



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza

EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DE ADITIVOS NUTRIENTES
EN LA ESTABILIZACIÓN ANAEROBIA
DE LODOS BIOLÓGICO Y FÍSICOQUÍMICO

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A:

MAURO ENRIQUE VALLE PRIMITIVO



MÉXICO, D.F. 2008



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

*A mis padres: **Facunda Primitivo** y **Sabas Valle** que les debo todo. GRACIAS por el apoyo, amor y confianza que en mi han depositado. Porque mis estudios han sido el legado mas grande que pudiera recibir.*

*A mis hermanos **Carlos** y **Marlen**, por el cariño recibido, esto no hubiera sido posible sin su apoyo GRACIAS.*

*A las cuatro razones por las cuales tenemos que salir adelante: **Yireth, Misael, Karina** y **Andrea**.*

*A mis Abuelitas **Maria** y **Paulina**, mi Tío **Varo**, mi cuñada **Aura**. mis Abuelos **Felipe** y **Julio** donde quiera que estén va por ustedes.*

*A ti **Adriana**, por estar conmigo y la paciencia que has mostrado durante este tiempo.*

*A **Javier (Panta)**, **Rafa (Sin quehacer)**, **Juan (Tamagochi)**, **Ismael (Tex)**, **Oscar (Gumy)**, **Alejandra**, **Omar (Moroco)**, **Dulce**, **Raúl (Rulas)**, **Juan Carlos**, **Fernando (Fercho)**, **Jesús (Maria)**, y a todos los de la FES que compartieron momentos conmigo e hicieron mas ligero este camino.*

A los que en su momento estuvieron y el destino nos separo, éxito en sus vidas.



ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	I
ÍNDICE DE FIGURAS	II
LISTA DE ABREVIATURAS	IV
RESUMEN	V
INTRODUCCIÓN	1
I. ANTECEDENTES	3
1.1. Normatividad	3
1.1.1. Calidad de los lodos en México	6
1.1.2. Problemática de los lodos en México	7
1.2. Lodos Residuales	7
1.2.1. Clasificación	7
1.2.2. Características	8
1.2.3. Tratamiento	11
1.3. Digestión Anaerobia	15
1.3.1. Historia	15
1.3.2. Microbiología y Bioquímica	17
1.3.3. Requerimientos Físicoquímicos	20
1.4. Estimulación	23
1.4.1. Micronutrientes	24
1.4.2. Aplicación de Aditivos	25
II. JUSTIFICACIÓN	26



III. OBJETIVOS	28
3.1. Objetivo General	28
3.2. Hipótesis	28
IV. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	29
4.1. Muestreo de lodos	29
4.2. Digestores a escala laboratorio	30
4.3. Técnicas analíticas	34
V. RESULTADOS Y DISCUSIONES	36
5.1. Reactor T1 (lodo biológico)	36
5.2. Reactor T2 (lodo fisicoquímico)	46
5.3. Resumen de Resultados	56
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
VII. REFERENCIAS	62
ANEXO	65



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Valores máximos permisibles de microorganismos en biosólidos según la USEPA y la NOM-004-SEMARNAT-2002	3
Tabla 1.2 Valores máximos permisibles en mg/kg de metales pesados en biosólidos según la USEPA y la NOM-004-SEMARNAT-2002	5
Tabla 1.3 Aprovechamiento de biosólidos	5
Tabla 1.4 Metales nutrientes requeridos por la biomasa anaerobia, en función de la concentración en DQO del agua (Noyola, 1998 b)	23
Tabla 4.1 Metales traza adicionados a los digestores T1 y T2	33
Tabla 4.2 Condiciones de operación en las tres etapas de los digestores T1 y T2	33
Tabla 4.3 Parámetros analizados durante el monitoreo del funcionamiento de los digestores anaerobios termofílicos T1 y T2	34
Tabla 5.1 Características del lodo de alimentación al digester T1(lodo biológico)	36
Tabla 5.2 Características del lodo de alimentación al digester T2(lodo fisicoquímico)	46
Tabla 5.3 Resumen de los resultados promedio representativos durante cada periodo de operación del digester T1	56
Tabla 5.4 Resumen de los resultados promedio representativos durante cada periodo de operación del digester T2	57



