costo de inversión-beneficios.

Los biodigestores se pueden clasificar según los siguientes criterios de operación:

Tabla 14. CLASIFICACION DE BIODIGESTORES SEGÚN CRITERIOS DE OPERACIÓN	
CRITERIO	DENOMINACION
Tipo de alimentación	Continuos
	Semicontinuos
	Discontinuos
Forma Geométrica de la Cámara de Digestión	Cilíndricos, Verticales u Horizontales
	Esféricos
	Ovoides o tipo Balón
	Paralelepípedos, Verticales u Horizontales
Intensidad de mezcla	De Mezcla Completa
	De Mezcla Parcial
	De Mezcla Lenta
Manejo del sustrato	Contacto Anaeróbico
	U.A.S.B ⁷
	Lecho Fluidizado
Número de fases	Filtro Anaeróbico
Tipo del Gasómetro	De una Fase
	De dos Fases
	Cerrados
	Con Campana Flotante
Posición respecto de la superficie del terreno	Con Campana Fija
	Con Gasómetros de Plásticos Inflables
	Subterráneos
	Semienterrados
	Superficiales

⁷ Manto de lodo anaeróbico en flujo ascendente, en inglés Upflow Anaerobic Sludge Blanket

8.1.3.1. Tipo de alimentación

De acuerdo a la frecuencia de alimentación y a la necesidad de descarga total o parcial del sustrato digerido, los biodigestores se pueden clasificar en continuos, semicontinuos y discontinuos, los cuales se describen a continuación:

Biodigestores Continuos

La biodigestión de la materia prima se desarrolla de manera ininterrumpida, ya que éstos son cargados diariamente y la producción de biogás es uniforme en el tiempo. El volumen de efluente que se descarga es igual al del afluente, debido al desplazamiento volumétrico propio de un sistema de vasos comunicantes, por lo que el volumen del sustrato en la cámara de digestión se mantiene constante.

Este tipo de biodigestores se emplea cuando la materia prima disponible es abundante y su generación es continuada en el tiempo. Una característica importante es la alta dilución de la carga, que en general es de 3 a 5 veces agua/materia prima y, además, su manejo es relativamente fácil, lo que puede llegar a no requerir mano de obra en la operación. En general, son utilizados en escalas medianas (entre 6 y 15m³) y grandes (mayor a 15m³).

Biodigestores Semicontinuos

Estos biodigestores se emplean cuando la generación de la materia prima es variable en el tiempo, por lo que se cargan de forma intermitente. El periodo de carga del afluente es dominado por el rendimiento en la producción de gas. Se realiza una primera carga y conforme disminuya el rendimiento de generación de gas, se va agregando nueva materia prima, descargando el efluente en igual volumen.

Biodigestores Discontinuos

También conocidos como sistemas *Batch*. Estos tipos de biodigestores se cargan una sola vez, y cuando el rendimiento de producción de biogás decae a un nivel ineficiente, se vacían en forma total y se alimentan nuevamente. Este sistema se utiliza cuando la materia prima a tratar tiene una disponibilidad intermitente o cuando se desean tratar materiales orgánicos celulósicos, que no pueden ser tratados en los biodigestores de tipo continuo debido al posible taponamiento de los conductos de entrada y salida (Figura 19). También es ideal para uso en laboratorios, cuando se requiere estudiar los parámetros del proceso de biodigestión de una materia prima específica. Son de simple construcción y fácil operación.

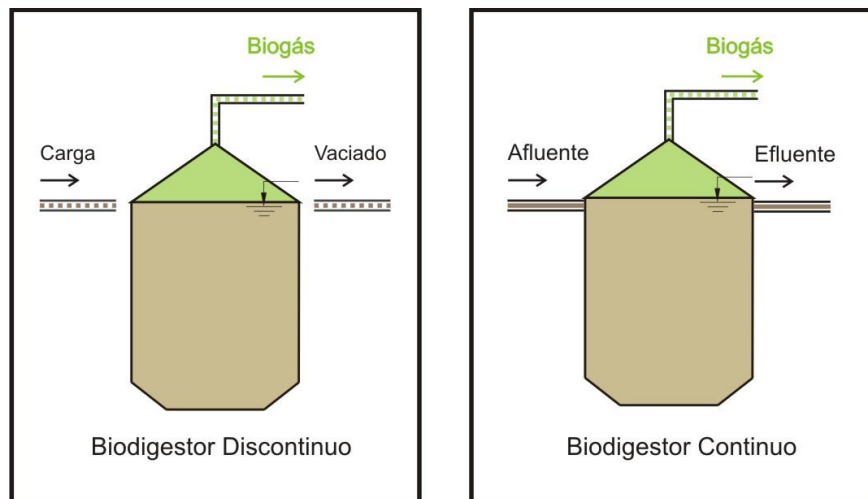


FIGURA 19. Tipos de biodigestores según el tipo de alimentación. *Fuente: Elaboración Propia.*

En el caso de pretender una producción de biogás uniforme en el tiempo, se recurre a la construcción de un sistema en paralelo de al menos tres o cuatro biodigestores de este tipo, operando en las distintas etapas. En la Figura 20, se muestra la producción de biogás en función del tiempo de un sistema de 4 biodigestores discontinuos en paralelo.

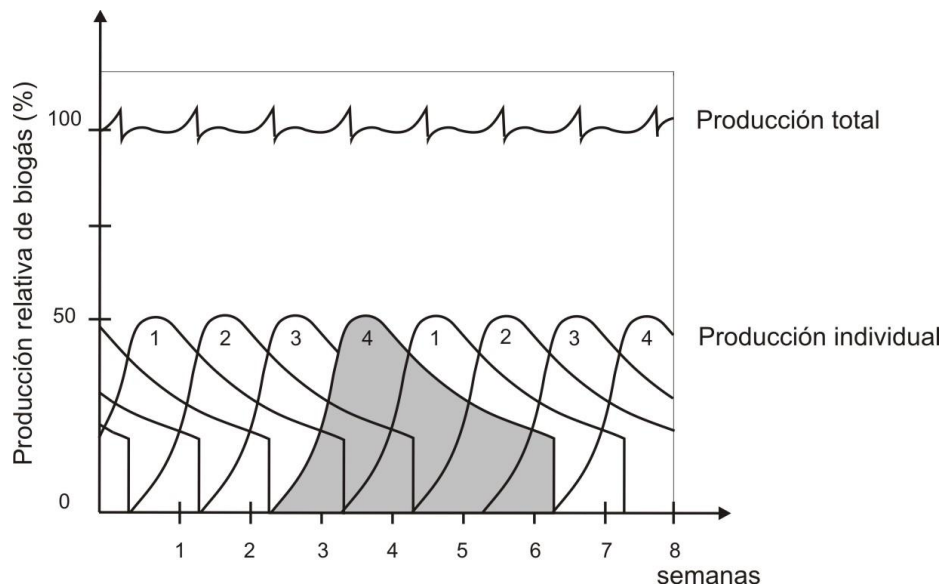


FIGURA 20. Producción de biogás de un sistema en paralelo de biodigestores discontinuos. *Fuente: Adaptación propia del Manual para la producción de Biogás (2003). Hilbert J. INTA-Castelar*

8.1.3.2. Forma geométrica de la cámara de digestión

Las formas geométricas pueden ser muy variadas pero existen cinco formas básicas de las cuales derivan las demás: cilíndrica vertical u horizontal, esférica, ovoide, paralelepípeda vertical u horizontal y domo o cúpula. Cada una posee sus ventajas y desventajas, pero con respecto a la producción de biogás no existen aun evidencias que hayan demostrado que la forma de la cámara tenga importancia. Sin embargo, los biodigestores de última generación de altos rendimientos poseen, generalmente, cámaras de digestión cilíndricas o paralelepípedas verticales.

8.1.3.3. Intensidad de la mezcla

La intensidad y la frecuencia del mezclado deben ser distintas para los distintos sustratos y distintos diseños de biodigestores. A continuación se describen, los tres tipos mezcla empleados en los procesos de biodigestión: completa, parcial y lenta.

Biodigestores de Mezcla Completa

En estos biodigestores, el sustrato se agita diariamente para que se mezcle de forma total. Se aplica cuando los sustratos contienen altos porcentajes de sólidos totales. Si el biodigestor trabaja en el rango termófilico, esta acción permite que la temperatura sea uniforme en todo el volumen. No obstante, la intensidad y periodicidad del mezclado debe ser controlada ya que puede perjudicar el equilibrio bacteriano. Para su logro se recurre a la agitación mecanizada, hidráulica o neumática.

Biodigestores de Mezcla Parcial

En este caso, sólo se busca evitar la formación de la costra sobrenadante ya que impide que las burbujas de biogás se desprendan del sustrato. Esta modalidad se utiliza en biodigestores, generalmente de rangos mesófilicos, con mecanismos muy básicos como agitadores manuales tales como varas introducidas dentro de la cámara de digestión o por rotación de la campana gasométrica con cadenas que cuelgan de ella.

Biodigestores de Mezcla Lenta

Dentro de los biodigestores de mezcla lenta se pueden citar el biodigestor de desplazamiento horizontal y el biodigestor vertical de flujo ascendente o descendente. En el primero, la agitación lenta del sustrato se logra por medio de tabiques equidistantes dispuestos transversalmente a la circulación del sustrato dentro de la cámara de digestión. Como dicho biodigestor tiene una geometría alargada, el sustrato se ve obligado a una circulación en zigzag.

En los biodigestores verticales, el mezclado se logra mediante flujo ascendente o descendente del sustrato, dependiendo de la ubicación de las cañerías de entrada y salida (Figura 21). Otra variación se logra construyendo un tabique diametral en el fondo del digestor que obligue al sustrato a una circulación ascendente y descendente en su camino hacia la cámara de descarga. También, caben en esta categoría los biodigestores que logran un efecto de mezcla a medida que las burbujas de biogás ascienden, ya que en su camino van arrastrando de partículas del sustrato.

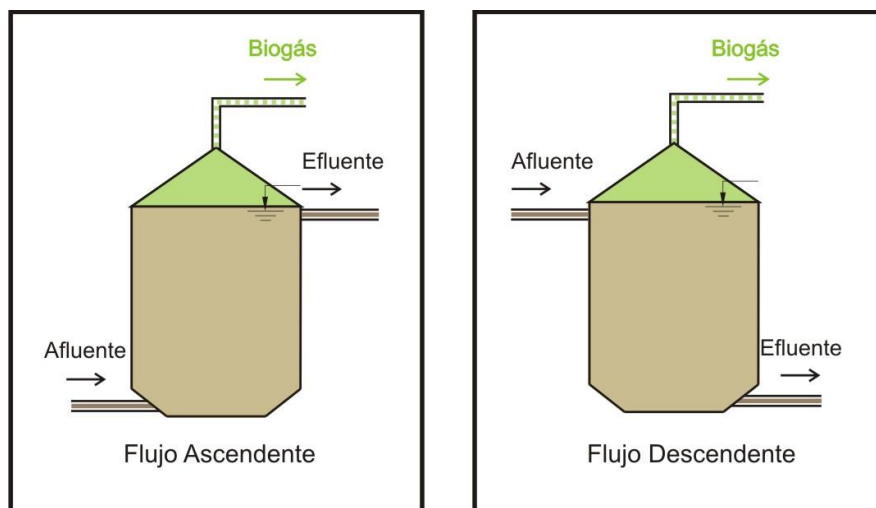


FIGURA 21. Biodigestores verticales de flujo ascendente y flujo descendente. Fuente: adaptación propia del Manual para la producción de Biogás (2003). Hilbert J. INTA-Castelar

8.1.3.4. Manejo del sustrato

La fracción sólida del efluente de un biodigestor continuo arrastra las bacterias metanogénicas fuera de la cámara de digestión, debido a que estos microorganismos tienden a adherirse sobre superficies sólidas. Los sistemas de biodigestión plantean diferentes formas para retener la mayor cantidad de bacterias activas dentro de la cámara de digestión con la finalidad de reducir los TRH y así conseguir biodigestores de menor volumen, para tratar un mismo volumen de materia prima.

Biodigestores de Contacto Anaeróbico

Este diseño consiste en un biodigestor de mezcla completa conectado a un decantador en la salida del mismo, lo que permite que los agregados o gránulos bacterianos que hayan salido con el efluente se asienten y decanten, para luego ser reintroducidos como un inóculo en la cámara de carga, donde se mezcla con la materia prima a ingresar. Este tipo de biodigestores, se utiliza para aguas residuales de alta carga orgánica, para que sea posible la separación de fases líquido-sólido.

Para obtener una mayor eficiencia, se suele colocar un desgasificador antes del decantador. De esta forma se eliminan burbujas de gas adheridas a las partículas sólidas, permitiendo una mejor sedimentación.

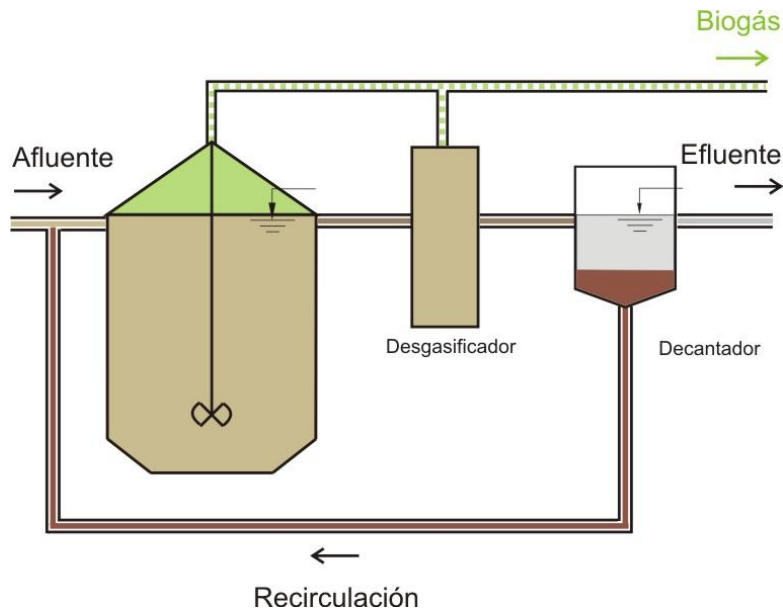


FIGURA 22. Biodigestor de contacto anaeróbico. Fuente: Elaboración propia.

Biodigestores U.A.S.B

Este diseño consiste en un biodigestor cerrado que contiene un manto de lodo constituido por gránulos bacterianos en suspensión. Estos gránulos tienen tamaños de 0,5 a 2mm de diámetro, con una alta velocidad de sedimentación y una resistencia íntima de adherencia suficiente para permanecer intactos ante la turbulencia del proceso.

En la parte superior cuenta con un separador de tres fases GSL (Gas - Sólido - Líquido), que consiste en dos deflectores, un colector de gas y un vertedero, todos ubicados estratégicamente, a fin de generar zonas tranquilas que permitan la sedimentación de los gránulos, y así, evitar que salgan con el efluente líquido.

El afluente se inyecta por la parte inferior del biodigestor y comienza una trayectoria ascendente, atravesando el lodo. Mediante el contacto del sustrato con el manto de lodo se obtiene una rápida degradación anaeróbica de alto rendimiento y el biogás producido

sube, guiado por los deflectores, en forma de burbujas hacia el colector. Durante su ascenso, el biogás realiza un efecto de agitación suave favorable para el desarrollo del proceso.

La sedimentación del lodo se produce cuando llega a la zona tranquila, debido a la forma del separador GSL. Los gránulos se van acumulando sobre el colector de gas hasta que el peso sobrepasa la fuerza de adherencia entre el lodo y el colector y sedimentan en la zona del manto de lodo. De esta manera, sólo el efluente líquido desborda hacia el vertedero. Este tipo de biodigestor es especialmente apto para el tratamiento de aguas residuales que permitan la separación de fases líquido-sólido. Son de alta eficiencia y se consiguen TRH muy bajos. Sus desventajas es que son costosos y se requiere operarios capacitados.

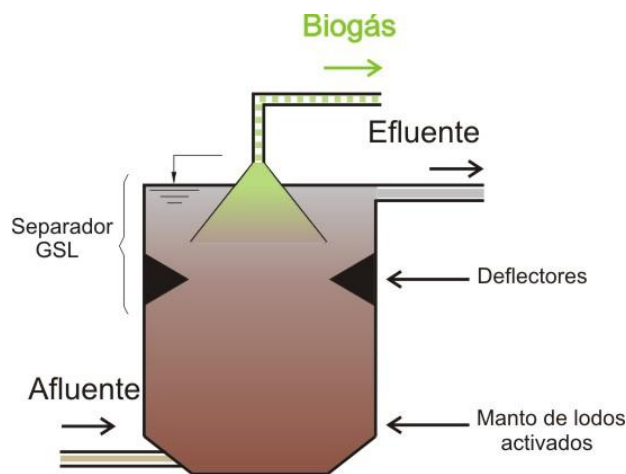


FIGURA 23. Biodigestor tipo U.A.S.B. Fuente: *Elaboración propia.*

Los diseños descritos hasta ahora se basan en el fenómeno de granulación bacteriana que se origina durante el proceso. A continuación, se describirán dos tipos más de biodigestores que no se basan en este fenómeno, y tienen la particularidad de retener la biomasa activa a través de soportes inertes.

Biodigestores de Lecho Fluidizado

En este sistema las bacterias se encuentran fijadas sobre pequeñas partículas de material inerte que se suspenden mediante un flujo ascendente. Las partículas que son arrastradas por el efluente, son recuperadas mediante un filtro, y luego recirculadas a la cámara de digestión. También existen de flujo descendente. Este tipo de diseño no es muy difundido y la mayoría de las referencias son a escala laboratorio o piloto.

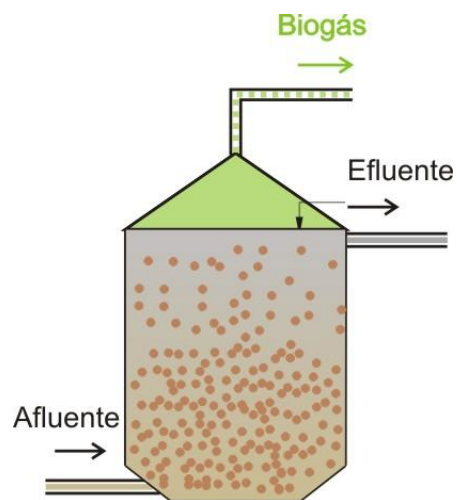


FIGURA 24. Biodigestor de lecho fluidizado de flujo ascendente. Fuente: *Elaboración propia*

Biodigestores de Filtro Anaeróbico

Estos biodigestores tienen la particularidad de ser alargados y pueden ser horizontales o verticales, pero estos últimos son más eficientes. En la cámara de digestión poseen un soporte poroso inerte, en el cual las bacterias se fijan superficialmente o quedan atrapadas en los intersticios de éste. El soporte puede ser de material cerámico o plástico (IMAGEN 9). De esta manera, los TRH disminuyen notablemente a tal punto que este parámetro se independiza del tiempo de reproducción celular, siendo posible disminuir los

TRH entre 0,5 y 3 días con muy altos niveles de eficiencia. (INTA, 2003). Existen de flujo ascendente o descendente y, en general, operan sin recirculación. El coste de inversión es un limitante importante para su implantación.

Este sistema ha sido extensamente aplicado para el tratamiento de aguas residuales de industria agroalimentaria, y existen experiencias piloto para la fracción líquida de residuos ganaderos. Cabe destacar, que el mismo no admite líquidos con material insoluble en suspensión ya que dichos sólidos bloquearían el pasaje del sustrato; sin embargo, deben lavarse en contracorriente para la remoción del exceso de lodo, y así mantener la eficiencia de operación.

Con todos estos diseños, se consiguen TRH entre 10 y 100 veces mayores que en los biodigestores convencionales de mezcla completa, lo cual permite incrementar notablemente la cantidad de materia prima a degradar. Estos biodigestores, usualmente, son operados con cargas continuas o semicontinuas. Sus desventajas es que son relativamente costosos y se requieren operarios capacitados.

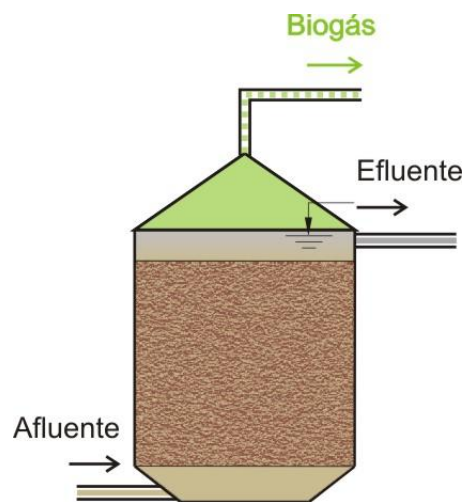


FIGURA 25. Biodigestor con filtro anaeróbico de flujo ascendente. *Fuente: Elaboración propia.*



IMAGEN 9. Ejemplos de soportes inertes del diseño filtro anaeróbico. Fuente: CD-ROM "Biogas from waste and waste water treatment" Comisión Europea. Directorio General XVII para la Energía.

8.1.3.5. Número de Fases

Según el número de fases, los biodigestores pueden clasificarse en sistemas de una y de dos fases, que a continuación se describen.

Biodigestores de una fase

Los tipos de biodigestores que ya se comentaron corresponden a esta categoría, ya que todas las etapas del proceso anaeróbico se desarrollan en una sola cámara de digestión. Las principales ventajas son su simplicidad, bajo costo y fácil operación. Sin embargo, esta categoría presenta la desventaja de que toda la comunidad bacteriana convive bajo las mismas condiciones ambientales durante todo el proceso, lo cual no resulta óptimo para el desarrollo de todas las poblaciones. Las actividades metabólicas de las bacterias fermentativas, que poseen altas tasas de crecimiento, y de las metanogénicas, con tasas de crecimiento más lentas y requerimiento estricto de pH, se tratan de equilibrar en un largo TRH y bajo condiciones ambientales que son más favorables para estas últimas, retardando el metabolismo de las fermentativas.

Biodigestores de dos fases

En este caso, el mismo proceso ocurre en dos biodigestores en serie. En el primero se desarrollan las etapas de hidrólisis y de fermentación, y en el segundo la acetogénica y la metanogénica. La finalidad es conseguir un TRH total inferior al correspondiente de un biodigestor de única fase completamente mezclado.

La separación puede ser de tipo térmico y cinético. Algunas experiencias han arrojado buenos resultados trabajando con un sistema de digestión de dos fases, termofílico-acidogénico seguido de mesofílico-metanogénico, con TRH notablemente inferior para la primera fase que para la segunda. De esta forma, se combinan las ventajas individuales de los dos rangos térmicos y se evitan las desventajas de cada uno. Además, es posible extraer los sólidos no digeridos antes de pasar a la etapa metanogénica.

Sin embargo, estos biodigestores aún no se han perfeccionado para emplearlos en grandes escalas. Además, cabe mencionar, que no se recomiendan para digerir sustratos fibrosos, en los cuales la etapa de hidrólisis resulta limitante del proceso.

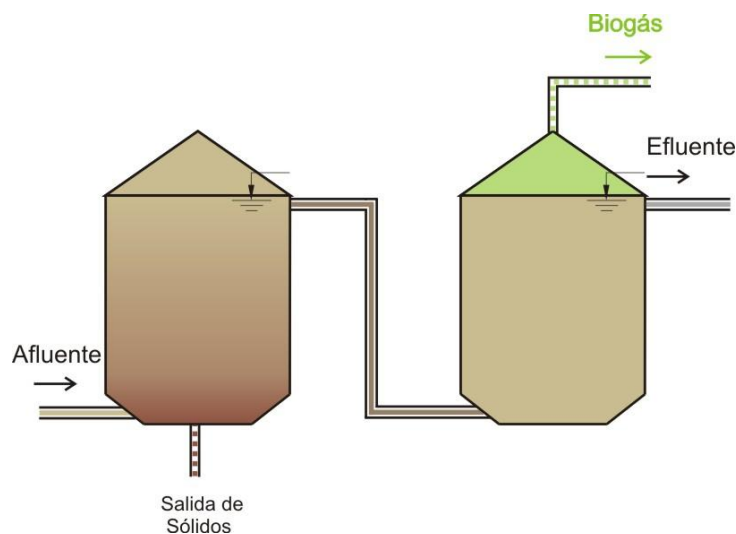


FIGURA 26. Biodigestor de dos fases. Fuente: Elaboración propia.

8.1.3.6. Tipo de Gasómetro

Según el tipo de gasómetro que posean, los biodigestores se pueden clasificar en: biodigestores cerrados, biodigestores de campana flotante, biodigestores de campana fija y biodigestores con gasómetros de plásticos inflables.

Biodigestores Cerrados

Estos biodigestores poseen una cubierta fija a las paredes del mismo, manteniendo una sola posición. El biogás se va almacenando dentro de éste, a volumen constante y presión variable, por lo tanto, es muy importante controlar la presión interna a través de dispositivos de liberación de presión y vacío, a fin de evitar que la cubierta se levante, causando daños en la estructura del biodigestor. Su capacidad es reducida y son los menos difundidos.

Biodigestores de Campana Flotante

Estos biodigestores depositan el biogás en gasómetros móviles en forma de campana. Estas campanas, también llamadas cúpulas, pueden estar incorporadas en el mismo biodigestor, flotando sobre el sustrato, o estar separadas flotando sobre agua (Imagen 10). Estas pueden ser de chapas de acero o de plástico de polietileno o de PRFV, para evitar posibles daños de corrosión. Este sistema es el utilizado en los biodigestores tipo Hindú, que se detallará más adelante en el punto 8.1.4.1, el cual posee la campana incorporada. A medida que se va almacenando biogás la campana asciende guiada por un eje, formando un sello hidráulico con las paredes del biodigestor, lo que asegura un movimiento hermético. Así, el gas se almacena a presión constante (pudiendo variar si se le colocan contrapesos sobre la campana) y volumen variable.

El peso de la campana de chapa determina que el biogás se comprima lo suficiente para levantarla y circule por la tubería que lo transporta hacia el consumo. En caso de que la campana sea de plástico, resulta necesario colocar un peso sobre la misma, como se puede observar en la imagen de abajo, a fin de dar la presión necesaria para que el biogás pueda ser impulsado por la cañería que lo envía a consumo.



IMAGEN 10. Fotografía y esquema de un gasómetro tipo campana móvil separado del biodigestor. Fuente: "Manual de instalación de un biodigestor familiar tipo manga para zonas alto-andinas". Universidad Politécnica de Cataluña.

Biodigestores de Campana Fija

Estos biodigestores, contruidos de mampostería, también poseen una cubierta en forma de campana, con la diferencia que está fijada al mismo, y por ende, inmóvil. A medida que aumenta la cantidad de biogás almacenado en ella, aumenta la presión interna del biodigestor, desplazando el efluente hacia una cámara de hidropresión, y luego vierte dentro de la cámara de descarga. Así, el biogás se almacena a presión y volumen variables.

También, es necesario el monitoreo de la presión interna, para evitar que se formen fisuras en la campana o en las paredes. Poseen una larga vida útil, ya que no poseen partes móviles y/o metálicas que puedan oxidarse y además pueden enterrarse, no quedando expuestos al intemperie. Este gasómetro es utilizado en los biodigestores de tipo Chino, que se desarrollará en el inciso 8.1.4.2.

Biodigestores con gasómetros de Plásticos Inflables

Estos gasómetros pueden estar incorporados en el mismo biodigestor o estar separados, y son inflados hasta un determinado volumen. Generalmente, consiste en una bolsa

plástica de polietileno o de PVC completamente sellada. Almacenan el biogás a presión constante y volumen variable.



IMAGEN 11. Biodigestores agroindustriales con gasómetros de geomembrana de PVC en Alemania. *Fuente: Gabriel Moncayo Romero, “Manejo ecológicamente compatible de las cuencas del Tungurahua” Universidad Técnica de Ambato, Ecuador*

8.1.3.7. Posición respecto de la superficie del terreno

Según la posición respecto del terreno en el que son instalados los biodigestores, se pueden clasificar en biodigestores subterráneos, semienterrados y superficiales.

Biodigestores Subterráneos

Esta alternativa se recomienda para aquellas zonas geográficas donde predominan amplitudes térmicas considerables, con el fin de moderar los cambios de temperatura y; a su vez, cuando el volumen del biodigestor a instalar no es lo suficientemente grande para compensar los costos de la adopción de un sistema de calefacción.

Una de las condiciones de esta alternativa es la profundidad de la superficie freática en la zona. La inexistencia de legislación específica exige adoptar, dada la similitud de la posible contaminación de las aguas subterráneas por un lixiviado, la Ley PBA GIRSU

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



N°13592 y su Resolución 1143/02, que establece que la base de un relleno sanitario debe estar ubicada como mínimo a 0,50 m sobre el nivel superior del acuífero libre.

Biodigestores Semienterrados

Esta alternativa es utilizada también para aprovechar la aislación térmica del suelo y, generalmente, se emplea en diseños con gasómetro incorporado, el cual se instala por encima del nivel del terreno mientras que la cámara de digestión queda totalmente enterrada. También se utilizan cuando existen condicionantes geológicos-hidrogeológicos en el terreno donde se quiere instalar el biodigestor, tales como altos niveles freáticos o cuando las profundidades en que se encuentra el suelo rocoso impiden mayores excavaciones.

Biodigestores Superficiales

En el caso de grandes instalaciones, se recomienda que los biodigestores se dispongan sobre el nivel del terreno, contando con un sistema de calefacción y aislación que mantengan la temperatura elegida de trabajo, independizándolo de los cambios de temperatura en el exterior del biodigestor. Así, además, de que los costos son compensados, se obtienen mayores beneficios por un aumento en la producción de biogás y estabilidad en el proceso.

Una desventaja de estas instalaciones es que quedan expuestas directamente a la intemperie, produciéndose daños de corrosión en los materiales utilizados. Por esta razón se recomienda usar materiales resistentes y pinturas anticorrosivas.

8.1.4. Modelos más difundidos

8.1.4.1. Biodigestor Tipo Hindú

Su cámara de digestión es de forma vertical cilíndrica y se dispone bajo tierra. Esta divide diametralmente al medio por una pared de la mitad de su altura, conformando dos sectores. El sector primario está comunicado directamente con la cámara de carga, y es el que recibe el material que recién ingresa. La pared evita que el sustrato salga inmediatamente por la cámara de descarga, y de esta forma realice un camino desde el sector primario

hacia el secundario, cumpliendo con el TRH determinado. El gasómetro es de tipo campana flotante, quedando sobre el nivel del terreno.

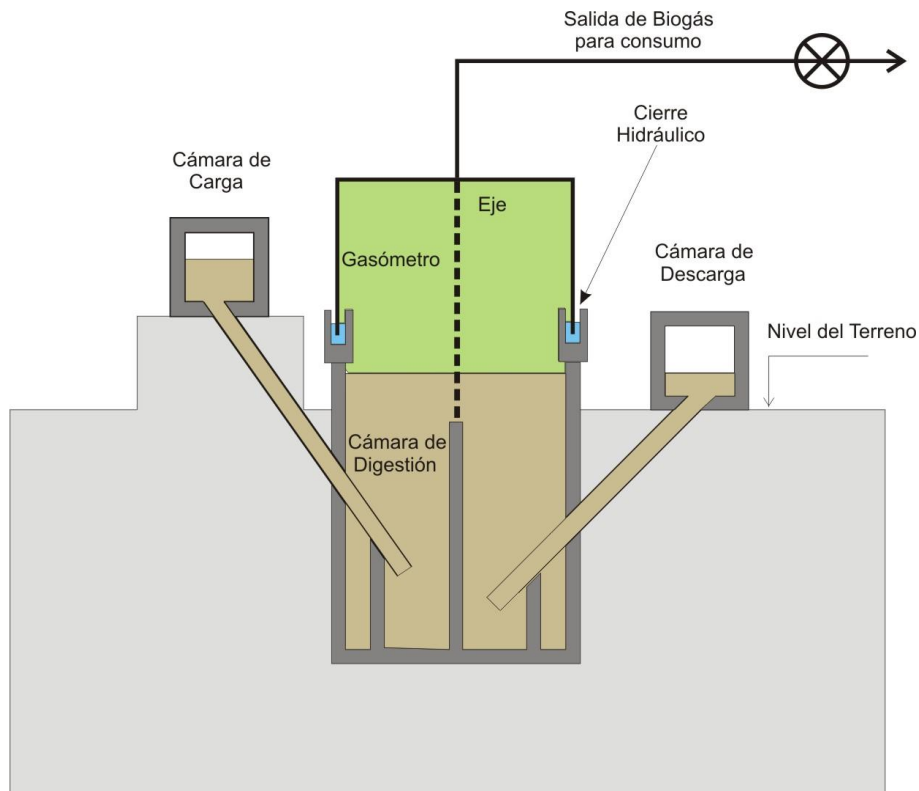


FIGURA 27. Esquema de un biodigestor tipo Hindú. Fuente: Elaboración propia.

Las cámaras de carga y descarga se encuentran diametralmente opuestas y a distintos niveles sobre el nivel del terreno. Este desnivel asegura la descarga de la biomasa por vaso comunicante y las inclinaciones de los conductos facilitaban la carga y descarga de la misma. Generalmente, trabajan en forma continua, y el vaciado completo se realiza en caso de limpieza o reparación.

Las desventajas de este tipo de biodigestor es que su costo en materiales es relativamente alto y la campana gasométrica, que es generalmente lo más costoso del equipo, puede dañarse por corrosión. Su ventaja es que su funcionamiento es muy sencillo y su uso está muy difundido en el área rural.



IMAGEN 12. Fotografías de biodigestores tipo Hindú. Fuente: Bárbaro Lugones López "Análisis de biodigestores". Cuba solar.

8.1.4.2. Biodigestor Tipo Chino

Estos biodigestores, contruidos de mampostería, se componen de una cámara de digestión de forma semejante a la de una esfera y dispuesta bajo tierra. Cuenta con un gasómetro de tipo campana fija, que también queda bajo el nivel del terreno.

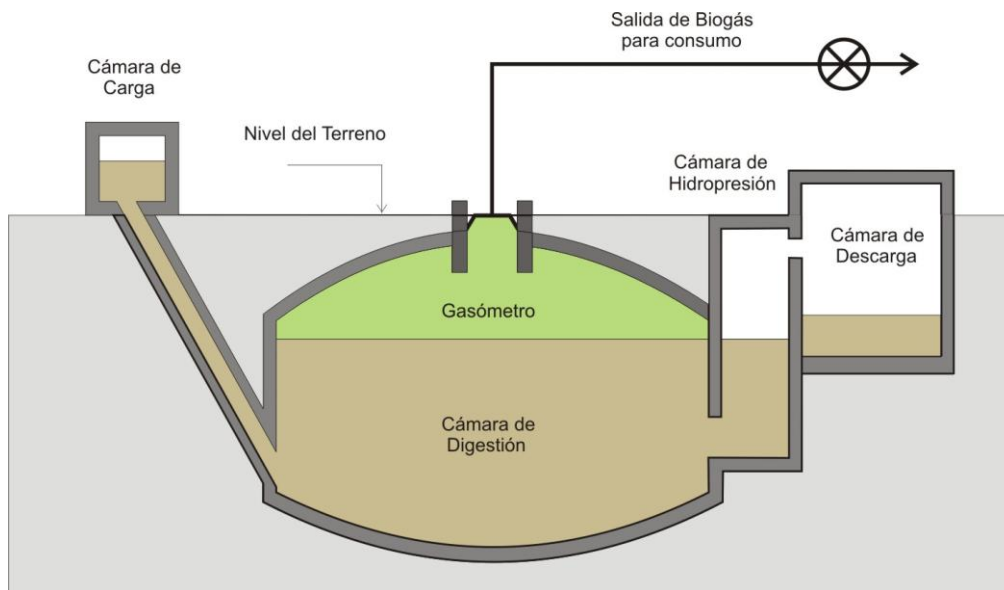


FIGURA 28. Esquema de un biodigestor tipo Chino. Fuente: Elaboración propia

Los cámaras de carga y de descarga de encuentran diametralmente opuestas y la circulación de la biomasa se realiza por vaso comunicante. Estos biodigestores se pueden cargar de forma semicontinua o continua. Dispone de un tapón manual en la parte superior para facilitar su limpieza o reparación. Las ventajas de este modelo son, sus bajos costos de construcción y la ausencia de partes metálicas y móviles expuestas a la intemperie. La desventaja es que se debe controlar la presión interna para evitar daños en la estructura.



IMAGEN 13. Biodigestor tipo Chino. *Fuente: Programa De Desarrollo De Las Naciones Unidas. Disponible en: <http://www.tradepusaid.co.za/>*

8.1.4.3. Biodigestor de Desplazamiento Horizontal

Estos biodigestores poseen una cámara de digestión de forma alargada horizontal. Puede disponerse por encima o por debajo del nivel del terreno en excavaciones de poca profundidad. Se los utiliza cuando se requiere trabajar con diseños voluminosos, mayores a 15m³, y la excavación para un diseño vertical de estas dimensiones no cumpliría la distancia mínima con la superficie freática (Groppelli y Giampaoli, 2001). Las cámaras de carga y descarga de encuentran diametralmente opuestas y expuestas a la intemperie. La circulación del sustrato es por gravedad, de tipo flujo pistón y son cargados de manera continua.

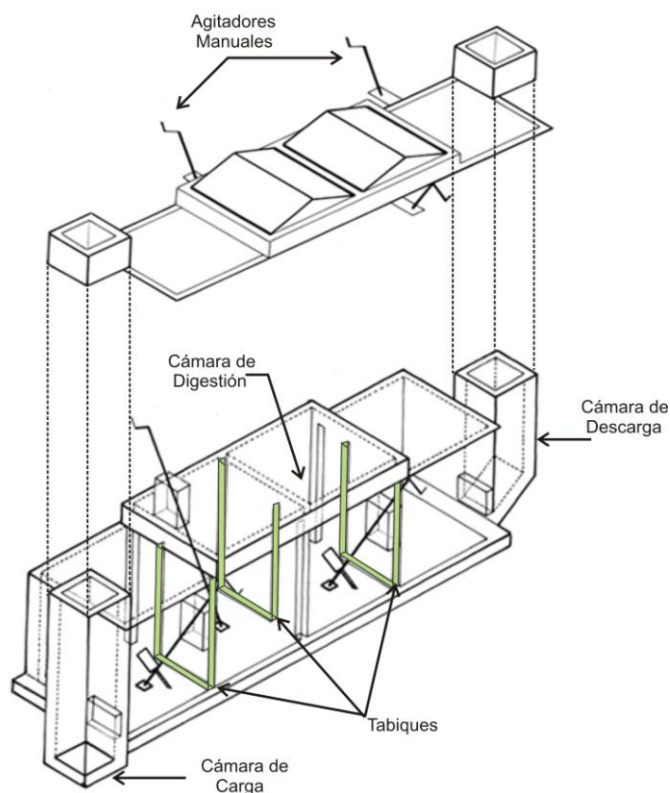


FIGURA 29. Vista en perspectiva de un biodigestor de desplazamiento horizontal. *Fuente: adaptación propia El Camino de la Biodigestión. Ambiente y tecnología socialmente apropiada (2001). Groppelli y Giampaoli. Universidad Nacional del Litoral.*

Se distinguen dos modelos de biodigestores de desplazamiento horizontal: de mampostería y de geomembrana o también llamado balón de plástico.

El primer modelo cuenta con un gasómetro que puede estar incorporado al biodigestor de tipo campana fija, o puede estar separado de tipo campana móvil. La agitación pueden ser mediante tabiques internos, como se mencionó en el apartado 8.1.3.3, o de tipo mecánica, a través de varios agitadores de funcionamiento manual distribuidos adecuadamente a lo largo de la toda la longitud del biodigestor como muestra la Figura 29.

El otro tipo de biodigestor horizontal, consiste en una cámara de digestión de forma tubular formada por una geomembrana de PVC o polietileno de alta densidad, completamente sellada. La parte inferior (75% de volumen) se rellena con la carga, mientras que en la parte superior (25%) se almacena el biogás. Los tubos de entrada y salida están sujetos

directamente a la geomembrana, atados con soga plástica. El biogás acumulado puede ser conducido por una manguera a otro gasómetro separado o directamente a consumo.

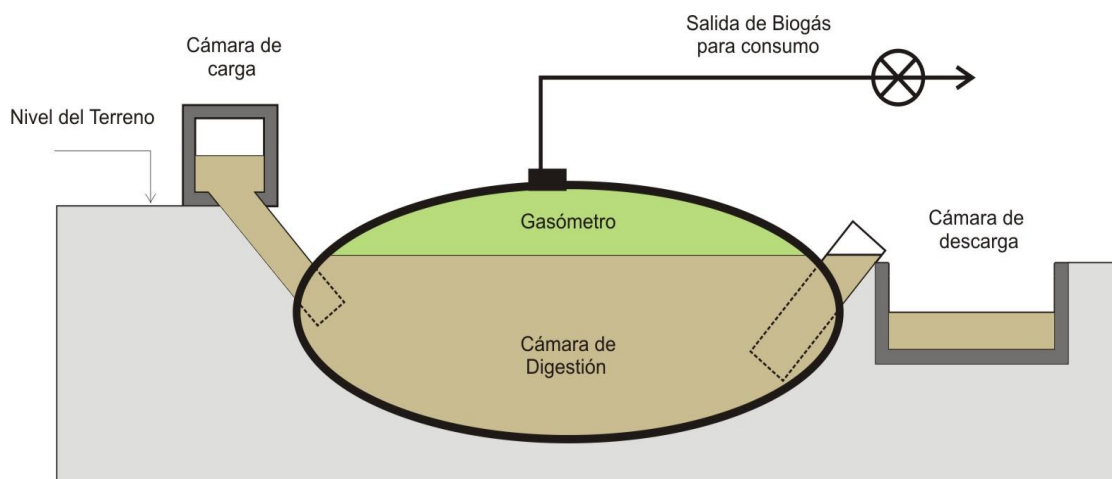


FIGURA 30. Esquema de un biodigestor tipo Balón. *Fuente: Elaboración propia.*

Sus ventajas son su bajo costo de construcción y su fácil instalación. Sus desventajas se deben a que su vida útil es corta dependiendo de la clase de material que se elija y las presiones de trabajo son bajas. El material plástico puede estar recubierto con tela media sombra para evitar su rápido deterioro por exposición a la intemperie y a los rayos ultravioleta.



IMAGEN 14. Biodigestor Tipo Balón. *Fuente: Torres Guillén, D. y Arteaga Chávez, L. "Desarrollo de un Sistema de Biodigestores y Energías Limpias". Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Lima, Perú.*



IMAGEN 15. Biodigestor tipo Balón en un emprendimiento de producción porcina en Marco Paz, Buenos Aires. Fuente: Facultad de Ciencia y Tecnología. Universidad Autónoma de Entre Ríos.



IMAGEN 16. Biodigestor tipo Balón de gran escala. Fuente: Biodigestor con geomembranas. EG-ingeniería, Santa Fe, Argentina. Disponible en: <http://www.eg-ingenieria.com.ar/biodigestores-con-geomembranas.html>

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”

A continuación, en la Tabla 15 se comparan los tres modelos de biodigestores antes descritos.

Tabla 15. COMPARACION DE LOS MODELOS DE BIODIGESTORES MAS DIFUNDIDOS	Tipo Hindú	Tipo Chino	Tipo Balón
Material de construcción	Mampostería y chapa de acero	Mampostería	Geomembrana de PVC o Polietileno de alta densidad
Alimentación	Continua	Semicontinua/ Continua	Continua
Forma geométrica de la cámara de digestión	Cilíndrica	Esférica	Tubular o Paralelepípeda Horizontal
Posición con respecto al nivel del terreno	Semienterrado	Subterráneo	Semienterrado
Volumen	6-100 m ³	6-20 m ³	4-100 m ³
Sustratos más adecuados	Estiércol animal con o sin residuos vegetales	Estiércol animal con residuos vegetales	Estiércol animal solamente
Ventajas	Fácil construcción y operación. Presión constante de biogás.	Bajos costos de construcción. Buen aislamiento térmico.	Bajos costos de instalación y fácil operación.
Vida Útil Prevista	8-12 años	12-20 años	3-8 años
Desventajas	Presenta partes metálicas que pueden oxidarse.	Presión de biogás variable.	Vida útil corta. Bajas presiones de biogás.
Mantenimiento	La campana debe pintarse regularmente con pintura anticorrosiva.	Se debe controlar la presión interna de biogás.	Para evitar daños por exposición solar, se debe recubrir la cámara de digestión.
Elementos costosos	Campana metálica	Excavación	Material Plástico

Fuente: Adaptación propia de Difusión de la tecnología del biogás en Colombia, Cooperación Técnica Alemana (GTZ), 1987

9. VENTAJAS DEL TRATAMIENTO BIOLÓGICO ANAERÓBICO

Entre los beneficios obtenidos a través de la biodigestión anaeróbica de materiales orgánicos se pueden destacar:

Beneficios Ambientales

- Estabilización de los residuos orgánicos. Disminución de aproximadamente del 50% del contenido sólidos volátiles. Facilita su manejo y disposición.
- Minimización de los impactos ambientales sobre el suelo y cuerpos de aguas.
- Disminución proporcional del uso de combustibles fósiles y tala de bosques, debido al reemplazo por biogás.
- Reducción de emisión de GEI. Evita la emisión descontrolada de metano y óxidos de nitrógeno proveniente de la actividad ganadera.
- Conservación de nutrientes en el efluente. Posibilidad de utilización como mejorador de suelos.