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Concentración de metales pesados en lodos del Distrito Federal	6
Figura 1.2 Diagrama de flujo en la digestión anaerobia de la materia orgánica particulada a metano	19
Figura 4.1 Planta de tratamiento de aguas residuales “Cerro de la Estrella”	29
Figura 4.2 Uno de los dos digestores termofílicos utilizados en este trabajo	30
Figura 4.3 Arreglo de los digestores termofílicos T1 y T2	31
Figura 5.1.1 Variación del pH en T1	37
Figura 5.1.2 Relación de Alcalinidades (α) en T1	38
Figura 5.1.3 Variación de la Alcalinidad en T1	39
Figura 5.1.4 Producción diaria de Biogás en T1	40
Figura 5.1.5 Porcentaje de CH ₄ en T1	41
Figura 5.1.6 Porcentaje de Remoción de Sólidos Volátiles en T1	42
Figura 5.1.7 Concentraciones de ácidos acético, propiónico e iso-butírico en T1	43
Figura 5.1.8 Concentración de ácido Butírico, iso-valérico y Valérico en T1	44
Figura 5.1.9 Concentración Total de ácidos grasos volátiles en T1	45
Figura 5.2.1 Variación del pH en T2	47
Figura 5.2.2 Relación de Alcalinidades (α) en T2	48
Figura 5.2.3 Variación de la Alcalinidad en T2	49
Figura 5.2.4 Producción de Biogás en T2	50
Figura 5.2.5 Porcentaje de CH ₄ en T2	51



Figura 5.2.6 Porcentaje de Remoción de Sólidos Volátiles en T2	52
Figura 5.2.7 Concentración de ácido acético, propiónico e iso-butírico en T2	53
Figura 5.2.8 Concentración de ácido Butírico, iso-valérico y Valérico en T2	54
Figura 5.2.9 Concentración total de ácidos grasos volátiles en T2	55



INTRODUCCIÓN

El incremento del agua residual que se trata en México, ocasiona que la cantidad de lodos que se generan durante dicho tratamiento aumente de manera proporcional. Este material de desecho presenta problemas para su disposición final, si antes no se le da un adecuado tratamiento ya que su origen, las aguas residuales, conservan algunas características negativas, en particular la presencia de organismos tales como bacterias, protozoarios, virus, hongos, y huevos de helmintos, los cuales pueden causar enfermedades al estar en contacto con el ser humano, en forma directa o indirecta. Para que un lodo no presente riesgo alguno para la salud humana, debe cumplir ciertos requisitos relacionados tanto con la reducción en la concentración de ciertos patógenos como con la reducción de las condiciones de atracción para los vectores.

En la actualidad, el manejo integral de los lodos residuales ha cobrado gran importancia debido al potencial de reuso benéfico que éstos presentan. A nivel mundial los lodos adecuadamente tratados han sido usados como fertilizantes orgánicos, en muchos cultivos de producción alimentaria y ornamentales, además de poder ser aplicados como mejoradores de suelo en sitios degradados. En los Estados Unidos, más del 60% de los lodos generados son aprovechados benéficamente, pero solo el 41% son aplicados en suelos agrícolas (EPA, 1999). En diversos países de Europa, su aplicación en suelos es la práctica más empleada para reutilizar los lodos, representando aproximadamente entre el 45 y 56% del reuso total (Lue-Hing et al., 1996 y Bastian, 1997). En México su manejo se ha limitado a la disposición de lagunas y rellenos sanitarios principalmente; sin embargo, se espera que la tendencia se enfoque al reuso benéfico con la aplicación de la Norma Oficial Mexicana (NOM-004-SEMARNAT-2002), que establece especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para el aprovechamiento y disposición final de los lodos residuales y biosólidos. Esta norma regula el contenido de metales y microorganismos así como la reducción de la atracción de vectores.