Beneficios socio-económicos

- Producción de energía. Probabilidad de obtener una rentabilidad económica.
- Favorece la implementación de Proyectos MDL.
- Facilita la obtención de financiación desde programas que promueven mejora de la gestión ambiental.
- Ventajas competitivas. Disminución de impuestos, según regímenes de promoción de legislación vigente.
- Reducción de olores. Aceptación social.
- Disminución de proliferación de insectos y vectores sanitarios.
- Generación de puestos de trabajo que traería aparejada las plantas a gran escala.

10. TRATAMIENTO BIOLÓGICO AERÓBICO

10.1. Descripción del Proceso Aeróbico

El tratamiento biológico aeróbico o también llamado compostaje, es una técnica que permite la biodegradación aeróbica controlada de la materia orgánica residual.

El fundamento de esta técnica se basa en la acción de bacterias presentes en los propios materiales orgánicos en descomposición que, en presencia de oxígeno, transforman dichos materiales en otras formas químicas estables y asimilables por los productores primarios, dando como producto final un material útil y mejorador de suelos, denominado compost.

Las bacterias aeróbicas son microorganismos que utilizan el carbono de los residuos orgánicos para su propio crecimiento, consumiendo el oxígeno y liberando dióxido de carbono al aire, entre otros gases. Además del oxígeno, las bacterias requieren de la presencia de nutrientes y de ciertas condiciones ambientales favorables para su crecimiento y reproducción.

La presencia de oxígeno durante el desarrollo de todo el proceso, le da el nombre de aerobio o aeróbico, tanto al proceso como a las bacterias mismas.

La siguiente figura (Figura 31) representa la descomposición aeróbica general de la materia orgánica:

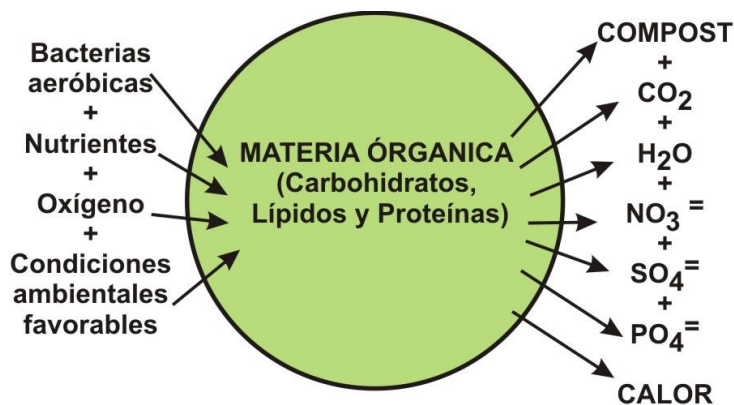


FIGURA 31. Representación de la descomposición aeróbica general de la materia orgánica. Fuente: Branda J., Menna M. y Murcia G., 2001^{xxv}

10.1.1. Etapas del proceso biológico aeróbico

El proceso aeróbico de degradación es un proceso exotérmico, contrario a lo que ocurre con el proceso anaeróbico, y presenta las siguientes cuatro etapas de actividad microbiana y temperaturas bien definidas (Sztern D. y Pravia M., 1999)^{xxvi}.

- Etapa de Latencia
- Etapa Mesotérmica (10-40° C)
- Etapa Termogénica (40-75° C)
- Etapa de maduración (temperatura aproximadamente igual a la del ambiente)

A continuación se describen brevemente las características de cada una de estas etapas, según las poblaciones de microorganismos que intervienen y los cambios de temperatura que se producen.

10.1.1.1. Etapa de latencia

Es la etapa que se inicia con el armado de la pila o hilera de materia orgánica fresca, y su alcance va hasta que se produce un aumento de la temperatura, con respecto a la temperatura del material inicial. La duración de esta etapa es muy variable, dependiendo de numerosos factores, principalmente de la temperatura ambiente y la carga de biomasa bacteriana. Con una temperatura ambiente entre los 10 y 12° C, en pilas o hileras adecuadamente conformadas, esta etapa puede durar de uno a tres días.

10.1.1.2. Etapa mesotérmica (10-40°C)

En esta etapa se destacan las degradaciones por bacterias mesófilas, aerobios estrictos. Se dan también procesos de nitrificación y oxidación de compuestos reducidos de azufre y fósforo. La actividad bacteriana incrementa paulatinamente la temperatura, y es particularmente sensible a la humedad y la aireación. La falta de disipación del calor produce un incremento aún mayor de temperatura y favorece el desarrollo de las bacterias termófilas

que se encuentra en estado latente en los residuos. La duración de esta etapa es muy variable y depende de numerosos factores.

10.1.1.3. Etapa termogénica (40-75° C)

Las bacterias mesófilas son sustituidas por las termófilas. Normalmente en esta etapa, se reducen todos los mesófilos patógenos, hongos, esporas, semillas y elementos biológicos indeseables y se producen visibles emanaciones de vapor de agua

El dióxido de carbono se produce en volúmenes importantes que difunden desde el centro a la periferia. La periferia es la zona donde se produce la puesta de insectos. Este gas, juega un papel fundamental en el control de larvas ya que la concentración de CO₂ alcanzada resulta letal para ellas. Otro gas que se desprende en esta etapa es el amoníaco, cuando el pH se vuelve alcalino.

10.1.1.4. Etapa de maduración

Con el agotamiento de los nutrientes, y la desaparición de los termófilos, comienza el descenso de la temperatura, que marca el inicio de otra etapa denominada etapa de maduración. Cuando la temperatura alcanza valores iguales o inferiores a los 40°C se desarrollan nuevamente los microorganismos mesófilos junto con algunos de los organismos de la macrofauna (colémbolos, hormigas, cien pies, ácaros y gusanos) que utilizan como nutrientes los materiales más resistentes a la biodegradación, tales como la celulosa y lignina restante en las pilas.

La temperatura irá descendiendo paulatinamente hasta presentarse en valores muy cercanos a la temperatura ambiente. En estos momentos se dice que el material se presenta estable biológicamente y se da por culminado el proceso. Existen índices que determinan la finalización de la etapa de maduración, cuyo cumplimiento garantiza la calidad del compost obtenido. Estos índices se describirán más adelante.

Una consideración a tener en cuenta es que las etapas mencionadas, no se cumplen en la totalidad de la masa en compostaje, sino más bien en el centro de la pila o hilera de residuos. Por lo tanto, cabe distinguir dos zonas en la pila o hilera de residuos en proceso:

- Zona central: es la que está sujeta a los cambios térmicos y bacterianos más evidentes, y

- Corteza: que es la zona que rodea el centro y que, por lo tanto, queda con menor exposición a la acción bacteriana y a los cambios de temperatura, y a su vez influenciada por las condiciones del medio externo.

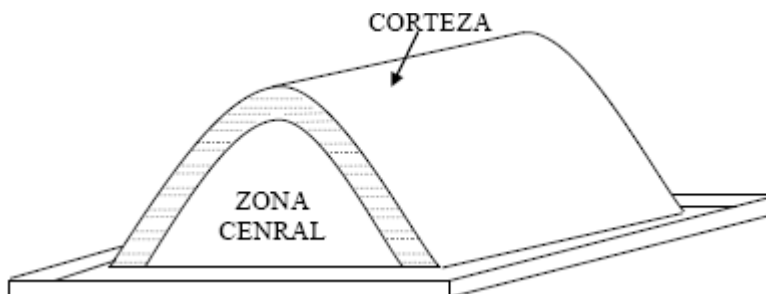


FIGURA 32. Zonas distinguibles en una pila o hilera en compostaje. Fuente: Corleto B. y Menna M. "Tratamiento Biológico Aerobio de los residuos generados en el procesamiento industrial de la papa", 2008.

Por esta razón, es necesario voltear las pilas de material en proceso, de manera que el material que se presente en la corteza, pase a formar parte del centro. Esta tarea sobre las pilas se realiza en momentos puntuales, y permite, además, la entrada de oxígeno en el material que no se encontraba próximo a la superficie.

10.2. Parámetros de control del tratamiento biológico aeróbico

Para un buen desarrollo del proceso aeróbico, es necesario propiciar un ambiente favorable para el crecimiento y reproducción de todo el conjunto bacteriano. Para ello se deben controlar ciertos parámetros, similares a los del proceso anaeróbico, que influyen sobre la viabilidad del proceso aeróbico y determinan de manera indirecta, la calidad del producto final.

Los parámetros a controlar pueden agruparse en relación a:

- Materia prima a tratar
- Condiciones ambientales del proceso
- Condiciones de operación del proceso

Parámetros relacionados con la materia prima a tratar:

- Relación Carbono/Nitrógeno
- Tamaño de las partículas

Parámetros relacionados con las condiciones ambientales del proceso

- Temperatura
- pH
- Humedad
- Aireación

Parámetros relacionados con las condiciones de operación del proceso

- Utilización de inóculos

10.2.1. Parámetros relacionados con la materia prima a tratar

10.2.1.1. Relación Carbono/Nitrógeno y contenido de otros nutrientes

Una relación C/N inicial de 20 a 30 se considera como adecuada para iniciar un proceso de compostaje. Si la relación C/N tiene un valor por debajo de 20, se producirán pérdidas importantes de nitrógeno en forma de amoníaco. (Corleto y Menna, 2008).

Si en cambio, la relación es mayor a 30, los microorganismos deban pasar por ciclos adicionales de consumo de carbono a través de un mayor número de generaciones de microorganismos, ralentizando la formación del compost.

Al igual que el proceso anaeróbico, si se dispone de un material con una relación C/N inicial no apropiada para someterlo al proceso de compostaje se debe realizar una mezcla con otros materiales para lograr una relación apropiada.

En referencia a otros nutrientes, las bacterias aeróbicas requieren de los mismos mencionados para las bacterias anaeróbicas, y estos se encuentran en las proporciones necesarias de los materiales o mezcla de materiales que se van a compostar.

10.2.1.2. Tamaño de las partículas

Los tamaños de partículas que resultan adecuados para el proceso de compostaje, están comprendidos entre 2 a 10 cm. (Corleto y Menna, 2008)

En caso que las partículas sean más grandes que 10 cm, se favorece la aireación del sustrato pero a la vez, se presenta menor superficie de contacto con las bacterias aeróbicas, con la consiguiente, ralentización del proceso. Por ello, resulta fundamental la reducción de las partículas a tamaños adecuados.

Por el contrario, si las partículas son menores a 2 cm, se tiende a la compactación de las mismas, con lo que disminuye la aireación y aparecen condiciones de anaerobiosis.

Cabe mencionar en este punto, que a medida que los materiales orgánicos se degradan a través del proceso aeróbico, modifican su estructura física, y más rápidamente aquellos como los estiércoles, que presentan un importante porcentaje de humedad. Otros materiales como materiales leñosos y fibras vegetales, con altos contenidos de lignina y celulosa, poseen una estructura más resistente por ende requieren de un tiempo mucho mayor en proceso antes de presentar modificaciones considerables en su estructura.

Por dicha característica, éstos son, en general, los materiales elegidos para oficiar de soporte estructural del sustrato a compostar. Al ser triturados y mezclados en proporciones adecuadas con residuos orgánicos que pierden su forma rápidamente, se logra conformar una pila bien definida y estructurada, con presencia de espacios libres que permiten la entrada de aire y la consiguiente oxigenación del material en proceso de degradación. A estos materiales leñosos triturados se los denomina *chip*.

Otro beneficio que se obtiene con la utilización de éstos, es la disminución de la humedad, que será detallada más adelante.

Una vez finalizado el proceso de compostaje, el chip se puede reutilizar como soporte para la conformación de una nueva pila de residuos. Es evidente que el tamaño y grosor de este chipeado no será el mismo que el inicial, dado que también se expuso a los pro-

cesos de degradación, por lo que habrá que renovarlos cuando hayan perdido gran parte de su estructura.

10.2.2. Parámetros relacionados con las condiciones ambientales

10.2.2.1. Temperatura

Para obtener los mejores resultados, desde el punto de vista sanitario, es imprescindible alcanzar la etapa termogénica (40 a 75° C) y que la temperatura permanezca >55°C durante 15 días con un mínimo de 5 volteos (EPA, 1992). Los factores que condicionan la temperatura de las pilas son la humedad, la aireación y el volumen.

Con respecto al volumen, generalmente no es aconsejable la compostación de pequeños volúmenes de residuos en zonas con bajas temperaturas ambientales, ya que la misma influye sobre la temperatura del interior de la pila, provocando la lentificación del proceso o el detenimiento del mismo. En lugares tropicales, o en ambientes cerrados donde la temperatura ambiente no baja de los 20° C, si es posible compostar residuos en pilas con pequeños volúmenes, aunque en estos casos puede suceder que no se alcance a la higienización del sustrato.

10.2.2.2. Humedad

El contenido de humedad es otra condición importante para las bacterias del proceso, ya que requieren un cierto contenido de agua para desarrollarse. Lo recomendable es que la mezcla a compostar tenga un contenido de humedad entre el 50 % y 60% (Corleto y Menna, 2008)

Cuando el contenido de humedad es menor al 40%, la velocidad de degradación disminuye considerablemente. Por debajo del 20%, la biodegradación cesa.

De forma contraria, si la humedad es superior al 60%, el agua llena los espacios que existen entre las partículas, hay una inhibición del acceso del oxígeno y se generan condiciones anaeróbicas con la consiguiente disminución de la temperatura y la formación de malos olores.

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



Una forma de contrarrestar la humedad, tanto al inicio como durante del proceso, consiste en la utilización de de chip seco tal que éstos absorban la humedad y la lleven a valores adecuados.

Para conocer la proporción de chip inicial adecuada, se recomienda realizar pruebas a escala laboratorio, conformando pilas con los residuos que se desean compostar y distintas cantidades de chip, lo cual queda fuera del alcance de los objetivos de este Trabajo, y por lo tanto pendiente de ser estudiado como continuación a esta experiencia. No obstante, es posible estimar una proporción de chip adecuada en base a experiencias anteriores y, en caso de observar signos de anaerobiosis en los primeros días de conformada la pila, proceder al agregado de mas chip.

En general, durante la Etapa Termogénica, se produce una pérdida de humedad excesiva por evaporación, por lo que el riego debe ser lo más atomizado posible para no producir cambios bruscos en la temperatura de la pila. Este riego es conveniente hacerlo cuando termina dicha etapa.

Lo ideal es controlar el contenido de humedad a lo largo de todo el proceso, a través de análisis de laboratorio correspondiente. Sin embargo, también es posible aplicar alguno de los siguientes procedimientos empíricos para estimar el contenido de humedad en forma inmediata. (Corleto y Menna, 2008)

Método de verificación de plasticidad

- Tomar con la mano una muestra de material (triturado y mezclado).
- Cerrar la mano y apretar fuertemente.
- Finalmente abrir el puño y observar si el material:
 - se mantiene unido y recupera su volumen sin resquebrajarse, entonces la humedad es adecuada para el compostaje.
 - se disgrega o se resquebraja, se asume que el material contiene insuficiente humedad para el compostaje.

Método del goteo

- Tomar con la mano una muestra de material (triturado y mezclado).
- Cerrar la mano y apretar fuertemente.
- Finalmente abrir el puño y observar si el material:
 - Si se verifica que sale un hilo de agua continuo del material, entonces se puede establecer que el material contiene más de un 40% de humedad.
 - Si el material gotea intermitentemente, se puede establecer que su contenido en humedad es cercano al 40%.
 - Si el material no gotea y cuando se abre el puño de la mano permanece moldeado, se estima que la humedad se presenta entre un 20 a 30 %.
 - Si al abrir el puño el material se disgrega, se asume que el material contiene una humedad inferior al 20 %.

10.2.2.3. Aireación

El suministro de aire a todas las partes en compostaje es esencial para proveer oxígeno a los microorganismos. Esto se logra a través del volteo de la pila, que puede realizarse de forma manual si las pilas no son muy grandes, o bien de forma mecánica, a través de la utilización de maquinaria específica. Además, con el volteo se logra la redistribución de las colonias bacterianas y de los materiales que se encuentran en la corteza de la pila, los cuales están menos expuestos a la acción de las bacterias. De esta forma, se evita la competencia entre bacterias por el alimento y se asegura la degradación en forma homogénea.

Como la necesidad de aire depende del tipo de residuo a compostar, no es adecuado indicar una frecuencia de volteo sino que lo ideal es proceder a voltear la pila cuando se observe la necesidad de aire. Para ello se requiere tener en cuenta estas dos consideraciones:

- Si al inicio de proceso, se generan condiciones de anaerobiosis por el contenido de humedad de los residuos, es decir consistencia babosa entre los residuos y ge-

neración de malos olores, los primeros volteos deben ser más frecuentes, para evitar la putrefacción de la materia orgánica y salvar el proceso.

- Durante la Etapa Termogénica, la frecuencia de volteo debe disminuir debido a que con la entrada de flujo de aire se pierde calor, provocando el enfriamiento de la pila, comprometiendo la higienización del sustrato.

En la siguiente figura se observa, la variación de temperatura que sufre una unidad de compostaje con respecto al tiempo, y se indica los momentos en que se recomienda realizar volteos y humedecer.

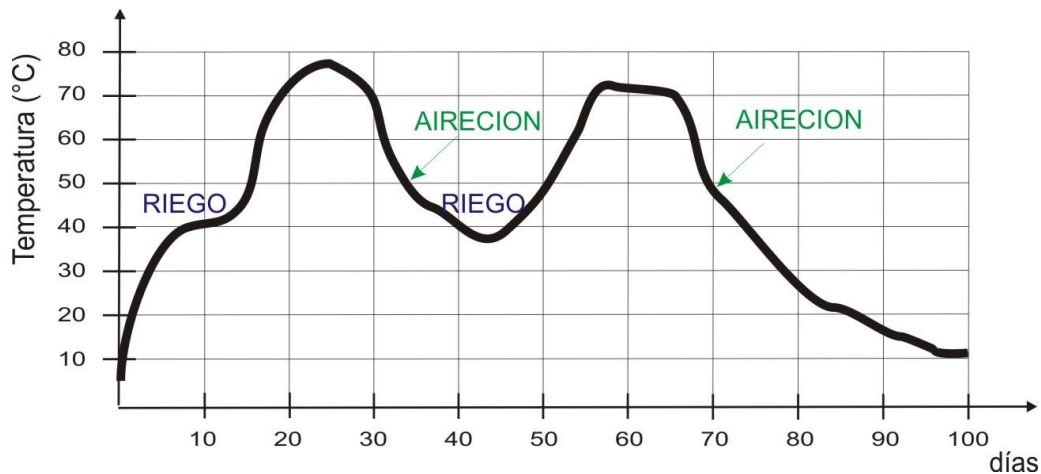


FIGURA 33. Alternancia de las Etapas Mesotérmica y Termogénica registrada en una unidad de compost.
Fuente: Sztern D. y Pravia M., 1999

10.2.2.4. pH

El pH, al igual que en el proceso anaeróbico, es un parámetro muy importante para evaluar el ambiente microbiano y la estabilización de los residuos en un proceso de compostaje. Su valor varía con el tiempo durante el proceso, debido a los cambios constantes en la composición química del sustrato.

Los equilibrios ácido-base que influyen sobre el pH son muy similares a los mencionados para el proceso anaeróbico.

Cabe destacar, nuevamente, al sistema carbónico por su función reguladora de pH. Durante el proceso de compostaje, el CO_2 que se forma puede escapar a la atmósfera como gas o disolverse en la fase líquida, formando ácido carbónico (H_2CO_3), bicarbonato (HCO_3^-) y carbonato (CO_3^-). Este sistema tiene dos constantes de disociación $\text{pK}_{a1}=6,35$ y $\text{pK}_{a2}= 10,33$ a 25°C , el cual tiende a neutralizar el pH, incrementando los pH bajos y reduciendo los pH altos.

Con respecto al equilibrio amonio-amoniaco, el desplazamiento hacia la formación de de amoniaco tiene un doble efecto: por un lado alcaliniza temporalmente el compost y por otro lado supone una pérdida de nitrógeno, el cual, como es sabido, es un nutriente de los suelos. Por tanto, este segundo efecto es más grave que el primero al afectar a la calidad final del compost como enmienda para el cultivo.

Y en el sistema de los ácidos orgánicos y sus sales, predominan el ácido acético y láctico. Este sistema puede reducir el pH a 4,14, que es el pK_a del ácido láctico a 25°C .

Estos equilibrios se combinan para formar la curva típica del pH del proceso de compostaje que, además, va acompañada con los cambios de temperatura: en la etapa inicial (etapa mesotérmica), el pH desciende. Luego, en la fase de máxima actividad (etapa termogénica), el pH aumenta y luego la tendencia es a la estabilización (etapa de maduración).

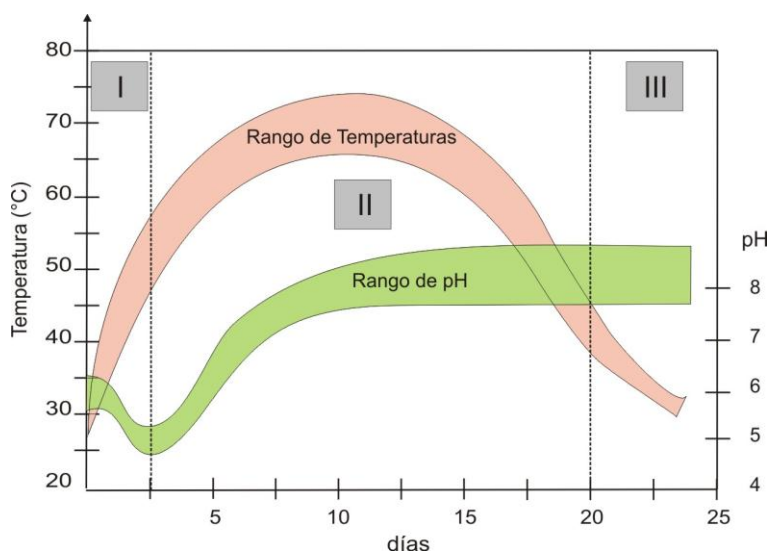


FIGURA 34. Rangos de temperatura y pH típicos en el proceso aeróbico. I) Etapa mesotérmica II) Etapa termogénica III) Etapa de maduración. Fuente: Tchobanoglous, et al., 1998

Según el pH y la temperatura de la pila, existen diferentes grupos de microorganismos: uno mesofílico, ácido tolerante y otro termofílico, que no tolera condiciones de acidez.