Dentro de las opciones de tratamiento de lodos existen los procesos convencionales (digestión aerobia y anaerobia, elaboración de composta y estabilización alcalina) y los no convencionales. En estos últimos se incluyen procesos de tratamiento que no han sido del todo estudiados y que no se conoce a detalle su eficiencia en la estabilización de lodos. La selección de alguno de estos procesos para la estabilización de un lodo en particular depende de varios factores como: la cantidad y calidad de lodos a tratar, las condiciones particulares del sitio y la situación financiera en cada caso (Lue Hing, 1992). Para lograr cumplir con los límites de microorganismos que establece la normatividad mexicana, es necesario aplicar algún proceso de tratamiento que reduzca considerablemente los contenidos de coliformes fecales, *Salmonella spp.* y huevos de helminto en los lodos.



La tecnología de la digestión anaerobia ha sido comúnmente usada para la estabilización de lodos de desecho, debido a las ventajas que presenta respecto a otros métodos, como la conversión y reducción de lodos sin la necesidad de insumos, con costos de operación y mantenimiento relativamente bajos (Noyola, 1998a).

En la digestión anaerobia de lodos provenientes de un TPA del agua residual, en el cual se utilizan $Al_2(SO_4)_3$ como coagulante y un polímero aniónico de alto peso molecular como floculante, se ha observado la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV's), principalmente ácido propiónico (Cabirol *et al.*, 2002). Esta acumulación disminuye la capacidad buffer del sistema con riesgo de reducir el pH y alcanzar una baja conversión de la materia orgánica a metano, lo cual redundaría en un proceso de digestión anaerobia inestable e ineficiente (Orozco, 2002). Jackson-Moss y Duncan (1991) y Cabirol *et al.* (2003), determinaron que el aluminio presenta un efecto de inhibición para la digestión anaerobia. Adicionalmente, Cabirol *et al.* (2003) encontraron que las bacterias metanogénicas acetoclásticas y las acetógenas productoras obligadas de hidrógeno (OHPA) eran particularmente inhibidas por la presencia de aluminio durante la digestión anaerobia de lodo TPA y que este metal y los sulfuros también presentes, tenían un efecto de inhibición sinérgico.

Por otro lado, con el fin de optimizar la producción de biogás para recuperación de energía, se ha estudiado el efecto de aplicar pretratamientos o aditivos para mejorar las características de los lodos con el fin de favorecer el crecimiento de los microorganismos en la etapa metanogénica, suministrándoles los nutrientes necesarios para su crecimiento o para mejorar la digestibilidad del lodo (Zehnder 1978; Speece 1983; Stuckey *et al.*, 1984; Daniela *et al.*, 1986).

Con base en lo anterior, este estudio pretende aportar información sobre el efecto de la aplicación de metales traza para mejorar la estabilización anaerobia termofílica de los lodos de desecho provenientes de un TPA y obtener biosólidos, susceptibles de utilizarse como mejoradores de suelos, de conformidad con la NOM-004-SEMARNAT-2002.



RESUMEN

El tratamiento de aguas residuales produce lodos que, sin un adecuado tratamiento, constituyen riesgos importantes para el ambiente y la salud pública, por ser concentrados de los contaminantes originalmente presentes en el agua residual. Para reducir estos riesgos, entre las diversas opciones para la estabilización y digestión de los lodos se encuentra la digestión anaerobia, proceso en el que diferentes grupos de microorganismos asimilan y degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno, teniendo como productos finales principalmente metano, dióxido de carbono y materia celular.

En estudios anteriores sobre digestión anaerobia de los lodos provenientes de un tratamiento fisicoquímico (Tratamiento Primario Avanzado, TPA), en el cual se utilizan sulfato de aluminio [$Al_2(SO_4)_3$] como coagulante y un polímero aniónico de alto peso molecular como floculante, se observó un proceso inestable e ineficiente. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de aditivos nutrientes en la estabilización anaerobia termofílica de dos tipos de lodos de desecho, uno proveniente de una planta de tratamiento fisicoquímico (TPA) y otro proveniente de una planta de tratamiento por lodos activados (Tratamiento Convencional, TC).

Para el desarrollo experimental de esta investigación se operaron dos digestores en régimen semicontinuo y mezcla completa, ambos en forma de huevo y volumen efectivo de tratamiento de 5 L. El digestor denominado T1, alimentado con lodo convencional, se mantuvo operando a Tiempo de Residencia Hidráulico (TRH) de 13 días; en el día 57 se comenzó a agregar una dosis de micronutrientes (metales traza: Fe, Co, Ni y Mo). Al día 245 se inició la adición de un aditivo comercial, sin dejar de suministrar la dosis de metales. Con lo que respecta a T2, alimentado con lodo de TPA, se comenzó operando con un TRH de 20 días y la misma dosis de micronutrientes del digestor T1; posteriormente se cambió el tiempo de residencia a 25 días y en el día 223 se comenzó la adición del aditivo, sin dejar de suministrar la dosis de metales.

El reactor T2 tuvo mayores problemas para digerir el tipo de lodo alimentado. Con los metales y el aditivo, se registró un limitado aumento en la producción de biogás, con un adecuado porcentaje de metano, y un incremento en la relación de alcalinidades, resultados que se correlacionan con una disminución en la concentración de ácidos grasos volátiles. Sin embargo, la remoción de sólidos volátiles (%RSV) fue baja e incluso disminuyó a lo largo de las tres etapas aplicadas a este digestor. Para el digestor T1, tanto los metales como el aditivo contribuyeron a lograr mejores resultados, al incrementar el biogás generado y el porcentaje de metano.

La estabilización de lodos provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales con TPA presenta problemas de inhibición. Los resultados obtenidos permiten recomendar el uso de la dosis de metales y del aditivo utilizados en este trabajo para mejorar el proceso, más no eliminar la dicha inhibición. En relación con los lodos convencionales, se recomienda el uso de aditivo y metales.



1. ANTECEDENTES

1.1 NORMATIVIDAD

La mayoría de los países desarrollados cuentan con estándares para el manejo adecuado de los biosólidos; por ejemplo, US EPA desarrolló los estándares de calidad de los lodos para uso y disposición, conocidos como el apartado 503 del código de regularizaciones federales (CFR). En dichos estándares se incluyen límites para metales y parámetros microbiológicos, los cuales han sido establecidos con base en estudios de riesgo para disminuir el impacto ambiental y a la salud pública. De esta forma, se establecieron dos clases de lodos en función de su calidad:

- Clase A que presentan niveles de coliformes fecales, *Salmonella spp*, virus y huevos de helmintos por debajo de los límites de detección porque pueden ser aplicados sin restricción en algunos suelos agrícolas, áreas verdes como parques públicos, jardines, etc. Esta clase tiene el inconveniente del costo elevado para producirla.
- Clase B que contienen concentraciones relativamente bajas de microorganismos y que pueden aplicarse en suelos agrícolas, forestales y degradados.

Por su parte, en México se desarrolló y publicó la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 que establece tres niveles de biosólidos, las clases A, B, y C. La Tabla 1.1 presenta los límites máximos permisibles de contaminantes microbiológicos (para las normatividades de ambos países) en lodos y biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales.

Tabla 1.1. Valores máximos permisibles de microorganismos en biosólidos según la USEPA y la NOM-004-SEMARNAT-2002

Parámetros microbiológicos	US EPA		NOM-004-SEMARNAT-2002		
	Biosólidos Clase A	Biosólidos Clase B	Biosólidos Clase A	Biosólidos Clase B	Biosólidos Clase C
Coliformes Fecales	< 1000 NMP/ g ST	< 2x10 ⁶ NMP/ g ST	< 1000 NMP/ g ST	< 1000 NMP/ g ST	< 2x10 ⁶ NMP/ g ST
Salmonella spp.	< 3 NMP/ 4g ST	No aplica	< 3 NMP/ g ST	< 3 NMP/ g ST	< 300 NMP/ g ST
Huevos de Helmintos	< 1 HH/ 4g ST	No aplica	< 1 (*) HH/ g ST	< 10 HH/ g ST	< 35 HH/ g ST
Virus entéricos	< 1 V/ 4g ST	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica

(*) Huevos de helmintos viables



Los lodos de plantas municipales pueden contener organismos parásitos y patógenos de origen fecal. Algunas de las características que los hacen relevantes en materia de salud pública son:

- Coliformes fecales (es sólo indicador de contaminación). El grupo Coliforme se define como aquel formado por las bacterias aerobias y anaeróbicas facultativas, gramnegativas, no esporuladas y de forma alargada, que desarrollan una colonia roja con un brillo metálico tras incubarse a 35 y 44.5 °C durante 3 y 21 horas respectivamente (NOM-004-SEMARNAT-2002). Desde el punto de vista de la salud los coliformes fecales son los más importantes indicadores de agua contaminada, dado que se relaciona con la probabilidad de encontrar patógenos (bacterias, parásitos y virus entéricos) excretados por el humano (Fernández, 1981).
- Huevos de helminto. Helminto es el término general para describir lombrices parásitos. Las dimensiones de los helmintos varían de 1mm a varios metros de longitud, poseen órganos diferenciados y sus ciclos vitales comprenden la producción de huevos o larvas infecciosas. Los huevos, que es la forma en la cual se encuentran en el agua, tienen tamaños de 20 a 80 μm (Jiménez et al., 2000), son resistentes a los cambios ambientales, muy persistentes y pueden ser transmitidos al ser humano a través de la ingestión de carne, productos agrícolas regados con agua contaminada, agua contaminada y por contacto con el suelo y heces fecales (Ingraham et al., 1998).
- *Salmonella spp.* El género *Salmonella spp* pertenece a la familia enterobacter e incluye a más de 2000 serotipos que infectan al hombre. Es un bacilo gramnegativo, anaerobio facultativo, móvil mediante flagelos peritricos y con dimensiones de 2 a 3 μm de diámetro. Las Salmonellas se transmiten por vía indirecta cuando la materia fecal de los pacientes o de los portadores contaminan el agua potable, los alimentos o cultivos regados con aguas negras. Los miembros del género *Salmonella spp* causan principalmente tres tipos de enfermedades en el hombre: fiebre tifoidea o fiebres entéricas, gastrointestinales y septicemia (Ingraham et al., 1998).

El contenido de metales también ha sido limitado para poder reutilizar o depositar los lodos. Tanto la US EPA como la NOM-004-SEMARNAT-2002 establecen los límites máximos de metales para dos clases de biosólidos propuestas. La Tabla 1.2 presenta los límites máximos permisibles de metales pesados en biosólidos establecidos en ambas normas.



Tabla 1.2. Valores máximos permisibles en mg/kg de metales pesados en biosólidos según la USEPA y la NOM-004-SEMARNAT-2002

Parámetros	US EPA		NOM-004-SEMARNAT-2002	
	Biosólidos Clase A	Biosólidos Clase B	Biosólidos Excelentes	Biosólidos Buenos
Arsénico	75	75	41	75
Cadmio	85	85	39	85
Cobre	4300	4300	1500	4300
Cromo	No aplica	No aplica	1200	3000
Plomo	840	840	300	840
Mercurio	57	57	17	57
Molibdeno	75	75	No aplica	No aplica
Níquel	420	420	420	420
Selenio	100	100	No aplica	No aplica
Zinc	7500	7500	2800	7500

En el caso de México, el aprovechamiento de los biosólidos se establece en función del Tipo y Clase, como se especifica en la Tabla 1.3 y su contenido de humedad hasta el 85%.

Tabla 1.3. Aprovechamiento de biosólidos

Tipo	Clase	Aprovechamiento
EXCELENTE	A	Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación Los establecidos para Clase B y C
EXCELENTE O BUENO	B	Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación Los establecidos para Clase C
EXCELENTE O BUENO	C	Usos forestales Mejoramiento de suelos Usos agrícolas



1.1.1. CALIDAD DE LOS LODOS EN MÉXICO

El depósito final o el uso potencial de los lodos depende de su calidad, la cual es función del agua residual de origen y del tratamiento aplicado a la misma. Barrios et al. (2001) evaluó la calidad de los lodos de 18 plantas de tratamiento de aguas residuales ubicadas a lo largo del territorio nacional. Los resultados demostraron que la concentración de metales pesados en los lodos cumplió en 16 casos con los límites para biosólidos denominados “buenos” y solo en dos de los casos la calidad de los lodos en términos de metales pesados fue “excelente”; de acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002.