Al final del proceso, el compost maduro suele tener unos valores de pH cercanos a la neutralidad, con tendencia hacia la alcalinidad o hacia la acidez, dependiendo de las materias primas del proceso.

Desde el punto de vista del uso, hay que tener en cuenta el tipo de suelo al que se aplicará el compost maduro. Los terrenos carbonatados (ricos en carbonato cálcico) son alcalinos, por tanto, aunque el compost sea ligeramente ácido no se ocasionará perjuicio a las plantas. En cambio, los suelos graníticos o pizarrosos son más ácidos y, por consiguiente, aceptan perfectamente el compost ligeramente alcalino.

10.2.3. Parámetros relacionados con las condiciones de operación

10.2.3.1. Utilización de inóculos

Al igual que en el proceso anaeróbico, el agregado de inóculos tiene como objetivo facilitar el inicio del proceso de degradación de la materia en compostaje. A continuación se describen algunas fuentes de inóculos ampliamente probadas para este proceso:

Para materiales orgánicos con exceso de humedad

- Inóculo de suelo fértil: material proveniente del horizonte A del suelo con alta carga biológica.
- Inóculo de sustrato semi-compostado: material en proceso que se encuentra en la etapa mesotérmica. Este tipo de inóculo fue el seleccionado para inocular los lodos residuales de este Trabajo Final.

Para materiales orgánicos con escasez de humedad.

- Inóculo de Caldo de Cultivo: caldo compuesto por estiércol vacuno o bovino y suelo fértil o bien material proveniente del núcleo de un compostaje en la etapa mesotérmica.

11. TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO AERÓBICO

Desde el punto de vista del saneamiento ambiental, la mayoría de las técnicas de compostaje buscan obtener las condiciones consideradas letales para patógenos, parásitos y elementos germinativos. Básicamente, consisten en tres pasos:

- Acondicionamiento inicial
- Proceso aeróbico, por alguna técnica de compostaje.
- Acondicionamiento final

11.1. Acondicionamiento inicial

En una planta de producción de compost, los pasos esenciales para el acondicionamiento de los residuos para ser compostados son: la recepción, la separación de materiales no adecuados para el proceso, la reducción de tamaño, adición o sustracción de humedad, la adición de nutrientes, el ajuste de la relación C/N, control de pH y el agregado de inóculo en caso de ser necesario. En esta etapa también se debe asegurar que los residuos estén libres de contaminantes químicos, en particular metales pesados. Esta situación de riesgo depende principalmente del origen de los residuos y la incertidumbre condiciona el destino final del compost que se obtenga, recomendándose no aplicar a cultivos de alimentos sino sólo en cultivos ornamentales.

11.2. Técnica de compostaje

Existen tres técnicas básicas de compostaje:

11.2.1. Pilas o Hileras dinámicas

Consiste en pilas o hileras aireadas periódicamente con el objetivo de controlar la temperatura y mezclar el material. De esta manera, se obtiene un producto más uniforme.

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”

El volumen de estos montículos depende del equipamiento a utilizar para voltear la masa de compostaje.

En general la pila o hilera tiene una sección transversal de 2 a 2,30 metros de altura por 4,5 a 5 metros de ancho con un tamaño de partícula de aproximadamente 2,5 a 7,5 cm, y un contenido de humedad ajustado entre un 50 y 60 %. Para minimizar la influencia de la temperatura ambiente, es aconsejable no formar pilas o hileras con un ancho de la base inferior a los 2 metros, y como regla general se determina una altura igual a su mitad, de esta forma se obtiene una buena relación superficie/volumen. (Corleto y Menna, 2008)

Normalmente, después de cada volteo, la temperatura de la pila o hilera cae de 5° C a 10° C, pero luego de poco tiempo, la temperatura vuelve a incrementarse. La degradación adecuada puede obtenerse en 3 o 4 semanas. Después se deja el compost para madurarse durante 3 o 4 semanas más sin volteo.

A continuación, se muestran algunas maquinarias utilizado en las operaciones de volteo obtenidas en grandes escalas.



IMAGEN 17. Volteadora a la toma de fuerza del tractor. *Fuente: Corleto B. y Menna M., 2008*



IMAGEN 18. Volteadora de meseta. *Fuente: Corleto B. y Menna M., 2008*

Una diferencia a destacar entre ellas, es que la maquinaria mostrada en la Imagen 17, permite airear el compost respetando la forma de la hilera. En cambio, en la volteadora de meseta mostrada en la Imagen 18, se requieren más espacio para el volteo, ya que transporta el material formando una nueva hilera en frente de la original.

11.2.2. Pilas o Hileras estáticas

Consiste en pilas o hileras, en las cuales el oxígeno se succiona por medio de una red de tuberías perforadas, colocada por debajo del material en compostaje.

La pila o hilera no se voltea, sino que el oxígeno ingresa desde exterior hacia el interior de la pila o hilera mediante la succión de aire por los forzadores.

Luego, el aire que sale de la pila o hilera puede ser recogido y generalmente desodorizado antes de su descarga a la atmósfera, por el traspaso del mismo través de una pila de compost maduro u otras técnicas de desodorización más avanzadas. Además, para un mejor control de los olores, las pilas o hileras suelen cubrirse con una capa de compost tamizada, o con polietileno de baja densidad.

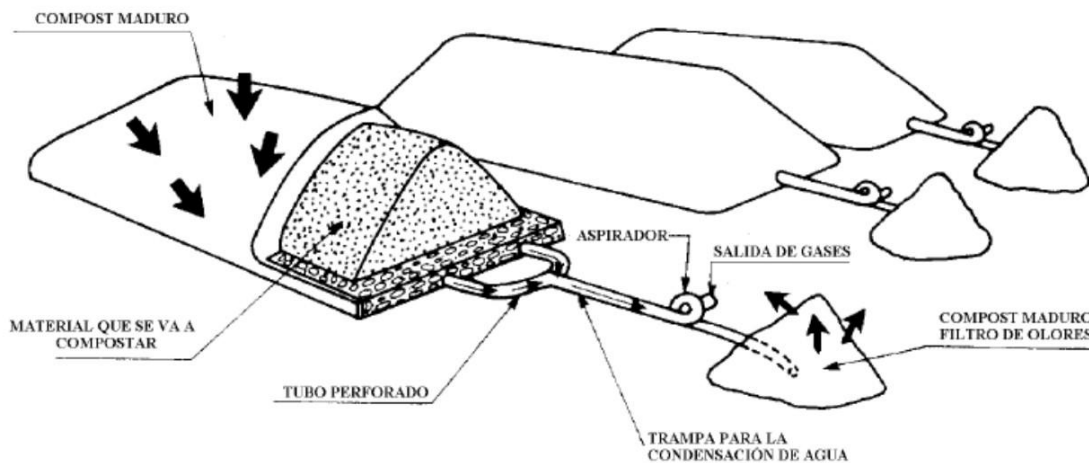


FIGURA 35. Esquema de un sistema de pilas estáticas. Fuente: EPA Federal Register under 40 cfr Part. 503, 1992, "Control de patógenos y atracción de vectores en los lodos de depuradora", 1992.

11.2.3. Reactores Aeróbicos

No se basan en armado de pilas o hileras. Se utilizan cuando los volúmenes de materia orgánica a compostar son importantes, para los cuales sería necesario disponer de superficies muy extensas. Esta técnica se basa en procesar los residuos durante las etapas biológicamente activas en reactores, que son estructuras por lo general metálicas, cilíndricas o rectangulares, donde se mantienen controladas las condiciones ambientales. Posteriormente, la etapa de maduración se lleva a cabo en pilas o hileras de poca duración.

Existen numerosos modelos y tamaños de reactores. Pueden ser rotativos o fijos con algún tipo de mecanismo de agitación. También existen de operación continua y discontinua.

Las ventajas de esta técnica son: minimización de olores, mejor rendimiento, menor costo de mano de obra y menor requerimiento de espacio.

11.3. Acondicionamiento final

Previo al acondicionamiento para el uso o venta del compost final, es de gran importancia que el sustrato haya alcanzado la maduración, esté libre de elementos orgánicos o inorgánicos que dificulten su aplicación y presente una granulometría adecuada y homogénea.

11.3.1. Maduración del Compost

La finalización de la etapa de maduración, y por consiguiente, finalización del proceso biológico aeróbico, pueden ser determinados por medio de dos índices:

- Índice de estabilidad: Se confirma cuando en la etapa de maduración no se producen recalentamientos, disminuyendo la temperatura hasta llegar a la temperatura ambiente.
- Índice de madurez: Se confirma la reducción de la actividad microbiana en la etapa de maduración cuando el carbono no es más hidrolizable. Los parámetros que

brindan esta información varían según los criterios adoptados por Organismos de aplicación y/o investigaciones específicas. Los parámetros que se detallan a continuación, en la Tabla 16 , fueron considerados en el Proyecto de Graduación de la Ing. Bárbara Corleto, FI-UFASTA:

Tabla 16. PARÁMETROS INDICADORES DE LA CONDICION DE MADURES DEL SUSTRATO	
Argentina (Res. Nac. Nº 97/01)	>40% de reducción de SV
EPA	> 38% de reducción de SV

Fuente: Corleto y Menna, 2008

Una vez que se obtiene el compost maduro se procede a la separación del chip y de aquellos materiales que no alcanzaron a degradarse completamente. Para ello, hay muchas alternativas técnicas, pero la separación por cribado es sin duda la menos costosa y la más eficiente.

Las cribas o zarandas, pueden ser vibratorias o de rotación. En particular las rotatorias, presentan un mejor rendimiento cuando se trata de procesar volúmenes importantes. El tamaño de malla de la criba dependerá de la granulometría que se desea obtener, no obstante para utilización agrícola se recomiendan mallas de 1 cm x 1 cm. Para que este proceso, se realice sin inconvenientes es fundamental que el compost presente un contenido en humedad inferior al 20%. Estos procesos de cribado se realizan bajo techo. Si el rechazo que se obtiene del cribado es exclusivamente de desechos orgánicos, el mismo se ingresará nuevamente al sistema de compostaje.

11.3.2. Calidad física, química y biológica del compost

La calidad y uso del compost obtenido se determina según el contenido de materia extraña, el contenido de elementos patógenos y el contenido de metales pesados, los cuales se describen a continuación.

11.3.2.1. Materia extraña

La materia extraña es todo material de dimensiones mayores que 2 mm, resultante de la intervención humana y que tiene constituyentes orgánicos o inorgánicos tales como metales, vidrios y polímeros sintéticos. La presencia de estos materiales determina la seguridad y estética del producto. Desde el criterio de la seguridad, el compost no debe contener ningún material extraño con filo o puntas, o con una medida de más de 3 mm que, como resultado de su uso, pueda causar daño a humanos, animales o plantas.

11.3.2.2. Metales pesados

La concentración de los metales pesados el compost debe estar limitada para que el uso del mismo no altere significativamente las concentraciones presentes en el suelo y consecuentemente no afecte la salud de los seres vivos, ya que estos elementos tienden a generar efectos tóxicos sobre los mismos y algunos de ellos son bioacumulables en los tejidos. En la Tabla 17 se presentan los rangos aceptables del contenido de metales pesados establecidos por la normativa nacional e internacional de referencia:

Tabla 17. RANGOS DE METALES PESADOS ADMISIBLES SEGÚN DISTINTAS NORMATIVAS	Resolución Nacional 97/2001 (mg/Kg)	EPA, 1993 (mg/Kg)	Unión Europea (mg/Kg)
Cadmio	20-40	39-85	20-40
Cromo	1000-1500	1200-3000	1000-1750
Cobre	1000-1750	1500-4300	1000-1750
Mercurio	16-25	17-57	16-25
Níquel	300-400	420	300-400
Plomo	750-1200	300-840	750-1200
Zinc	2500-4000	2800-7500	2500-4000

Fuente: Corleto y Menna, 2008

11.3.2.3. Microorganismos patógenos

Los microorganismos patógenos en el compost provienen, principalmente, de la materia prima utilizada en el proceso, y son potencialmente peligrosos para la salud humana. Por

lo tanto, la reducción de organismos patógenos resulta un paso deseable e importante en el diseño del proceso de compostaje, que se logra cuando el proceso alcanza la etapa termogénica, dado que éstos microorganismos mueren cuando se exponen a temperaturas elevadas.

Existen normativas específicas de tiempo/temperatura que fijan la duración de etapa termogénica para asegurar el control y por consiguiente, la reducción de los patógenos en los sistemas de compostaje, que se citan a continuación:

Tabla 18. INDICES DE HIGIENIZACIÓN DEL SUSTRATO OBTENIDO EN EL PROCESO AEROBICO	Temperatura	Técnica	Días y volteos
EPA	≥ 55° C	Hilera	15 días y 5 volteos
		Reactor	3 días
Alemania	55° C	Hilera	14 días
	65° C	Hilera	7 días
	60° C	Reactor	7 días
Suecia	55° C	Hilera	7 días
	60° C	Reactor	6 horas

Fuente: Corleto y Menna, 2008

11.4. Acopio y empaque final

Finalizado el proceso aeróbico, realizado el cribado y determinada la calidad del compost obtenido, se recomienda acopiarlo bajo techo, ya que el compost expuesto a la intemperie pierde rápidamente nutrientes esenciales, por lavado y lixiviación. Si no se dispone de la infraestructura necesaria, una alternativa es cubrir los acopios con materiales impermeables. En referencia al empaquetado, son muchas las alternativas actualmente disponibles que aseguran el mantenimiento de la calidad del producto. Se debe evitar, el empleo de cualquier tipo de bolsa o recipiente que haya contenido agrotóxicos o cualquier otra sustancia química.

12. ASPECTOS AMBIENTALES DEL TRATAMIENTO AEROBICO

Los aspectos ambientales más importantes que se deben controlar durante el proceso aeróbico son:

12.1.1. Generación de lixiviado

Durante el proceso de compostaje, sobre todo en los primeros días o después de una intensa lluvia, se producen líquidos lixiviados que deben ser recolectados para su tratamiento.

12.1.2. Emanación de gases y olores desagradables

Durante las etapas biológicamente activas se producen olores desagradables. En la etapa mesotérmica, la principal causa de olor se basa por la presencia de bacterias anaeróbicas en algunos sectores o en la totalidad de la pila. En cambio, en la etapa termogénica donde el pH se vuelve alcalino, los olores se deben principalmente a la emanación de amoníaco. Estos gases, tienden a escapar por el lomo de la pila y pueden desprenderse en concentraciones que pueden llegar a ser letales en ambientes cerrados, por lo que se recomienda en estos casos el uso de mascarillas. Si el proceso se desarrolla en reactores, el aire de la ventilación del compost se suele tratar en biofiltros. Por el contrario, si el método utilizado para llevar a cabo el tratamiento aeróbico es el de pilas o hileras dinámicas, lo más conveniente es prever en el diseño de la planta una barrera forestal alrededor del área de trabajo, para evitar molestias a vecinos.

13. VENTAJAS DEL TRATAMIENTO BIOLÓGICO AERÓBICO

Este es un tratamiento que puede implementarse con tecnología simple y costo relativamente bajo, que da origen a un material con capacidad de mejorar suelos para la agricultura. Según Corleto y Menna, 2008, la práctica de compostaje tiene las siguientes ventajas:

Beneficios ambientales

- Disminución de aproximadamente el 50% del volumen de materia orgánica a disponer.
- Estabilización biológica del producto final, libre de patógenos, huevos de insectos, y otros organismos no deseados que suelen estar presentes en los residuos orgánicos.
- Se obtiene un producto que actúa como un mejorador de suelos, compensa la erosión, mantiene a las tierras productivas y mejora los cultivos.

Beneficios operativos

- Puede aplicarse como material de cobertura en la disposición final de los Residuos Sólidos Urbanos.

Beneficios socio-económicos

- Favorece la implementación de Proyectos MDL.
- Generación de puestos de trabajo que traería aparejada su producción a gran escala.
- Generación de microemprendimientos productivos.

14. NOTA AL FINAL DEL CAPITULO II

Los fundamentos teóricos que se presentaron en este capítulo indican que los tratamientos biológicos anaeróbicos y aeróbicos son tecnologías adecuadas para el tratamiento de los residuos de la actividad ganadera intensiva.

La incorporación al suelo del efluente obtenido del tratamiento anaeróbico puede llegar a tener algún efecto beneficioso sobre la fertilidad de los suelos, pero no en todos los casos es recomendable su aplicación directa, ya que según sea su composición, el efecto puede ser perjudicial, ante el riesgo de contaminación por incorporación de organismos patógenos a los productos cultivados resultando un peligro a la Salud Pública en caso de que éstos estén destinados al consumo.

Por tal razón, el tratamiento combinado anaeróbico/aeróbico es una alternativa aún más beneficiosa para la gestión integral de los residuos orgánicos provenientes de la intensificación ganadera, ya que aprovecha el carácter de generación energética del proceso anaeróbico y completa el tratamiento del efluente residual con el proceso aeróbico, que por su carácter exotérmico, alcanza temperaturas adecuadas para el control de patógenos, y además, brinda un producto útil y valioso como enmienda orgánica.

CAPITULO III

MATERIALES Y METODOS

CAPITULO III

MATERIALES Y METODOS

15. DISEÑO EXPERIMENTAL

En primer lugar, se diseñó un plan de trabajo para estudiar el periodo de arranque del tratamiento de estiércol generado en la cría intensiva de ganado porcino.

El estudio analítico-experimental comprende el tratamiento de dos procesos biológicos, biodigestión anaeróbica del estiércol porcino y compostaje de los lodos residuales de la biodigestión. Toda la experiencia se desarrolló a temperatura ambiente.

La preparación del proceso anaeróbico consistió en la carga, control y evaluación del comportamiento de dos biodigestores cuyos sustratos difieren en el grado de dilución de la materia prima, siendo el contenido de estiércol del Biodigestor 1 (B1) el doble que el del Biodigestor 2 (B2). La experiencia también incluyó la carga y evaluación de un tercer biodigestor que ofició como *testigo* del desarrollo del proceso anaeróbico.

Para estudiar el arranque del tratamiento anaeróbico mediante observación, medición, control y comparación de comportamiento de los biodigestores B1 y B2, se previó un período de práctica experimental de laboratorio de 15 días, y una vez cumplido se descargaron para continuar con el tratamiento de los lodos residuales.

Para estudiar el comportamiento del tratamiento aeróbico mediante observación, medición y control desde el momento que se le incorpora los lodos residuales del tratamiento anaeróbico a un sustrato semi-compostado de yerba mate residual, se desarrolló un período de práctica experimental de laboratorio de 20 días.

La combinación de los tratamientos anaeróbico/aeróbico, es lo que le da el nombre a este proceso y justifica el nombre de este Trabajo de Proyecto Final.

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
"Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo"

Se completo así, un total de 35 días de estudio en escala laboratorio.

Se evaluó la degradación de materia orgánica en ambos procesos biológicos a través de la medición y determinación analítica en laboratorio de parámetros físicos, químicos y microbiológicos.

La Figura 36 muestra el esquema de trabajo adoptado desde el inicio de la experiencia.

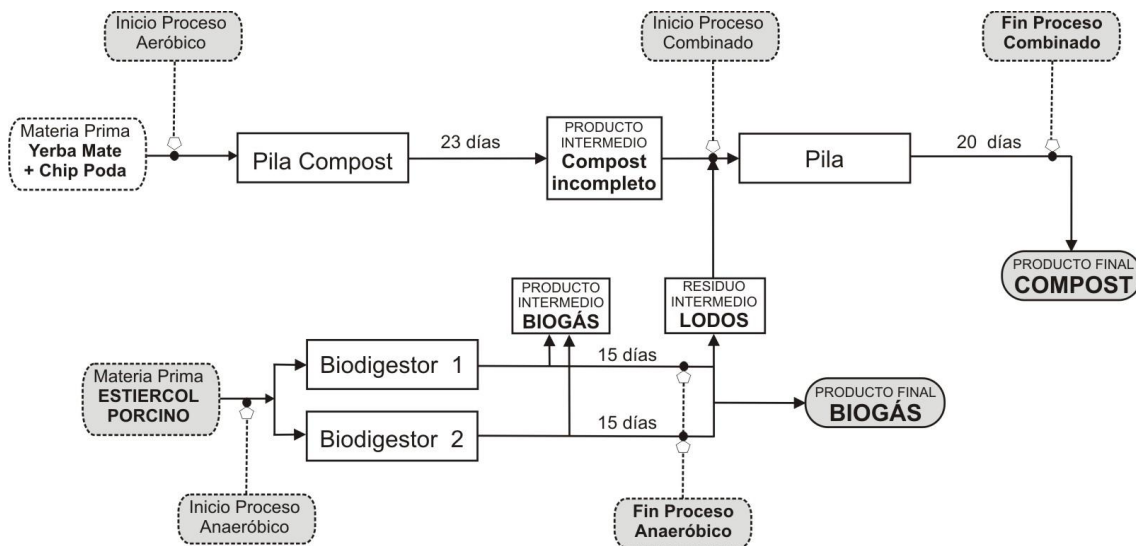


FIGURA 36. Esquema de trabajo adoptado para la realización de la experiencia.

15.1. Ámbito de trabajo e infraestructura disponible

El trabajo experimental se realizó en el laboratorio de investigación del Grupo de Estudio de Energías Alternativas y Ambiente (GEEAA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata, en Av. Juan B. Justo 4302. Para ello se utilizaron los siguientes materiales, accesorios e instrumental:

Sistema Biodigestor

- 2 frascos de vidrio de 3000 ml con tapa. Las tapas de los frascos están perforadas donde traspasa un conducto, que permite la extracción del biogás generado.
- 2 llaves de paso de gas de 1/4" (6,35 mm), a la salida de los conductos de cada biodigestor.

Sistema Gasómetro-Acumulador

- 2 frascos de vidrio de 3000 ml con tapa. Las tapas de los frascos están perforadas donde traspasan dos conductos, cuya función es: el conducto de menor longitud permite la salida de agua desplazada por el biogás que ingresa por el conducto de mayor longitud.
- 2 recipientes plásticos de 3000 ml con tapa aunque no estancos. Estos tienen una perforación en la parte lateral inferior por donde ingresa el agua desplazada desde el cierre hidráulico. Si se igualan los niveles de agua, el volumen de agua que ingresa a este recipiente es igual al volumen, a presión atmosférica, de biogás generado en el biodigestor, por lo que oficia de gasómetro (medidor de gas).
- 3 llaves de paso de gas de 1/4" (6,35 mm), conformando un sistema concentrador/selector del gasómetro cuyo biogás se va a medir.
- 3 conexiones en T de 1/4" en el sistema concentrador/selector.

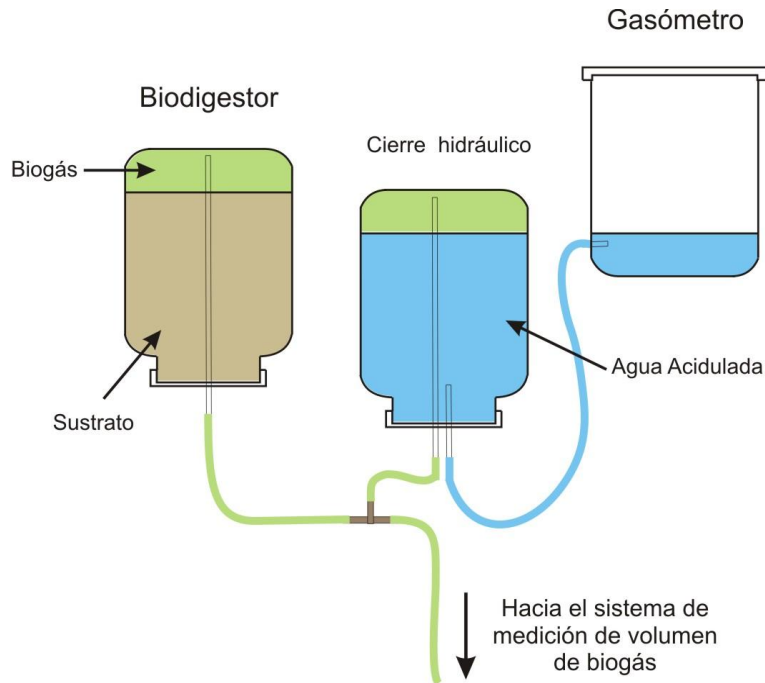


FIGURA 37. Esquema del sistema biodigestor y sistema gasómetro-acumulador

Accesorios

- Manguera tubo de látex de 5 mm de diámetro interno, para interconectar todos los sistemas.
- Grasa siliconada, para asegurar la estanqueidad de las conexiones de todo el sistema.
- Pegamento de contacto, para el sellado de los biodigestores.
- Herramientas en general
- Elementos de protección personal

En la Imagen 19, se presentan los materiales y accesorios utilizados para el armado de los sistemas antes mencionados. Nótese que el frasco, ubicado en la izquierda de la imagen, perteneciente al sistema gasómetro-acumulador se ha dispuesto de forma invertida porque se encuentra en la *prueba de estanqueidad*. La estanqueidad fue verificada para todos los recipientes del sistema que deben asegurarla antes de la puesta en marcha de la experiencia.



IMAGEN 19. Materiales, herramientas y accesorios para el armado del sistema de tratamiento biológico anaeróbico. En los extremos los biodigestores y al centro los gasómetros y los cierres hidráulicos; los primeros receptores del agua desplazada por el biogás desde los segundos.

Sistema de medición de volumen de biogás

- 3 buretas de 100 ml cada una interconectadas por sus partes inferior y superior.
- 1 frasco nivel conectado en la parte inferior de las buretas que se usa para desplazar el agua acidulada por principio de *vasos comunicantes*. El desplazamiento del agua acidulada en las buretas será hacia abajo (extracción) para ingresar el biogás por succión, y hacia arriba (ingreso) para expulsar el biogás, ya medido, hacia el aparato ORSAT.

Sistema de medición de volumen de dióxido de carbono

- 1 aparato ORSAT compuesto por:
 - Una bureta de 100 ml
 - Una bureta de absorción
 - Un frasco nivel
 - Un robinete de tres vías
 - Estructura soporte de madera



IMAGEN 20. Izq: Sistema de medición de volumen de biogás y de dióxido de carbono. Der: Aparato ORSAT.

Plataformas y accesorios para la producción de compost:

- 1 plataforma rectangular con forma de bandeja de chapa de cinc protegidas con pintura epoxi, cuyas dimensiones son: 0,84 m de ancho, 1,25 m de largo y 0,045 m de profundidad.
- Palas de jardín para el volteo manual de las pilas.
- Pulverizador para rociar las pilas con agua.

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”

Instrumental - Reactivos de laboratorio:

- pHmetro, TES1380
- Termómetro con punta de lanza, YF 1062
- Balanza de capacidad 15 Kg. y resolución 0,005 Kg., kretz 5530
- Recipiente graduado de 3000 ml
- Vasos de precipitados de distintas capacidades
- Acido Clorhídrico (HCl)
- Hidróxido de Potasio (KOH)
- Agua destilada



IMAGEN 21. Instrumental y reactivos de laboratorio utilizados en el control de la experiencia. Izq. pHmetro y buffers de calibración. Der. Termómetro y reactivos (HCl y KOH).

15.2. Actividades previas a la Experiencia de Laboratorio

Determinación de los materiales y accesorios necesarios y disponibles para comenzar la experiencia. Esto incluye los elementos para la limpieza y el acondicionamiento del sistema biodigestor, del sistema gasómetro-acumulador, del sistema de medición del biogás generado y del aparato ORSAT.

Gestión de la materia prima a tratar: Se solicitó el estiércol porcino al criadero de cerdos Agroporc de la empresa Supermercados Toledo S.A. (Ruta 55, km. 3), obteniéndose una respuesta positiva por parte de la empresa. Luego, se acordó la fecha para la entrega del estiércol.

Acondicionamiento del sistema gasómetro-acumulador, del sistema de medición del biogás generado y del aparato ORSAT. Esta tarea consistió en retirar y reponer todas las conexiones de mangueras de látex, preparar 3500 ml de agua acidulada (5% HCl) para el sistema gasómetro-acumulador, 250 ml de agua acidulada para el frasco nivel del aparato ORSAT y 165 ml de solución de KOH (0.3 g/ml) para la bureta de absorción del mismo dispositivo.

Armado de pila de yerba mate residual+chip de poda. Se solicitó la colaboración de familiares y amigos para obtener yerba mate residual en cantidad suficiente y se armó una Pila utilizando como soporte chip de poda ya disponible en el laboratorio del GEEAA, remanente del Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental "*Tratamiento Biológico Aerobio de los Residuos Generados en el Procesamiento Industrial de la Papa*", de la hoy Ing. Bárbara Corleto. La Pila fue controlada periódicamente en aireación, humedad y temperatura, manteniendo el nivel térmico por encima de la temperatura ambiente, e incrementándose con cada nuevo aporte de yerba residual (materia orgánica, humedad y aireación por mezcla). Mediante la observación del comportamiento térmico se infiere el grado de actividad biológica. Se logró obtener un sustrato semi-compostado para ser utilizado como sustrato receptor de los lodos de los biodigestores.

En la Imagen 22 se muestra la pila en proceso de compostaje a la que se ha incorporado mas yerba mate residual y aún no se ha mezclado.



IMAGEN 22. Yerba mate residual recientemente incorporada a la pila de compost, y aún no mezclada con el sustrato. Se destacan los chips de poda que oficia de material estructurante.



IMAGEN 23. Mezcla manual de yerba mate residual recientemente incorporada al sustrato de la pila en proceso de compostaje.

Puesta a punto del ORSAT y realización de ensayos con distintas muestras de gases. Se verificó la estanqueidad del aparato ORSAT. Luego se determinó el porcentaje de dióxido de carbono en dos muestras de aire de pulmón humano y en una muestra de biogás obtenido de un biodigestor del laboratorio que se encontraba en operación con buena producción de biogás combustible.

Puesta a punto de los biodigestores. Vaciado y lavado de los mismos.

Recepción de la materia prima. La empresa se encargó de transportar la materia prima hacia el Laboratorio de investigación del GEEAA, en dos bidones de 10 L cada uno. Uno de ellos contenía estiércol de macho terminador y otro estiércol de recría.

15.3. Desarrollo de la experiencia

15.3.1. Determinación de la densidad de la materia prima

En primer término, se determinó la densidad de cada estiércol. Para medir peso y volumen, se utilizó la balanza digital y el recipiente graduado de 3000 ml. Luego, se mezclaron 3 litros de cada estiércol, y se determinó la densidad de la mezcla de la misma manera. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19. DENSIDAD DEL SUSTRATO INICIAL DEL TRATAMIENTO ANAEROBICO			
	Estiércol Recría	Estiércol Terminador	Estiércol Mezcla
Peso (kg)	2,790	2,885	1,885
Volumen (l)	3,000	3,000	2,000
Densidad (kg/l)	0,930	0,961	0,942

La mezcla se realizó de forma manual procurando que resulte lo más homogénea posible. Para el desarrollo de esta experiencia de laboratorio, actividad relevante para este Proyecto Final, se utilizó como sustrato a tratar la mezcla de los estiércoles (columna de la derecha de la Tabla 19).

15.3.2. Carga de Biodigestores

Se cargaron dos biodigestores (B1 y B2) con distinto grado de dilución, como indica la Tabla 20:

Tabla 20. CONTENIDO EN VOLUMEN Y PORCENTAJE DE LOS BIODIGESTORES			
	Estiércol	Agua	Unidades
B1	2	0	L
	100	0	%
B2	1	1	L
	50	50	%

Luego de la carga se cerraron sellando las tapas con pegamento de contacto, y el conducto, por donde se extrae el biogás del proceso, se conectó a un tramo de manguera con una llave de paso en su extremo. Seguidamente, ambos biodigestores se dispusieron boca abajo, para verificar y controlar la ausencia de pérdidas por la tapa durante todo el proceso anaeróbico, y se conectaron con al sistema gasómetro-acumulador por medio de manguera tubo de látex. (Imagen 24)

Seguidamente, se llenó el biodigestor testigo del proceso, con el mismo sustrato del B1 para comparar cualquier diferencia en el desarrollo del proceso anaeróbico, y además aportar un volumen adicional de biogás para las pruebas de combustión.

La experiencia continuó con el seguimiento del proceso de biodigestión durante 15 días, detallada más adelante en el punto 15.4.

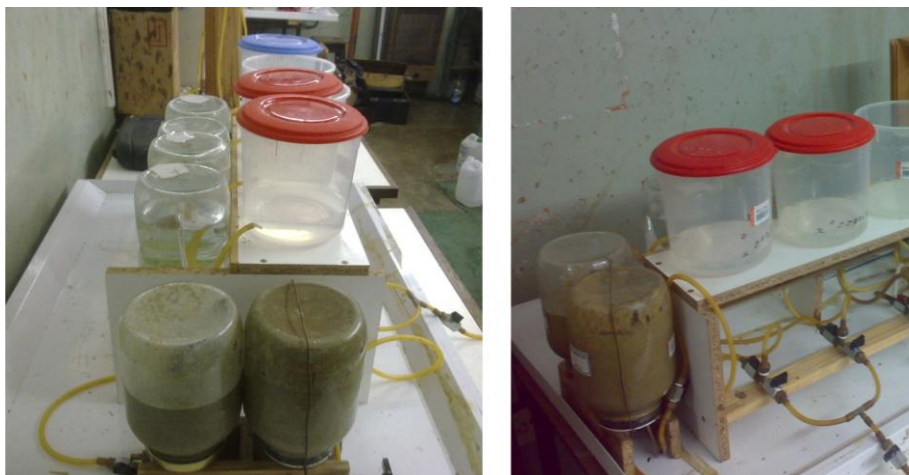


IMAGEN 24. Sistema de tratamiento anaeróbico visto desde el extremo donde se ubican los biodigestores. En la imagen de la izquierda, por encima de los biodigestores se ven la hilera de los gasómetros (izq.) y de los recipientes receptores del agua desplazada por el biogás producido (der.).



IMAGEN 25. Biodigestor que ofició de testigo del tratamiento anaeróbico durante todo el periodo de proceso.

15.3.3. Descarga de Biodigestores

Luego de finalizado el tratamiento anaeróbico, se procedió a la descarga de los biodigestores. Los lodos residuales de cada biodigestor se mezclaron y, seguidamente, se pesaron 2 litros para determinar la densidad de la mezcla de lodos. Esta determinación siguió la misma metodología utilizada para determinar la densidad de la materia prima. Los resultados se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. DENSIDAD DE LA MEZCLA DE LOS LODOS RESIDUALES DEL TRATAMIENTO ANAEROBICO	
	Lodo Mezcla
Peso (kg)	2,080
Volumen (l)	2,000
Densidad (kg/l)	1,04

15.3.4. Armado de Pila aeróbica

Se armó una pila para tratamiento aeróbico compuesta por:

- Sustrato semi-compostado de yerba mate residual+chip de poda
- Mezcla de lodos obtenidos de la biodigestión del estiércol

La composición porcentual y en peso de la pila se presenta en la Tabla 22 :

Tabla 22. COMPOSICION PORCENTUAL Y EN PESO DE LA PILA DEL TRATAMIENTO COMBINADO		
	Sustrato semi-compostado	Lodo Mezcla
Porcentaje (%)	89,272	10,727
Peso (Kg)	17,310	2,080

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”

En primer lugar, se pesó el sustrato semi-compostado y luego se volvió a disponer sobre la bandeja en forma extendida, y continuación, se le incorporó el lodo mezcla (Imagen 26).



IMAGEN 26. Incorporación del lodo mezcla al sustrato semi-compostado de yerba mate residual+chip de poda

Seguidamente, se mezclaron los dos componentes de forma manual procurando que la mezcla resultante sea lo más homogénea posible. (Imagen 27)



IMAGEN 27. Izq: Mezclando (sobre la plataforma de compostaje) el sustrato a tratar aeróbicamente: lodos + yerba mate semi-compostada + chip de poda. Der: pila armada luego de mezclar el sustrato.

15.4. Seguimiento de los Procesos

El seguimiento de los procesos biológicos puestos en marcha en el marco de este Trabajo Final, abarcó dos tipos de controles:

- Controles in situ que se llevaron a cabo diariamente en el laboratorio de Investigación GEEAA, cuyo Director, el Ing. Máximo Menna, es Director de este Trabajo Final.
- Controles analíticos realizados en Fares Taie Instituto de Análisis, con asesoramiento y supervisión de la Ing. Bárbara Corleto, co-Directora de este Trabajo Final.

Cabe aclarar que todas las actividades de control del proceso las realicé personalmente, supervisada por las personas mencionadas anteriormente.

15.4.1. Controles diarios in situ

Estos controles consistieron en la medición diaria in situ de los siguientes parámetros característicos del desarrollo de cada uno de los procesos biológicos de los distintos tratamientos aplicados:

15.4.1.1. Tratamiento anaeróbico

- Volumen de biogás generado
- Volumen de dióxido de carbono en el biogás generado



IMAGEN 28. Medición de volumen de biogás generado.

15.4.1.2. Tratamiento combinado anaeróbico/aeróbico

Se midieron los siguientes parámetros de control:

- Temperatura interna de la pila: se midió en el centro de la misma.
- Temperatura ambiente: se midió cercana a la pila.
- pH: se midió una vez por día.
- Aireación: se verificó la necesidad de proveer oxígeno atmosférico a la pila y cuando fue necesario se procedió a voltearla.
- Humedad: se verificó la necesidad de proveer agua a la pila y cuando fue necesario se procedió a humedecerla.



IMAGEN 29. Izq: Extrayendo una muestra del sustrato bajo tratamiento aeróbico mediante selección por cuarteo. Der: Instrumento digital, reactivos y recipientes utilizados para la determinación diaria del pH del sustrato bajo tratamiento aeróbico.

15.4.2. Controles Analíticos

15.4.2.1. Tratamiento anaeróbico

- Muestreo del sustrato inicial: Previo al llenado de los biodigestores, se tomaron dos muestras, una de cada sustrato, y se las colocó en un recipiente de vidrio esterilizado.
- Muestreo de los lodos residuales: Previo al mezclado de los lodos, se tomaron dos muestras, una de cada lodo, en frascos plásticos esterilizados con tapa a rosca.

15.4.2.2. Tratamiento anaeróbico/aeróbico combinado:

- Muestreo del sustrato inicial de la pila: Luego del armado de la pila se procedió a mezclar a fin de homogeneizarla y, a partir de un cuarteo se extrajo una muestra, la cual se colocó en un frasco de plástico similar a los utilizados para el muestreo de los lodos residuales.
- Muestreo del sustrato final de la pila: Luego de concluido el tratamiento, se extrajo una muestra procediendo de igual manera que para el sustrato inicial.

Las muestras extraídas fueron llevadas al laboratorio, donde se inició de forma inmediata su tratamiento analítico. Cabe mencionar que la prestación del laboratorio y de los reactivos fue otorgada de manera gratuita.

15.4.2.3. Especificaciones técnicas de las determinaciones analíticas

En la Tabla 23 se presentan los parámetros para el control para cada tratamiento y sus respectivas técnicas analíticas.

Los parámetros y técnicas de análisis de las muestras relativos al tratamiento anaeróbico fueron tomados del esquema de trabajo de la publicación “Seguimiento del proceso de generación de biogás en digestores de laboratorio mediante la cuantificación de gases y determinación de parámetros simples de laboratorio” del grupo GEEAA-FI-UNMDP, mientras que para el tratamiento combinado anaeróbico/aeróbico fueron tomados del Proyecto de Graduación de la Ing. Bárbara Corleto.

Tabla 23. PARAMETROS DE CONTROL Y TECNICAS ANALITICAS		
Parámetro	Técnica analítica	Tratamiento
Sólidos Totales (ST)	SM* 2540 B. Sólidos totales secados a 103-105 °C	Anaeróbico y Combinado
Sólidos Volátiles (SV)	SM 2540 E. Sólidos fijos y volátiles por ignición a 550°C	Anaeróbico y Combinado
Alcalinidad	SM 2320. Método de titulación electrométrica a pH 3.7	Anaeróbico
Acidez	SM 2310. Método de titulación electrométrica a pH 8.3	Anaeróbico
pH (lodo)	SM 4500 H-B. Método electrométrico	Anaeróbico
pH (compost)	EPA, SW 846. Wastes - Hazardous Waste - Test Methods	Combinado
Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)	SM 4500 B. Método de titulación con ácido clorhídrico 0.1 N.	Combinado
Nitritos	SM 4500 NO-2. Método Colorimétrico	Combinado
Nitratos	ISO** 7890. Método colorimétrico	Combinado
Fosforo Total	SM 4500 P- D. Cuantificación por espectrofotometría visible.	Combinado
Potasio	SM 3500-K C. Método de Electrodo Selectivo	Combinado

*SM: Standard Methods

** ISO: International Organization for Standardization

16. NOTA AL FINAL DEL CAPITULO III

La metodología operativa fue diseñada con la finalidad de alcanzar los objetivos planteados y, por lo tanto, lograr un adecuado desarrollo y control de los procesos propuestos para estudiar la etapa de arranque del tratamiento biológico del estiércol generado en la cría intensiva de cerdos.

Conté con la infraestructura necesaria para el desarrollo metodológico previsto, y que permitieron alcanzar, en tiempo y forma, los objetivos previstos.

Como mencioné en el punto 15.2, realicé un aprendizaje previo basado en actividades prácticas experimentales de laboratorio, acerca del desarrollo del proceso biológico aeróbico, conocimientos que no fueron brindados en el transcurso de la carrera, y que me permitieron producir el sustrato semi-compostado de yerba mate residual necesario para el tratamiento biológico combinado propuesto. Para esto, conté con la asistencia y el asesoramiento del Director, Ing. Máximo Menna, quién propuso esta actividad práctica experimental previa basado en la observación del desarrollo del proceso, familiarizándome con cambios y situaciones observables que posteriormente me permitieron tomar decisiones inmediatas para intervenir con criterio en el control del proceso aeróbico, incluyendo la anticipación a las necesidades de intervención para mantenerlo dentro de los límites de control.

También en otra situación similar de aprendizaje extra universitaria, ya no previa sino en pleno desarrollo de las actividades del Proyecto, he realizado personalmente las determinaciones analíticas que requiere el control de los procesos puestos en marcha. Para esto, conté con el asesoramiento de la co-Directora, Ing. Bárbara Corleto, quién a su vez es integrante del personal técnico profesional del laboratorio Fares Taie, lo que me facilitó desempeñarme adecuadamente en las determinaciones analíticas de laboratorio, realizadas simultáneamente al desarrollo de los tratamientos biológicos que se aplicaron en este Trabajo Final.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

17. TRATAMIENTO BIOLÓGICO ANAERÓBICO

Los biodigestores B1 y B2 se cargaron con una temperatura ambiente de 18°C y se los mantuvo en proceso durante 15 días, de forma que se pueda comparar el comportamiento del arranque y días posteriores de los dos grados de dilución.

En los primeros 12 días la temperatura ambiente se mantuvo en el rango de 17±1°C, y los últimos tres días del proceso se elevó, fluctuando dentro de un rango de 21±1°C.

17.1. Controles diarios

A continuación se describe el comportamiento de cada biodigestor en relación al volumen de biogás generado y el volumen de dióxido de carbono obtenido.

17.1.1. Volumen de biogás generado

En el Gráfico 1 se presenta la evolución de generación de biogás de ambos biodigestores y la temperatura ambiente en todo el periodo del proceso.

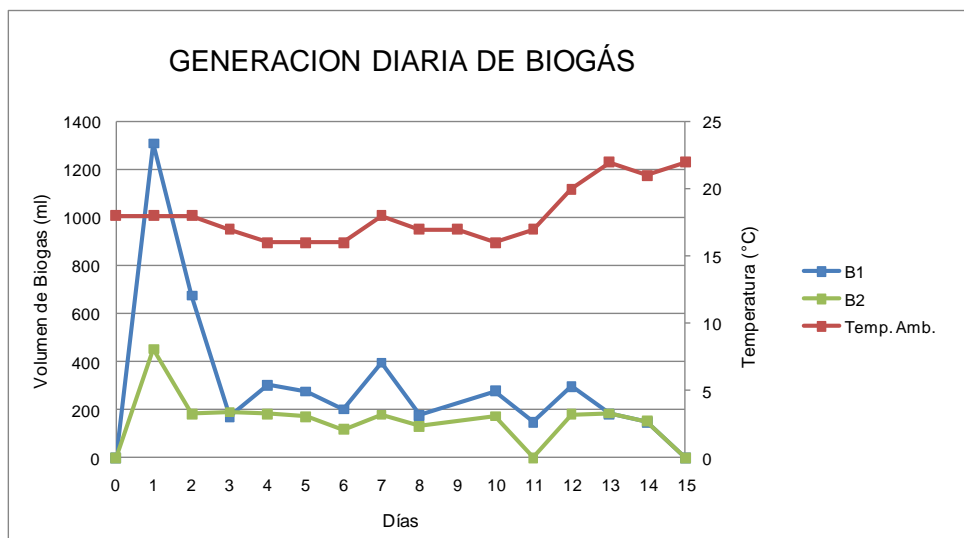


GRÁFICO 1. Generación diaria de biogás de los biodigestores B1 y B2

Comparando los comportamientos de ambos biodigestores en relación a la generación de biogás se observa que el biodigestor B1 en la primera jornada, luego de la carga, tiene un incremento importante y de hecho es la máxima tasa de generación que se obtuvo en esta experiencia, alcanzando un volumen de 1310 ml, mientras que el biodigestor B2 generó 452 ml. Una vez superado estos picos de generación ambos biodigestores se mantuvieron en una tasa diaria de generación de biogás más estable, con influencia de la temperatura ambiente y manteniéndose en una rango de 150 a 300 ml para el biodigestor B1, y en una rango de menor amplitud de 110 a 190 ml para el biodigestor B2.

Se destaca en el séptimo día un pico de generación de biogás que excede el rango mencionado anteriormente en el B1 y un aumento (que se mantiene en el rango) en el biodigestor B2 que se corresponden con un aumento en la temperatura ambiente. Esta influencia de la temperatura comprueba la sensibilidad a las variaciones térmicas del proceso de biodigestión anaeróbica.

El biodigestor B2 en el día 11 presenta una generación prácticamente nula que el método de medición no permitió cuantificarla y que se considera como consecuencia a la disminución de la temperatura ambiente en el día anterior, que aunque ya se encontraba en as-

censo en el momento de la medición, aún no se reflejaba en el comportamiento del biodigestor (inercia térmica).

En el siguiente grafico se observa el volumen de biogás acumulado en los 15 días de proceso para cada biodigestor. El B1 generó 4557,00 ml de biogás mientras que el B2 generó 2291,60 ml en el periodo mencionado. Es decir, el B1 obtuvo casi el doble del volumen total del B2.

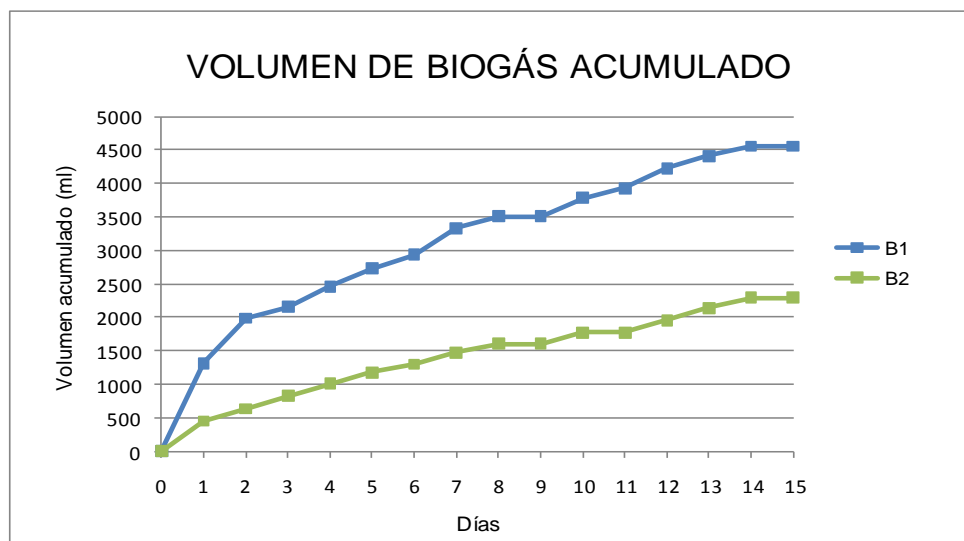


GRÁFICO 2. Volumen de biogás acumulado para el B1 y el B2

El componente del biogás de interés energético es el Metano, que se evalúa indirectamente como diferencia entre el volumen de biogás y el volumen de dióxido de carbono. Una vez cargado el biodigestor, en su interior contendrá el sustrato a tratar en la parte inferior y aire en la superior. En el arranque el Metano está ausente, y en los siguientes días se van dando las etapas ya comentadas en el Capítulo III de Fundamentos Teóricos, hasta que se dan las condiciones para la etapa metanogénica, por lo que la diferencia con el volumen de dióxido de carbono en los primeros días del proceso anaeróbico no es representativa de Metano, y se desestima su evaluación en tal período.

17.1.2. Volumen de dióxido de carbono obtenido

Los siguientes gráficos muestran la variación diaria del volumen de dióxido de carbono en contraste con el comportamiento de generación de biogás para cada biodigestor por separado.

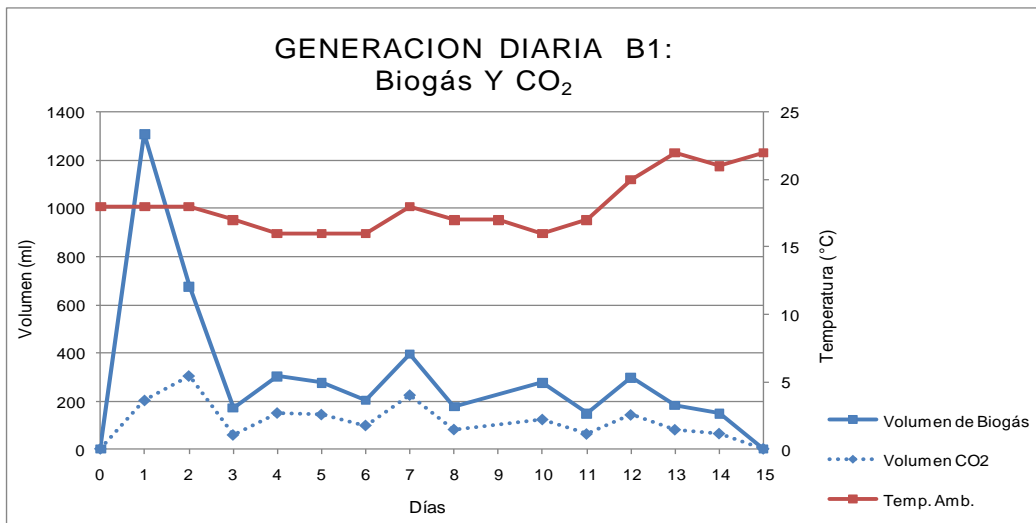


GRÁFICO 3. Generación diaria de biogás y dióxido de carbono del Biodigestor 1

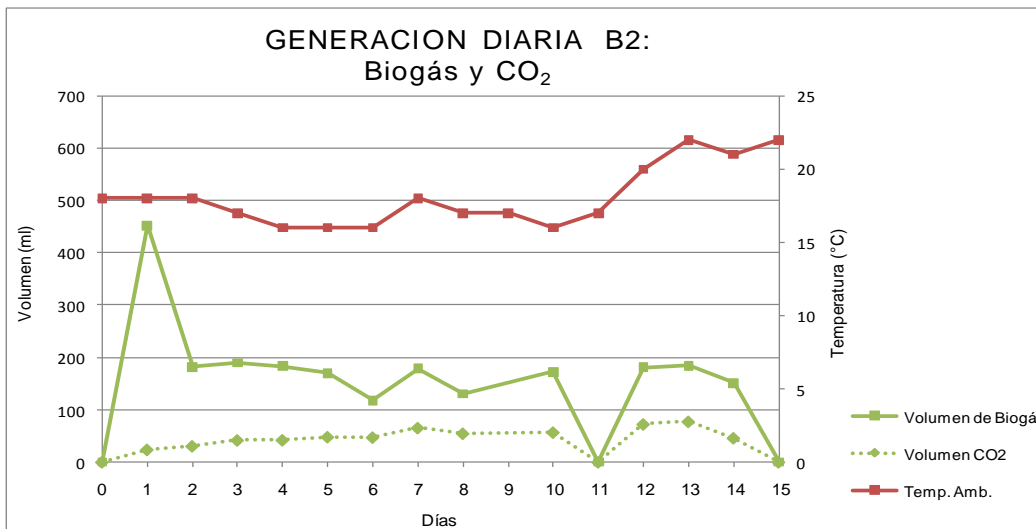


GRÁFICO 4. Generación diaria de biogás y dióxido de carbono del Biodigestor 2

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
***“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”***



Comparando los comportamientos de ambos biodigestores en relación al volumen de dióxido de carbono obtenido se observa que el B1 presenta una tendencia muy similar al comportamiento de generación de biogás, mientras que en el B2 no es tan así.

La mayor proporción de dióxido de carbono obtenida en esta experiencia fue del 57%, correspondiente al B1 en el séptimo día con volúmenes de biogás y dióxido de carbono de 395,20 ml y de 225,26 ml. Para el B2, la mayor proporción que se obtiene es del 42%, presente en el día octavo y décimo tercero, con volúmenes de 130 ml de biogás y 54,60 ml de dióxido de carbono y 184 ml de biogás y 77,28 ml de dióxido de carbono respectivamente.

Por el contrario, la menor proporción medida de dióxido de carbono en esta experiencia corresponde a un 5,27% perteneciente al biodigestor B2 en el primer día de experiencia, con volúmenes de biogás y dióxido de carbono de 452 ml y de 23,81 ml respectivamente. Con respecto al B1, la menor proporción de dióxido de carbono medida corresponde también al primer día con volúmenes de biogás y dióxido de carbono de 1310 ml y de 203,05 ml respectivamente. Luego del primer día, la proporción de dióxido de carbono se mantuvo en un rango entre 34% y 57% para el B1, y en un rango de mayor amplitud con una media de 16% y 42% para el B2.

17.2. Controles analíticos

17.2.1. Resultados iniciales y finales

En la Tabla 24 se presentan los parámetros analíticos determinados para caracterizar los sustratos iniciales de cada biodigestor:

Tabla 24. CARACTERISTICAS DEL SUSTRATO INICIAL		
	B1	B2
ST (%)	16,05	6,58
SV (%)	12,88	5,32
SV de ST (%)	80,28	80,85
Humedad (%)	83,95	91,80
Cenizas (%)	3,17	1,26
pH	6,78	6,47
Alcalinidad (mg/L de CaCO ₃)	10941,6	8122,3
Acidez (mg/L de CaCO ₃)	4072,5	3123,2

Los resultados iniciales de pH, alcalinidad y acidez obtenidos se corresponden con lo esperado según la bibliografía específica respecto de las características de estiércol porcino.

Según el índice de estabilidad de Borja mencionado en el Capítulo de Fundamentos Teóricos, del sustrato del B1 se obtuvo un valor de 0,37 mientras que para el B2 este valor fue de 0,38. Si bien estos valores están cercanos a la condición de falla de 0,40, ambos están por debajo del mismo.

En la Tabla 25 se presentan los parámetros analizados para determinar las características de los lodos obtenidos en cada biodigestor.

Tabla 25. CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS RESIDUALES DE LA BIODIGESTIÓN		
	B1	B2
ST (%)	13,40	4,08
SV (%)	7,14	2,11
SV de ST (%)	53,29	51,86
Humedad (%)	86,6	95,92
Cenizas (%)	6,26	1,97
pH	4,92	5,30
Alcalinidad (mg/L de CaCO ₃)	6284,1	4718,3
Acidez (mg/L de CaCO ₃)	9502,5	4045,3

Comparando los resultados de las muestras iniciales y finales, con respecto a la composición de los sólidos en ambos biodigestores, se observa un aumento de la proporción de cenizas (fracción inorgánica del sustrato), lo que evidencia la conversión de materia orgánica a inorgánica por la acción bacteriana. El B1 presentó un aumento del 49% de ceniza, mientras que en el B2, este aumento fue del 36%. Por lo que, el contenido de cenizas en el B1 fue alrededor del un 13% mayor que en el B2.

Por otro lado, la proporción de ST en ambos casos, muestra una tendencia decreciente al igual que los SV, hecho que también evidencia una degradación de la materia orgánica presente en el sustrato, utilizada por las bacterias en la producción de biogás.

Desde el inicio del ensayo hasta el día en que se interrumpió el proceso se observa una acidificación del medio propia de la etapa acidogénica, con un marcado aumento de acidez, sobre todo para el caso del biodigestor B1, y disminución del pH en las muestras.

18. TRATAMIENTO COMBINADO ANAEROBICO/AEROBICO

La pila de compost del tratamiento combinado se mantuvo en proceso durante 20 días con un temperatura ambiente que osciló entre 18 y 29 °C.

18.1. Controles diarios

18.1.1. Temperatura

En el siguiente grafico, se muestra la evolución de la temperatura interna de la pila y de la temperatura ambiente durante el período del proceso.

Posterior al armado de la pila, la temperatura interna fue incrementándose hasta alcanzar el pico máximo de 42°C en el tercer día, propio de la etapa termogénica.

Luego, la temperatura descendió a 28°C en el día 5, manteniéndose en el entorno de ese valor hasta el día 9, en el cual se produjo un aumento térmico que alcanzo los 32°C. Este valle térmico se corresponde con la aireación producto de los volteos manuales, que pusieron a disposición de las bacterias un contenido adicional de materia orgánica y oxígeno en el centro de la pila.

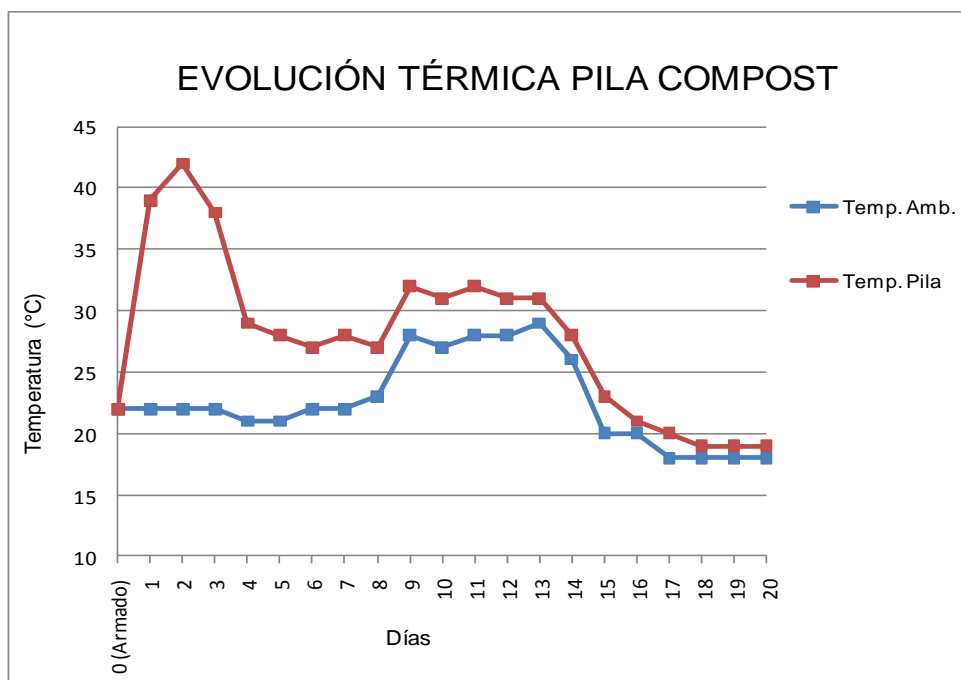


GRÁFICO 5. Evolución térmica de la pila de compost del tratamiento combinado.

Los siguientes días la temperatura continuó estable hasta que en el día 14 comenzó a disminuir con una pendiente marcada. En el día 18 alcanzó la menor diferencia con la temperatura ambiente, siguiendo así hasta el final del proceso. El nivel térmico más alto coincidió con la mayor diferencia respecto de la temperatura ambiente: $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$.

18.1.2. pH

El valor de pH inicial fue de 7,18. El día 3 del proceso se presentó un incremento brusco alcanzando un valor de 8,88. Este cambio hacia pH alcalino coincide con el pico de temperatura propio de la etapa termogénica. Este comportamiento se puede observar comparando Gráfico 5 y Gráfico 6.

El pH alcalino continuó en el entorno $8,6 \pm 0,25$ hasta el final del proceso

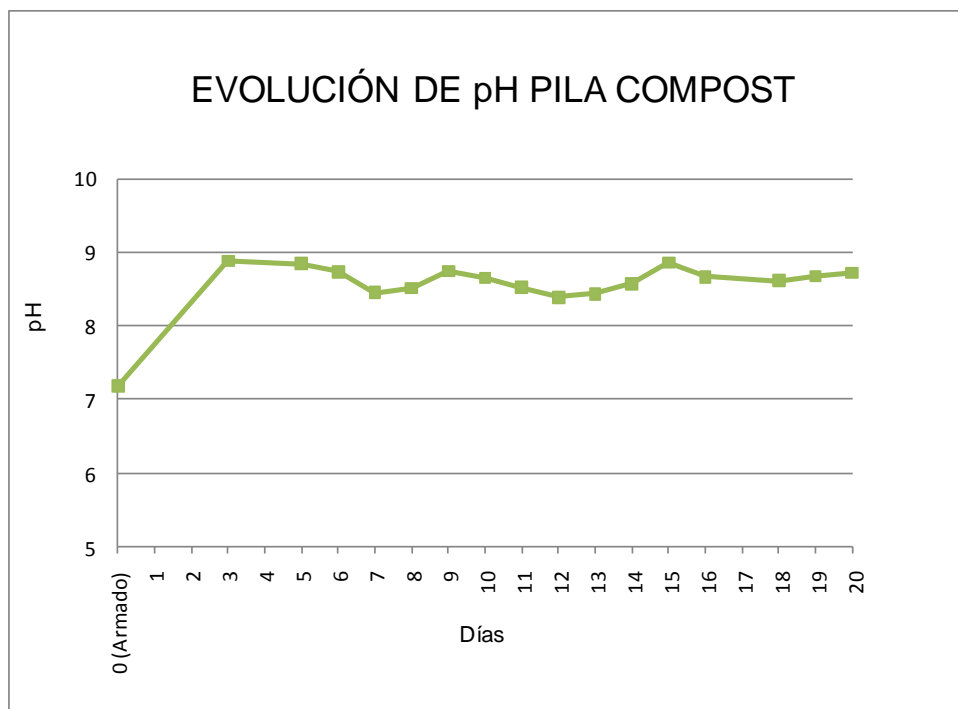


GRÁFICO 6. Evolución del pH de la Pila de compostaje durante los días de tratamiento combinado.

18.1.3. Aireación

Como se mencionó en el programa de seguimiento de este proceso, los volteos se realizaron de manera manual y a demanda, es decir cuando se observaba necesidad de aireación.

La frecuencia de volteos correspondió a la frecuencia de control de pH, es decir una vez al día, debido a que la medición de este parámetro requiere de la homogenización y posterior selección por cuarteo.

Sin embargo, en ningún momento del proceso se observó condiciones de anaerobiosis que hubiesen requerido el volteo diario estrictamente, siendo esto un indicador del buen desarrollo del proceso.

18.1.4. Humedad

La humedad inicial, luego del armado de la pila, fue del 75,43%, valor aceptable para un buen desarrollo del proceso. Diariamente se realizó la prueba de plasticidad y goteo para verificar si era necesario ajustar la humedad de la pila.

En ningún caso, se observó goteo de la muestra por lo que la humedad nunca estuvo en exceso. Por el contrario, la mayoría de las veces se observó necesidad de humedecer.

Tampoco en ningún momento del proceso, se observó la generación de lixiviados, dado a que la pila se armó con el sustrato semi-compostado de un proceso aeróbico iniciado previamente con esta finalidad, el cual estaba en condiciones adecuadas para recibir los lodos residuales del proceso de biodigestión.

18.1.5. Controles analíticos

En la siguiente tabla se presentan los resultados de los parámetros analizados para determinar las características del sustrato semi-compostado con los lodos residuales ya incorporados:

Tabla 26. CARACTERISTICAS DEL SUSTRATO INICIAL DEL TRATAMIENTO COMBINADO	
	SUSTRATO
ST (%)	24,57
SV (%)	18,11
SV de ST (%)	73,74
Humedad (%)	75,43
Cenizas (%)	6,45
pH	7,18

En la Tabla 27 se presentan los parámetros analíticos determinados para caracterizar sustrato final en la pila de compost del tratamiento combinado. Además de los parámetros analizados para caracterizar el sustrato inicial, se analizó la presencia y concentración de Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK), Nitritos, Nitratos, Fósforo y Potasio con el objetivo de evaluar la calidad del producto final de este tratamiento:

Tabla 27. CARACTERISTICAS DEL SUSTRATO FINAL	
	COMPOST
ST (%)	25,68
SV (%)	9,42
SV de ST (%)	37,42
Humedad (%)	74,32
Cenizas (%)	16,26
pH	8,72
Fósforo (mg/100 gr)	16,87
NTK (mg/100 gr)	820,82
Nitratos (mg/100 gr)	21
Nitritos (mg/100 gr)	2,45
Potasio (mg/100gr)	487

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
***“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”***



Comparando ambas tablas, se observa la misma tendencia que en el proceso anaeróbico. La proporción de cenizas se ha incrementado producto de la conversión bacteriana de materia orgánica en inorgánica.

La proporción de sólidos totales (ST), muestra una tendencia decreciente al igual que los sólidos volátiles (SV), registrándose una remoción de la materia orgánica igual al 36 %, lo que determina que el índice de madurez del sustrato fue casi alcanzado, al comparar este resultado con el que fija la normativa de referencia para compost (>38% EPA, 1993; >40 % Resolución ministerial 97, 2001).

Por último, la suma de las concentraciones de N₂ P y K es menor al 5 %. Consecuentemente este producto alcanza la categoría de enmienda orgánica establecida en la de Ley Nacional de Fertilizantes N° 20.466.

CAPITULO V

CONCLUSIONES

CAPITULO V

CONCLUSIONES

La combinación de procesos biológicos puesta a prueba, anaeróbico y aeróbico, resulta adecuada para el tratamiento completo del estiércol porcino, siendo la combinación una metodología completa y definitiva que no requiere de otra etapa posterior para gestionar los residuos, ya que se obtienen materiales útiles, biogás y compost.

Esta experiencia propicia una alternativa de tratamiento y valorización de los residuos generados en la cría intensiva de ganado porcino, resultando una mejora para la gestión ambiental de los mismos.

El pH, alcalinidad y acidez del estiércol porcino tratado se corresponden con lo esperado según la bibliografía específica.

La dilución del sustrato en el biodigestor B2, si bien favorece la homogeneización del mismo y la movilidad bacteriana, no resultó beneficiosa ya que en todo el desarrollo del proceso el volumen de biogás generado fue mucho menor que para el sustrato sin diluir del biodigestor B1, y el total acumulado resultó prácticamente la mitad.

Los resultados analíticos de las muestras iniciales y finales del proceso anaeróbico, revelan que la proporción de cenizas (fracción inorgánica del sustrato) aumentó en ambos biodigestores, siendo mayor este incremento en el biodigestor B1. Así mismo, la proporción de ST y SV disminuyó, lo que evidencia la degradación de la materia orgánica presente en el sustrato.

Las condiciones del sustrato semi-compostado fueron adecuadas para recibir los lodos residuales del proceso de biodigestión. La evolución térmica registrada evidencia el buen desarrollo del proceso en la pila aeróbica.

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



En el proceso aeróbico se observó la misma tendencia que en el proceso anaeróbico. La proporción de cenizas aumentó, alcanzando una remoción de materia orgánica de 36 %, lo que determina que el índice de madurez del sustrato fue casi alcanzado, al comparar este resultado con el que fija la normativa de referencia para compost (>38% EPA, 1993; >40 % Resolución ministerial 97, 2001).

Si bien el estiércol utilizado para el armado de la pila ya había sufrido un proceso de degradación en el biodigestor, y también el sustrato semi-compostado en la Pila, el proceso aeróbico de la mezcla de ambos, continuó con la degradación de la fracción de materia orgánica presente en la mezcla al inicio del proceso aeróbico.

La suma de las concentraciones de N₂ P y K en el compost al final del proceso, es menor al 5 %, por lo que este producto califica en la categoría de *enmienda orgánica* establecida en la de Ley Nacional de Fertilizantes N° 20.466.

Siendo el objetivo del proyecto de investigación en el cual se enmarcó este Proyecto Final, principalmente energético con minimización de la fracción residual, el objetivo de este Trabajo Final no es la obtención de un compost final comercial, sino estudiar el arranque del proceso anaeróbico y el tratamiento adicional para los lodos residuales generados en el mismo.

Así mismo, la escala puesta a prueba es el primer paso para proyectar el tratamiento combinado completo a escala real pasando por una escala piloto que permitirá obtener parámetros de diseño de una Planta Industrial.

El desarrollo de las actividades realizadas en este Proyecto Final, me permitió cumplir con los objetivos planteados en tiempo y forma, abordando una problemática ambiental real, por lo que me siento satisfecha al reconocer un incremento importante en mi experiencia y conocimiento, que me entusiasman para el futuro trabajo profesional como Ingeniera Ambiental.

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Ranking de producción porcina mundial del año 2008	10
Tabla 2. Productores argentinos estratificados por número de madres distribuidos en las principales provincias.....	13
Tabla 3. Producción media diaria de residuos de las diferentes etapas de la producción porcina.....	16
Tabla 4. Cantidad de N y P excretados por día en el estiércol porcino	18
Tabla 5. Potencial de Calentamiento Global de los principales GEI	19
Tabla 6. Impactos ambientales asociados al sector productivo porcino.	20
Tabla 7. Potenciales de generación de biogás para distintas materias primas.....	50
Tabla 8. Contenido de nitrógeno y relación carbono/nitrógeno	53
Tabla 9. Contenido de sólidos totales de algunas materias primas	56
Tabla 10. Sensibilidad térmica de bacterias anaeróbicas.....	58
Tabla 11. Inhibidores del proceso anaeróbico.....	66
Tabla 12. Tiempo de retención hidráulica para distintos sustratos ganaderos	73
Tabla 13. Composición promedio del biogás	74
Tabla 14. Clasificación de biodigestores según criterios de operación.....	84
Tabla 15. Comparación de los modelos de biodigestores mas difundidos	106
Tabla 16. Parámetros indicadores de la condición de madurez del sustrato	124
Tabla 17. Rangos de metales pesados admisibles según distintas normativas.....	125
Tabla 18. Índices de higienización del sustrato obtenido en el proceso aeróbico.....	126
Tabla 19. Densidad del sustrato inicial del tratamiento anaeróbico	140
Tabla 20. Contenido en volumen y porcentaje de los biodigestores.....	141
Tabla 21. Densidad de la mezcla de los lodos residuales del tratamiento anaeróbico ...	143
Tabla 22. Composición porcentual y en peso de la pila del tratamiento combinado	143
Tabla 23. Parámetros de control y técnicas analíticas	148
Tabla 24. Características del sustrato inicial	156
Tabla 25. Características de los lodos residuales de la biodigestión.....	157
Tabla 26. Características del sustrato inicial del tratamiento combinado.....	161
Tabla 27. Características del sustrato final	161

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1. Evolución anual de la faena total de porcinos en Argentina en el periodo 1998-2009	11
Figura 2. Producción porcina anual en miles de toneladas equivalentes res en la Argentina en el periodo 1998-2009	12
Figura 3. Sistemas de producción bajo confinamiento total.	14
Figura 4. Sistemas de producción al aire libre.....	14
Figura 5. Cantidad porcentual de establecimientos según sistemas de producción.	15
Figura 6. Esquema de las etapas del proceso anaeróbico	48
Figura 7. Esquema de objetivos del tratamiento anaeróbico según materias primas utilizadas.....	49
Figura 8. Producción de biogás en función del porcentaje de sólidos totales.....	55
Figura 9. Producción de biogás a distintas temperaturas.....	57
Figura 10. Reacciones de equilibrio ácido-base reguladoras de pH.....	60
Figura 11. Etapas Del Crecimiento Bacteriano.....	69
Figura 12. Velocidad de producción de biogás para distintos porcentajes de inóculo	70
Figura 13. Efectos de la temperatura sobre el tiempo de retención hidráulica	72
Figura 14. Producción de biogás en función del TRH para distintas materias primas	72
Figura 15. Usos posibles del biogás como fuente de energía.	74
Figura 16. Distintos diseños de trampas de agua utilizados en la red de distribución de biogás.....	80
Figura 17. Reacciones químicas de eliminación de ácido sulfhídrico	82
Figura 18. Filtro de ácido sulfhídrico para acondicionamiento del biogás.....	83
Figura 19. Tipos de biodigestores según el tipo de alimentación	86
Figura 20. Producción de biogás de un sistema en paralelo de biodigestores discontinuos	87
Figura 21. Biodigestores verticales de flujo ascendente y flujo descendente	89
Figura 22. Biodigestor de contacto anaeróbico	90
Figura 23. Biodigestor Tipo U.A.S.B	91
Figura 24. Biodigestor de lecho fluidizado de flujo ascendente	92
Figura 25. Biodigestor con filtro anaeróbico de flujo ascendente	93
Figura 26. Biodigestor de dos fases.....	95
Figura 27. Esquema de un biodigestor Tipo Hindú.	100

Figura 28. Esquema de un biodigestor Tipo Chino	101
Figura 29. Vista en perspectiva de un biodigestor de desplazamiento horizontal.....	103
Figura 30. Esquema de un biodigestor Tipo Balón.....	104
Figura 31. Representación de la descomposición aeróbica general de la materia orgánica	108
Figura 32. Zonas distinguibles en una pila o hilera en compostaje.....	111
Figura 33. Alternancia de las etapas mesotérmica y termogénica registrada en una unidad de compost	117
Figura 34. Rangos de temperatura y pH típicos en el proceso aeróbico	118
Figura 35. Esquema de un sistema de Pilas Estáticas.....	122
Figura 36. Esquema de trabajo adoptado para la realización de la experiencia.....	132
Figura 37. Esquema del sistema biodigestor y sistema gasómetro-acumulador	134

CONTENIDO DE IMÁGENES

Imagen 1. Gestión del estiércol de cerdo en Argentina	16
Imagen 2. Planta de biogás de Holsworthy, Reino Unido.....	35
Imagen 3. Planta de biogás en Lemvig, Dinamarca.	365
Imagen 4. Agitadores de tipo mecánico instalados en biodigestores	79
Imagen 5. Trampa de agua en U	80
Imagen 6. Trampa de agua tipo botella.....	81
Imagen 7. Pequeños objetos de hierro oxidado, utilizados en la eliminación del ácido sulfhídrico	82
Imagen 8. Manómetro de agua en forma de U.....	83
Imagen 9. Ejemplos de soportes inertes del diseño filtro anaeróbico	94
Imagen 10. Fotografía y esquema de un gasómetro tipo campana móvil separado del biodigestor.....	97
Imagen 11. Biodigestores agroindustriales con gasómetros de geomembrana de PVC en Alemania.....	98
Imagen 12. Fotografías de biodigestores tipo Hindú	101
Imagen 13. Biodigestor tipo Chino	102
Imagen 14. Biodigestor Tipo Balón	104
Imagen 15. Biodigestor tipo Balón en un emprendimiento de producción porcina en Marco Paz, Buenos Aires	105

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



Imagen 16. Biodigestor tipo balón de gran escala.....	105
Imagen 17. Volteadora a la toma de fuerza del tractor.....	121
Imagen 18. Volteadora de meseta	121
Imagen 19. Materiales, herramientas y accesorios para el armado del sistema de tratamiento biológico anaeróbico	135
Imagen 20. Izq: Sistema de medición de volumen de biogás y de dióxido de carbono. Der: Aparato ORSAT.....	136
Imagen 21. Instrumental y reactivos de laboratorio utilizados en el control de la experiencia.	137
Imagen 22. Yerba mate residual recientemente incorporada a la pila de compost, y aún no mezclada con el sustrato.	139
Imagen 23. Mezcla manual de yerba mate residual recientemente incorporada al sustrato de la pila en proceso de compostaje.....	139
Imagen 24. Sistema de tratamiento anaeróbico visto desde el extremo donde se ubican los biodigestores.....	142
Imagen 25. Biodigestor que ofició de testigo del tratamiento anaeróbico durante todo el periodo de proceso.	142
Imagen 26. Incorporación del lodo mezcla al sustrato semi-compostado de yerba mate residual+chip de poda.....	144
Imagen 27. Izq: Mezclando (sobre la plataforma de compostaje) el sustrato a tratar aeróbicamente: lodos + yerba mate semi-compostada + chip de poda. Der: pila armada luego de mezclar el sustrato.	144
Imagen 28. Medición de volumen de biogás generado.	146
Imagen 29. Izq: Extrayendo una muestra del sustrato bajo tratamiento aeróbico mediante selección por cuarteo. Der: Instrumento digital, reactivos y recipientes utilizados para la determinación diaria del pH del sustrato bajo tratamiento aeróbico.	147

CONTENIDO DE GRAFICOS

Gráfico 1. Generación diaria de biogás de los biodigestores B1 y B2	152
Gráfico 2. Volumen de biogás acumulado para el B1 y el B2.....	153
Gráfico 3. Generación diaria de biogás y dióxido de carbono del Biodigestor 1	154
Gráfico 4. Generación diaria de biogás y dióxido de carbono del Biodigestor 2	154
Gráfico 5. Evolución térmica de la pila de compost del tratamiento combinado.	158
Gráfico 6. Evolución del pH de la Pila de compostaje durante los días de tratamiento combinado.....	159

ABREVIATURAS Y SIGLAS

ABS: Alquilbenzen sulfonatos

AGV: Ácidos grasos volátiles

ASADES: Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente

C/N: relación entre los elementos Carbono y Nitrógeno.

CA: Columna de Agua

CEAMSE: Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad de Estado (Creada por Ley Nacional de Sociedades de Estados N° 20.705)

CEPIS: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente

CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

CONAMA-Chile: Comisión Nacional de Medio Ambiente de Chile

CRUB: Centro Regional Universitario Bariloche

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria

EPA: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

Equiv.: equivalente

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación

FI: Facultad de Ingeniería.

FI-FASTA: Facultad de Ingeniería. Universidad de Fraternidad de Agrupaciones Santo Tomás de Aquino

FOM: Fracción Orgánica Municipal

FO-RSD: Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Domiciliarios.

FO-RSU: Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos.

GEEAA-FI-UNMDP: Grupo de Estudio De Energías Alternativas y Ambiente. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Mar del Plata. Pcia. Buenos Aires.

GEI: Gases con efecto invernadero

GITEP: Grupo de Intercambio Tecnológico de Explotaciones Porcinas

Gral.: General

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
***“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”***



GSL: Gas – Sólido – Líquido

GTZ: Cooperación Técnica Alemana

INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

INTI: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.

IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

ISO: Organización Internacional para la Estandarización

MDL: Mecanismo de Desarrollo Limpio

MERCOSUR: Mercado Común del Sur

OLADE: Organización Latinoamericana de Energía

OMS: Organización Mundial de la Salud

ONCCA: Oficina Nacional de Control Comercial Agropecuario

OPS: Organización Panamericana de la Salud

OSSE: Obras Sanitarias Sociedad de Estado

PBA: Provincia de Buenos Aires

Pcia: Provincia

Pdo: Partido

pH: Logaritmo decimal de la concentración de iones hidrógeno de una solución.

pKa: constante acida de disociación. Corresponde al valor de pH en el cual el ácido se encuentra disociado en un 50%.

PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

PRFV: Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio

PU: Poliuretano

PVC: Policloruro de Vinilo

Res. Nac: Resolución Nacional

RSD: Residuos Sólidos Domiciliarios

RSU: Residuos Sólidos Urbanos

SAGPyA: Secretaría de Agricultura, Ganadería Pesca y Alimentos de la Nación

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
***“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”***



SAyDS: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación

SECyT: Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva

SENASA: Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria

SM: Standard Methods

ST: Sólidos Totales

SV: Sólidos Volátiles

TRH: Tiempo de Retención Hidráulica

UNMDP: Universidad Nacional de Mar del Plata

CONTENIDO ALFABETICO

Acido sulfhídrico, 66	Biodigestores de Lecho Fluidizado, 92
Ácidos Grasos Volátiles, 64	Biodigestores de Mezcla Completa, 88
Actividades previas a la Experiencia de Laboratorio, 138	Biodigestores de Mezcla Lenta, 88
Agitación, 67	Biodigestores de Mezcla Parcial, 88
Agitador, 78	Biodigestores de una fase, 94
Aireación, 116	Biodigestores Discontinuos, 86
Alcalinidad, 60	Biodigestores Semicontinuos, 85
Ámbito de trabajo e infraestructura disponible, 133	Biodigestores Semienterrados, 99
Antecedentes, 23	Biodigestores Subterráneos, 98
Antibióticos, 63	Biodigestores Superficiales, 99
Armado de Pila aeróbica, 143	Biodigestores U.A.S.B, 90
Aspectos ambientales del tratamiento aeróbico, 127	Biogás, 73
Biodigestor de Desplazamiento Horizontal, 102	Cámara de carga, 76
Biodigestor Tipo Chino, 101	Cámara de descarga, 78
Biodigestor Tipo Hindú, 99	Cámara de digestión, 77
Biodigestores Cerrados, 96	Carga de Biodigestores, 141
Biodigestores con gasómetros de Plásticos Inflables, 97	Clasificación de los biodigestores, 84
Biodigestores Continuos, 85	Concentración de sólidos, 54
Biodigestores de Campana Fija, 97	Conclusiones, 164
Biodigestores de Campana Flotante, 96	Conducto de carga, 76
Biodigestores de Contacto Anaeróbico, 89	Conducto de descarga, 77
Biodigestores de dos fases, 95	Contaminación del agua, 17
Biodigestores de Filtro Anaeróbico, 92	Contaminación del aire, 18
	Contaminación del suelo, 16
	Controles Analíticos, 147
	Controles Diarios in situ, 145
	Descarga de Biodigestores, 143

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
***“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”***



Descripción del Proceso Aeróbico, 108	Marco legal, 38
Descripción del Proceso Anaeróbico, 45	Metales pesados, 62, 125
Detergentes, 63	Método de verificación de plasticidad, 115
Determinación de la densidad de la materia prima, 140	Método del goteo, 116
Diseño Experimental, 131	Nitrógeno Amoniacal, 65
Efluente, 75	Normativa de la Provincia de Buenos Aires (PBA), 40
Especificaciones técnicas de las determinaciones analíticas, 148	Normativa Específica, 41
Etapa de acetogénesis, 46	Normativa Nacional, 38
Etapa de hidrólisis y fermentación, 46	Objetivos, 22
Etapa de latencia, 109	Parámetros de control del tratamiento biológico aeróbico, 111
Etapa de maduración, 110	Parámetros de control del tratamiento biológico anaeróbico, 51
Etapa de metanogénesis, 47	pH, 60, 117
Etapa mesotérmica, 109	Pilas o Hileras dinámicas, 120
Etapa termogénica, 110	Pilas o Hileras estáticas, 122
Etapas del proceso biológico aeróbico, 109	Potencial Redox, 56
Etapas del proceso biológico anaeróbico, 46	Presencia de inhibidores, 61
Experiencias de Tratamiento Biológico Aeróbico, 24	Producción porcina en América y el mundo, 9
Experiencias de Tratamiento Biológico Anaeróbico, 28	Reactores Aeróbicos, 123
Filtro de Acido Sulfhídrico (SH ₂), 81	Relación Carbono/Nitrógeno y contenido de otros nutrientes, 52, 112
Forma geométrica de la cámara de digestión, 87	Sector porcino en Argentina, 10
Gasómetro, 78	Seguimiento de los Procesos, 145
Hidrógeno gaseoso, 65	Sistemas al aire libre, 14
Humedad, 114	Sistemas bajo confinamiento total, 13
Maduración del Compost, 123	Sistemas de producción intensiva, 13
Manómetro, 83	Sistemas Mixtos, 14
	Tamaño de las partículas, 54, 113

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
*“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”*



Técnica de compostaje, 120	Utilización de inóculos, 68, 119
Tecnología de tratamiento biológico aeróbico, 120	Válvula de salida de biogás, 79
Tecnología de tratamiento biológico anaeróbico, 76	Velocidad de carga volumétrica, 70
Temperatura, 56, 114	Ventajas del tratamiento biológico aeróbico, 128
Tiempo de retención hidráulica, 70	Ventajas del tratamiento biológico anaeróbico, 107
Tipo de alimentación, 85	Volumen de biogás generado, 151
Tipos de materias primas, 49	Volumen de dióxido de carbono obtenido, 154
Trampa de agua, 80	

BIBLIOGRAFIA

CAPITULO I

Publicaciones Científicas

- Bárbara Corleto, Máximo Menna, “Tratamiento Biológico Aerobio de los residuos generados en el procesamiento industrial de la papa”, 2008, Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental, FI-FASTA, 109 pp.
- Menna Máximo, Gloria Plaza, Julio Branda, Guillermo Murcia, “Tecnología Regional Simple para el Tratamiento Aerobio de la Fracción Orgánica Municipal”, 2004, Revista ASADES, En Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 8, N° 1, pp. 1.99-1.104.
- Francisca Laos, María Julia Mazzarino, Patricia Satti, Lucia Roselli, Susana Moyano, Marcelo Ruival, Leonardo Moller Poulsen, “Planta de compostaje de biosólidos: investigación y desarrollo en Bariloche, Argentina”, 2000, Revista AIDIS Argentina Ingeniería Sanitaria y Ambiental N° 50, pp. 86-89
- Máximo Menna, Julio Branda, Guillermo Murcia, Eduardo Garín, Gustavo Belliski y Eleonora Moschione, “Seguimiento del proceso de generación de biogás en digestores de laboratorio mediante la cuantificación de gases y determinación de parámetros simples de laboratorio”, 2007, GEEAA-FI-UNMDP.
- Eduardo Gropelli, Orlando Giampaoli, Edgardo Maroni, Alejandro Lespinard y Julio Muesati, “Puesta en marcha del biodigestor anaeróbico para el tratamiento de residuos orgánicos”, 2004, Revista AIDIS Argentina Ingeniería Sanitaria y Ambiental N° 73, pp. 36-41.
- Oscar Noguera, Máximo Menna, Gustavo Bacino y Susana Jacob. “Generación de Energía – Biogás”, Año 1995, GEEAA-FI-UNMDP.

Páginas Webs

- Elisabet Peralta, Roberto González, Gabriela Von Haeften, Ana Paula Comino, Gustavo Gayoso, Sergio Vergara, Carlos Genga, y Marcelo Scagliola, “Experiencia piloto de compostaje de barros primarios cloacales de Mar del Plata”. Disponible en:
<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/aidis12/experiencia.pdf>
Consulta: 11/04/2010 18:30 hs.
- Guillermo D. Vica, “Experiencia en elaboración de Compost en el Relleno Sanitario Norte III”. Disponible en:
<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/iswa2005/experien.pdf>
Consulta: 23/03/2010 17:39 hs
- CEAMSE, “Planta de compostaje – Complejo Norte III”. Disponible en:
<http://ceamse.gov.ar/compostaje/>
Consulta: 16/06/2010 10:00 hs.
- Jorge Hilbert, Steffen Gruber, “Biodigestión de Estiércoles y Purines de Cerdos” INTA. Disponible en:
<http://www.inta.gov.ar/info/bioenergia/Biodigestión%20de%20estiércoles%20y%20purines%20de%20cerdo.pdf>

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



Consulta: 22/05/2010 12:30 hs.

- Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad Autónoma de Entre Ríos, “El coordinador del ITU y el equipo de técnicos de INTA Crespo visitaron emprendimiento de biodigestión en Buenos Aires”. Disponible en:

<http://fcyt.uader.edu.ar/web/node/151>

Consulta: 14/06/2010 8:24 hs.

- Celina Filippín, Jorge Alberto Follari y Jorge Vigil “Diseño de un biodigestor para obtener gas metano y fertilizantes a partir de la fermentación de excrementos de vacas lecheras en la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de la Pampa”, ASADES. Disponible en:

<http://www.asades.org.ar/averma/3-1999/06-05.pdf>

Consulta: 14/05/2010 17:20 hs

- INTI y SECyT “Desafíos y Estrategias para Implementar la Digestión Anaeróbica en los Agroecosistemas”. disponible en:

<http://www.inta.gov.ar/iir/info/documentos/energia/foro/final%20proceedings.pdf>

Consulta: 22/05/2010 12:30 hs

- Beatriz Molinuevo, María Cruz García, María Cristina León y Milagros Acitores, “Anaerobic co-digestion of animal wastes (poultry litter and pig manure) with vegetable processing wastes”. Disponible en:

http://www.ramiran.net/doc08/RAMIRAN_2008/Molinuevo.pdf

Consulta: 18/05/2010 19:25 hs.

- Jørgen Fink y Mark Christensen, “Holworthy Biogas Plant”. Disponible en:

http://www.devon.gov.uk/renewable_energy_guide_case_study_2.pdf

Consulta: 08/06/2010 14:00 hs.

- Teodorita Al Seadi, “Danish Centralised Biogas Plants. Plant Descriptions”. Disponible en:

<http://web.sdu.dk/bio/pdf/rap2.pdf>

Consulta: 02/07/2010 19:10 hs

- Xavier Flotats, Elena Campos, Jordi Palatsi y August Bonmatí, “Digestión anaerobia de purines de cerdo y co-digestión con residuos de la industria alimentaria”. Universidad Politécnica de Cataluña. Disponible en:

<http://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/6699/1/porci%202001%20final.pdf>

Consulta: 22/05/2010 12:30 hs.

- Xavier Flotats, August Bonmatí, Elena Campos y Montserrat Antunez, “Ensayos en discontinuo de co-digestión anaerobia termofílica de purines de cerdo y lodos residuales. Efecto del amonio”. Universidad Politécnica de Cataluña. Disponible en:

<http://upcommons.upc.edu/eprints/bitstream/2117/6743/1/ensayos%20en%20discontinuo%20Informaci%C3%B3n%20tecnologica.pdf>

Consulta: 18/05/2010 19:30 hs.

- Datos estadísticos de FAO. Disponibles en:

<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>

Consulta: 20/11/2010 20:00 hs

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



- K.J. Chae, S.K. Yim, K.H. Choi, W.K. Park y D.K. Lim “Digestión Anaeróbica de estiércol porcino: Planta de Biogás a escala real en Sung-Hwan, Corea” Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología Agrícola, Corea. Disponible en:
<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/unam7/swine.pdf>
Consulta: 18/05/2010 19:36 hs
- Datos estadísticos SAGPyA. Disponibles en:
http://www.minagri.gob.ar/SAGPyA/ganaderia/porcinos/02-estadisticas/evolucion_anual.pdf
Consulta: 20/11/2010 20:30 hs
- GITEP, “Anuario 2008”. Disponible en:
<http://www.gitep.com.ar/gen/Anuario%202008.pdf>
Consulta: 21/11/2008 15:30 hs
- Sofía García, INTA E.E.A Marcos Juárez, “El mercado de carne de cerdo en argentina y en el mundo”. Disponible en:
http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_porcina/75-mercado.pdf
Consulta: 21/11/2008 15:30 hs
- PNUD, “Caracterización de la Producción Ganadera en Argentina frente al Cambio Climático”. Disponible en:
<http://www.undp.org.ar/docs/prensa/brief-05-cambios.pdf>
Consulta: 21/11/2008 15:30 hs
- María Herrero y Susana Gil, Departamento de Producción Animal, Facultad de Ciencias Veterinarias de la Universidad de Buenos Aires, “Consideraciones ambientales de la intensificación en producción animal”. Disponible en:
<http://www.scielo.org.ar/pdf/ecoaus/v18n3/v18n3a03.pdf>
Consulta: 21/11/2008 18:20 hs
- Berra Guillermo y Laura Finster, Instituto de Patobiología, INTA Castelar, “Emisión de Gases de Efecto Invernadero”, disponible en:
<http://www.inta.gov.ar/patobiologia/pdf%20fisiologia/IDIA%20CARNE.pdf>
Consulta: 21/11/2010 14:50 hs
- Patricia Millares, Área Porcinos, Dirección de Ganadería, SAGPyA. “Problemática y perspectivas del Sector de la Producción Porcina”. Disponible en:
http://www.globalmethane.org/documents/events_ag_20070514_millares_pigs.pdf
Consulta: 21/11/2010 16:17 hs
- Alberto Echevarría, “Sistemas de Producción Porcina” Universidad Nacional de Río Cuarto. Disponible en:
<http://www.ciap.org.ar/ciap/Sitio/Proyectos/Cordoba/Capacitacion%20Escuelas%20Tecnicas%202009/Materiales/Sistemas%20de%20Produccion%20Porcina%20Presentacion.pdf>
Consulta: 21/11/2010 18:30 hs

CAPITULO II

Publicaciones Científicas

- Jorge Hilbert, “Manual para la producción de Biogás”, 2003, Instituto de Ingeniería Rural. INTA-Castelar, 54 pp.
- Eduardo Groppelli, Orlando Giampaoli, “El camino de la biodigestión. Ambiente y tecnología socialmente aprobada”, 2001, Universidad Nacional del Litoral, 188 pp.
- Bárbara Corleto, Máximo Menna, “Tratamiento Biológico Aerobio de los residuos generados en el procesamiento industrial de la papa”, 2008, Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental, Universidad FI-FASTA, 109 pp.
- Oscar Noquera, Máximo Menna, Gustavo Bacino, Susana Jacob “Generación de Energía - Biogás”, 1995. GEEAA-FI-UNMDP, 59 pp.
- CD-ROM “Biogas from waste and waste water treatment” Comisión Europea. Directorio General XVII para la Energía.
- Luis Rubio, Lesreve Monter y Adalberto Noyola, “Digestión anaerobia en dos fases termofílica/mesofílica para la producción de biosólidos clase A”, 2004, Revista AIDIS Argentina Ingeniería Sanitaria y Ambiental N° 76, pp. 73-79.
- Nestor Puglia “Diseño y construcción de una pequeña planta de tratamiento de RSU con generación de energía eléctrica”, FI-UNMDP, 2010.
- Branda Julio, Menna Máximo, Murcia Guillermo, “Residuos y Medio Ambiente ¿Qué hacer desde la escuela?”, 2001, GEEAA-FI-UNMDP, 24 pp.
- Tchobanoglous George, Theisen Hilary y Vigil Sanuel, “Gestión Integral de Residuos Sólidos”, 1998, 1106pp.

Páginas web

- A. Bonmatí y A. Magrí, “Tecnologías aplicables en el tratamiento de las deyecciones ganaderas: un elemento clave para mejorar su gestión”. Disponible en:
<http://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/2015/1/2007%20Residuos.pdf>
Consulta: 28/11/2010 14:56 hs
- Gabriel Moncayo Romero, “Manejo ecológicamente compatible de las cuencas del Tungurahua” Universidad Técnica de Ambato, Ecuador. Disponible en:
http://www.plantasdepuradoras.com/PDF/Manual%20Biogas_AQL.pdf
Consulta: 24/10/2010 14:09
- “Manual de instalación de un biodigestor familiar tipo manga para zonas alto-andinas”. Universidad Politécnica de Cataluña. Disponible en:
http://www.cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/101bib_arch.pdf
Consulta: 27/11/2010 16:08 hs
- María Teresa Varnero, “Biogás y sus aplicaciones”. Universidad de Chile. 2009. Disponible en:
http://www.redagropecuariaaraucaia.cl/archivosdescargas/pdf/Biogas_y_sus_aplicaciones_Maria_Teresa_Varnero.pdf
Consulta: 23/10/2010 8:17 hs

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
***“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”***



- Jaime Martí Herrero, “Biodigestores familiares. Guía de diseño y manual de instalación”. Cooperación técnica Alemana (GTZ). Programa de Desarrollo Agropecuario (PROAGRO). Disponible en:
http://www.utm.org.mx/docs_pdf/docs_tecnicos/proyectos_tipo/guia_biodigestores_invernaderos_jmh.pdf
Consulta: 24/10/2010 14:56 hs
- José Antonio Guardado Chacón “Tecnología del biogás”. Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba. Disponible en:
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia34/HTML/articulo03.htm>
Consulta: 21/11/2010 15:12 hs
- Eugenio Androvetto Villalobos, “Diseño y operación de un modelo para el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la granja porcina de la Facultad de medicina veterinaria y zootecnia de la universidad de San Carlos de Guatemala”, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos hidráulicos (ERIS). Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2003. Disponible en:
<http://www.cepis.org.pe/bvsaar/fulltext/andro.pdf>
Consulta: 21/10/2010 13:10
- “Aplicaciones del Biogás. Técnicas Energéticas.” Facultad Universidad de Buenos Aires (UBA). Disponible en:
<http://materias.fi.uba.ar/6756/Aplicaciones%20del%20Biogas%20C%2007.pdf>
Consulta: 04/10/2010 12:05
- S. Stuckey, P. Edwards y L. Obeng, “Tratamiento de desechos y Recuperación de recursos” Organización Panamericana de la Salud. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Disponible en:
<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd68/020619/020619-02.pdf>
Consulta: 17/06/2010 21:10 hs
- Torres Guillén, D. y Arteaga Chávez, L, “Desarrollo de un Sistema de Biodigestores y Energías Limpias”. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Lima, Perú. Disponible en:
<http://compinformatidf.files.wordpress.com/2009/09/trabajofinal080909.pdf>
Consulta: 24/10/2010 14:19 hs
- “Sistema de biodigestión en un emprendimiento de producción porcina, Marcos Paz, Bs. As” Facultad de Ciencia y Tecnología Universidad. Autónoma de Entre Ríos, disponible en:
<http://fcyt.uader.edu.ar/web/node/150>
Consulta: 11/09/2010 18:00 hs
- Bárbaro Lugones López, “Análisis de biodigestores” CUBAENERGÍA. Disponible en:
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia34/HTML/articulo03.htm>
Consulta: 13/09/2010 18:30 hs
- “Biodigestor con geomembranas”. EG-ingeniería, Santa Fe, Argentina. Disponible en:
<http://www.eg-ingenieria.com.ar/biodigestores-con-geomembranas.html>
Consulta: 13/09/2010 20:00 hs
- Antonio Guevara Vera, “Fundamentos Básicos para el Diseño de Biodigestores Anaeróbicos Rurales. Producción de gas y saneamiento de efluentes” CEPIS, OPS y OMS. 1996. Disponible en:
<http://www.cepis.org.pe/bvsacd/scan2/031042/031042.pdf>

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



Consulta: 10/09/2010 19:00 hs

- Antonia Elena Campos Pozuelo y Xavier Flotats “Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante co-digestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria”. Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. Universidad de Lleida, España. 2001. Disponible en:

http://www.tesisenxarxa.net/TESIS_UdL/AVAILABLE/TDX-0909105-125302/Tecp1de1.pdf

Consulta: 18/05/2010 19:30 hs

- Porfirio Mandujano Sanchez y Aurelio Félix Hernández Muñoz “Digestión anaeróbica de sólidos en alta concentración” Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Madrid, España. 2001. Disponible en:

<http://oa.upm.es/401/1/04200103.pdf>

Consulta: 30/09/2010 18:20 hs

- Álvaro Andrés Cajigas Cerón, Andrea Pérez Vidal y Patricia Torres Lozada “Importancia del pH y la alcalinidad en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca” Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Revista *Scientia et Technica*, N° 27. 2005. ISSN 0122-1701. Disponible en:

<http://www.utp.edu.co/php/revistas/ScientiaEtTechnica/docsFTP/114434243-248.pdf>

Consulta: 10/08/2010 9:00 hs

- Nuria Martí Ortega “Phosphorus precipitation in anaerobic digestion process” Florida, Estados Unidos. 2006. ISBN 1-58112-332-9. Disponible en:

<http://www.bookpump.com/dps/pdf-b/1123329b.pdf>

Consulta: 10/08/2010 9:07 hs

- Xavier Flotats, August Bonmatí, Elena Campos y Montserrat Antunez, “Ensayos en discontinuo de co-digestión anaerobia termofílica de purines de cerdo y lodos residuales. Efecto del amonio”, Departamento de Medio Ambiente y Ciencias de la Tierra. Universidad Politécnica de Cataluña, España. Revista Internacional *Información Tecnológica*, Vol. 10, N° 1. 1999. ISSN 0716-8756 Disponible en:

<http://upcommons.upc.edu/eprints/bitstream/2117/6743/1/ensayos%20en%20discontinuo%20Informaci%C3%B3n%20tecnologica.pdf>

Consulta: 18/05/2010 19:32 hs.

- Georgina Fernández Villagómez, Elizabeth Vázquez Borges y Pedro Martínez Pereda “Inhibidores del proceso anaerobio: Compuestos utilizados en porcicultura” Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México. Revista Académica *Ingeniería*, Vol. 6, N° 003. 2002. ISSN: 1665-529X, pp. 67-71. Disponible en:

<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/467/46760307.pdf>

Consulta: 17/09/2010 8:20 hs

- José Pacheco y Aldo Magaña “Arranque de un reactor anaerobio” Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México. Revista Académica *Ingeniería*, Vol. 7, N° 001. 2003. ISSN: 1665-529X, pp. 21-25. Disponible en:

<http://www.ingenieria.uady.mx/revista/volumen7/arranque.pdf>

Consulta: 10/08/2010 9:00 hs

- Fernando Fernández Polanco, María Fernández Polanco y Pedro García Encina “Criterios para la selección de tecnología de digestión anaerobia de residuos sólidos” Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Valladolid. España. Disponible en:

<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/unam7/criterios.pdf>

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



Consulta: 30/09/2010 11:28 hs

- Manuel de Jesús Soria Fregoso, Ronald Ferrera Cerrato, Jorge Etchevers Barra, Gabriel Alcántar González, José Trinidad Santos, Lizette Borges Gómez y Gaspar Pereyda Pérez “Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo” Instituto Tecnológico Agropecuario Conkal, Yucatán. México. Instituto de Recursos Naturales. Colegio de Postgraduados. México. Revista *Terra Latinoamericana*, Vol. 19, N° 4. 2001. Disponible en:

www.chapingo.mx/terra/contenido/19/4/art353-362.pdf

Consulta: 30/09/2010 20:01 hs

- Aída Evelia Rolando y Jorge Durán “Tratamiento anaeróbico de los residuos de la obtención del aceite esencial de coriandro y del principio activo del cardo mariano” Facultad Regional Haedo. Universidad Tecnológica Nacional. Buenos Aires. Argentina. Disponible en:

http://www.inta.gov.ar/info/bioenergia/doc/aida_rolando.pdf

Consulta: 20/09/2010 9:28 hs.

- María del Carmen Fajardo Ortiz y Oscar Monroy “Producción de inóculos para reactores anaerobios” División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana. México. 1997. Disponible en:

<http://148.206.53.231/UAM0522.PDF>

Consulta: 20/09/2010 09:30 hs.

- Roberto Sosa, Ramón Chao y Jorge del Río “Aspectos bioquímicos y tecnológicos del tratamiento de residuales agrícolas con producción de biogás”, Revista Computadorizada de Producción Porcina, Vol. 6, N° 2. 1999. Disponible en:

<http://www.sian.info.ve/porcinos/publicaciones/rccpn/rev62/RCP62art1.htm>

Consulta: 22/05/2010 12:33 hs.

- Antonio Carlos López Pérez “Valorización del estiércol de cerdo a través de la producción de biogás”. Fondo Nacional de Porcicultura. Asociación colombiana de porcicultores. Disponible en:

http://www.oiporc.com/contenido/3.2_MANUAL_BIODIGESTOR.pdf

Consulta: 22/05/2010 12:36 hs

- Xavier Flotats, Elena Campos, Jordi Palatsi y August Bonmatí “Digestión anaerobia de purines de cerdo y co-digestión con residuos de la industria alimentaria” Universidad Politécnica de Cataluña. España. Revista *Porci*. N°65. 2001. ISSN 1130-8451 pp 51-65. Disponible en:

<http://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/6699/1/porci%202001%20final.pdf>

Consulta: 22/05/2010 12:39 hs.

- Castrillón Quintana Olivia, Bedoya Mejía Oswaldo y Montoya Martínez Diana Victoria, “Efecto del pH sobre el crecimiento de los microorganismos durante la etapa de maduración en pilas estáticas de compost”, 2006. Disponible en:

http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/Revista+Limpia/Vol1n2/p+l_v1n2_87-98_compost.pdf

Consulta: 16/04/2010 21:00 hs

- CEAMSE (Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad del Estado), “Controles Ambientales, Tratamiento de Líquidos Lixiviados, Buenos Aires”. Disponible en:

<http://www.ceamse.gov.ar/control-amb/liquidos.html>

Consulta: 26/11/2010 9:46 hs

- EPA, “Composting”, Decision Maker's Guide to Solid Waste Management. Vol. II. Chapter 7. 1995, 7pp. Disponible en:

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
***“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”***



<http://www.p2pays.org/ref/03/02021/chapter7.pdf>

Consulta: 26/11/2010 17:09 hs

- EPA. “Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge, (Including Domestic Septage)”, Environmental Regulations and Technology, 1992, “Under 40 CFR Part. 503. Disponible en:

<http://www.p2pays.org/ref/09/08691.pdf>

Consulta: 26/11/2010 17:56 hs

- EPA, “Standards for the use or disposal of sewage sludge”, 1993, Federal Register 58 (32) 9248-9404. U.S. Gov. Print. Office, Washington D.C. Disponible en:

<Http://www.epa.gov/waterscience/biosolids/fr2-19-93.pdf>

Consulta: 26/11/2010 17:44 hs

- Ley Nacional N° 20466 de Fertilizantes y Enmiendas Orgánicas, 1973. Disponible en:

http://www.sagpya.mecon.gov.ar/SAGPyA/agricultura/agua_y_suelos/05-fertilizantes/LEY%20%2020466.pdf

Consulta: 20/11/2010 17:36 hs

- Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente, Resolución N° 97, “Reglamento para el Manejo de Barros Generados en Plantas de Tratamiento de Efluentes Líquidos”. 2001. Disponible en:

<http://www.infoleg.gov.ar/infolegInternet/anexos/70000-74999/70192/norma.htm>

Consulta: 20/11/2010 16:30 hs

REFERENCIAS DE NOTAS AL FINAL

- ⁱ Brumm, MC. (2002). “Sources of manure: Swine” (3). Pp. 49-64 en: Hatfield, JL & BA Steward (eds.). Animal Waste Utilization: Effective use of manure as a soil resource; 1a ed. Lewis Publishers.
- ⁱⁱ Vermorel, M. (1995). “Emissions annuelles de methane d’origine digestive par les bovins en France. Variations selon le type d’animal et le niveau de production”. Productions Animales 8(4):265-272.
- ⁱⁱⁱ A. Bonmatí y A. Magrí, “Tecnologías aplicables en el tratamiento de las deyecciones ganaderas: un elemento clave para mejorar su gestión”
- ^{iv} Speece, R.E. (1987). “Nutrient Requirements”, en Anaerobic Digestion of biomass. Editado por Chynoweth D. Y y Isaacson, R. Elsevier applied science LTD.
- ^v Tchobanoglous George, Theisen Hilary y Vigil Samuel A., (1998) “Gestión Integral de Residuos Sólidos”, 1106 pp.
- ^{vi} Angelidaki, I. y Ahring, B.K. (2000). “Methods for increasing the biogas potential from the recalcitrant organic matter contained in manure.” Wat. Sci. Tech, 41(3), 189-194.
- ^{vii} OLADE, (1981), “Biogás: Energía y Fertilizante a partir de Desechos Orgánicos”. Manual para el Promotor de la Tecnología. Cuernavaca, Morelos, México Instituto de Investigaciones Eléctricas. Div. Fuentes de Energía. Dpto. Fuentes no Convencionales de Energía.
- ^{viii} Taylhardat, L. (1986) “El biogás. Fundamentos e infraestructura rural” Maracay. Instituto de Ingeniería Agrícola. Facultad de Agronomía. UCV. 68 pp.
- ^{ix} Fannin, K.F. (1987). “Start-up, operation, stability and control”, en Anaerobic digestion of biomass. Editado por Chynoweth, D. Y y Isaacson, R. Elsevier applied science LTD.
- ^x Jenkins S.R., Morgan J.M., Sawyer C.L (1983). “Measuring Anaerobic Sludge Digestion and Growth by Simple Alkalimetric Titration”. Journal Water Pollution Control Federation. 55-5, pp. 448-453.
- ^{xi} Borja, R. (1989). “Control de reactores anaerobios: Parámetros y procedimientos”. Instituto de la grasa y derivados. Sevilla España.
- ^{xii} Hayes, T.D., Theis, T.L. (1978). “The distribution of heavy metals in anaerobic digestion”. Journal Water Pollution Control Federation. Vol. 50 (1), pag. 31-72.
- ^{xiii} Kugelman, I.J., Chin, K.K. (1971). “Toxicity synergism and antagonism in anaerobic waste treatment processes. Anaerobic biological treatment processes”. Advances in Chemistry Series, 105. American Chemical Society. Washington D.C.
- ^{xiv} Massé, D.I., Masse, D.Lu, Droste, R.L. (2000). “Effect of antibiotics on psychrophilic anaerobic digestion of swine manure slurry in sequencing batch reactors”. Bioresource Technology. Vol. 75, pag. 205-211.

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental
“Tratamiento Biológico Combinado Anaeróbico/Aeróbico
de Estiércol Generado en la Cría Intensiva de Cerdo”



- ^{xv} Hilpert, R., Winter, J., Kandler, O. (1987). “Feed additives and desinfectants as inhibitory factors in anaerobic digestion of agricultural wastes. Biomass for energy”. Elsevier applied science LTD.
- ^{xvi} Hilper, R., Winter, J., Kandler, O. (1982) “Feed additives and desinfectants as inhibitory factors in anaerobic digestion of agricultural wastes”. 2nd E.C. Conference Energy from Biomass, Berlin. Applied Science Publishers, pp 552-558.
- ^{xvii} Ahring, B.K., Sandberg, M., Angelidaki, I. (1995). “Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digestors. Applied microbiological Biotechnology”. Vol. 43 (3), pag.559-565.
- ^{xviii} Hilbert, J (2003) “Manual para la producción de Biogás”. Depto. de Ingeniería Rural, Castelar.
- ^{xix} Angelidaki, I., Ahring, B.K. (1994). Anaerobic thermophilic digestion of manure at different ammonia loads: effect of temperature. Water Research. Vol. 28 (3), pag. 727-731.
- ^{xx} Espinosa, G. Hilbert, J. Bogliani M. (1983) “Biogás: Energía y Biofertilización. Manual de Producción y Utilización.” Depto. de Ingeniería Rural, Castelar.
- ^{xxi} Stafford, D.A. (1982). “The effects of mixing and volatile fatty acid concentrations on anaerobic digester performance. Biomass”. Vol. 2, pag. 43-55.
- ^{xxii} Muñoz Valero, J.A., Ortiz Cañavate, J., Vázquez Minguela, J. (1987). “Técnica y aplicaciones agrícolas de la biometanización”. Serie Técnica- Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Madrid.
- ^{xxiii} Hashimoto, A.G. (1989). “Effect of inoculum/substrate ratio on methane yield and production rate from straw. Biological wastes”. Vol. 28, pag. 247- 255.
- ^{xxiv} De Gouveia P., Fitt,A., y Sojo, S. (1988). “Biogás, una perspectiva”. San Juan de los Morros. Trabajo de Monografía. UNERG. 62 pp.
- ^{xxv} Branda J, Menna M, Murcia G, (2001), “Residuos y Medio Ambiente ¿Qué hacer desde la escuela?”, Grupo de Estudio de Energías Alternativas y Ambiente, Mar del Plata, 24 pp.
- ^{xxvi} Sztern Daniel y Pravia Miguel A., (1999), “Manual para la Elaboración de Compost. Bases Conceptuales y Procedimientos”, Organización Panamericana de la Salud (OPS-OMS), Uruguay, 69 pp.