El contenido de metales pesados en lodos de la Ciudad de México ha sido determinado en concentraciones muy inferiores a los límites establecidos por la US EPA y la NOM-004-SEMARNAT-2002 y no representan un problema de contaminación (Garcapiña et al., 2000 y Jiménez et al., 1997). La figura 1.1 presenta el porcentaje de metales pesados en relación con cada concentración límite; se observa que en ningún caso se rebasó el valor máximo permitido en los metales evaluados (o sea el 100%).

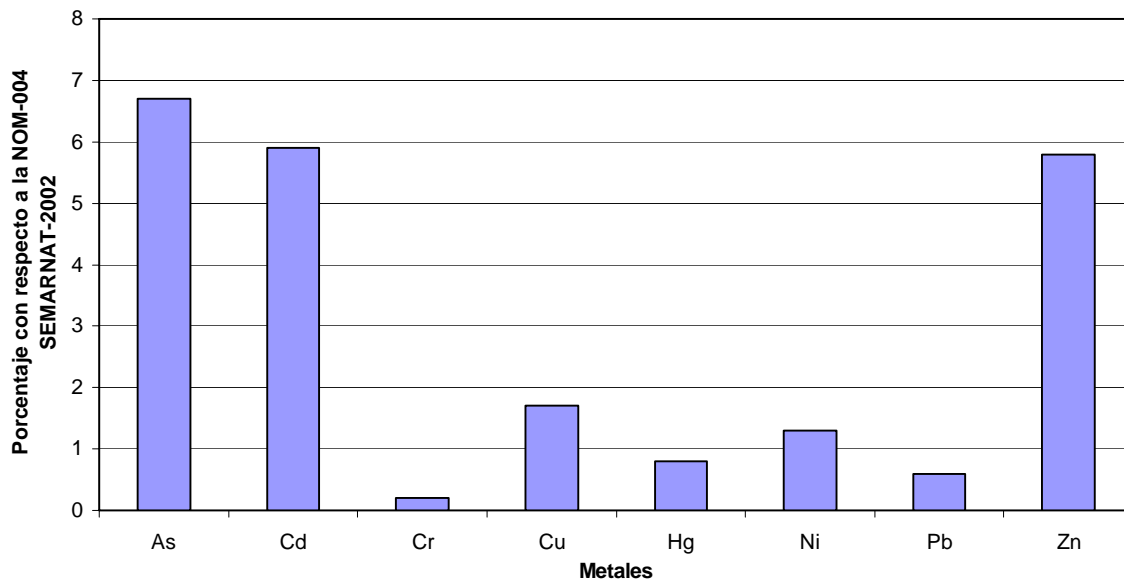


Figura 1.1 Concentración de metales pesados en lodos del Distrito Federal
Adaptación de : Garcapiña et al. (2000) y Jiménez et al., (1997).



1.1.2. PROBLEMÁTICA DE LOS LODOS EN MÉXICO

Infraestructura de tratamiento de aguas residuales en México

En el año 2005 se trataron en México 71.8 m³/s de aguas residuales municipales, correspondientes al 35% del total producido (205 m³/s), mientras que para las aguas residuales industriales se trató solo el 15% (i.e. 26.8 m³/s de 179 m³/s generados) (CNA, 2006).

En materia de tratamiento de aguas residuales municipales, existen en México 1666 plantas de tratamiento de agua con capacidad instaladas de 101.3 m³/s, de éstas solo 1433 operan. Los procesos de tratamiento para los efluentes municipales son diversos, aunque predominan las lagunas de estabilización y los lodos activados (CNA, 2006). Adicionalmente, la Comisión Nacional del Agua, indica que al cumplir las ciudades mayores de 50,000 habitantes con la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT 1996, se tratarían de 158 m³/s de aguas residuales, mismos que generarían aproximadamente 0.13 kg ST/m³ de lodos residuales, es decir, cerca de 640,000 toneladas secas de lodo por año (CNA, 2000).

Del total de lodos producidos en plantas de tratamiento de aguas residuales, una importante cantidad no es tratada ni manejada adecuadamente. Afortunadamente, con la entrada en vigor de la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, se establecen los límites máximos permisibles de contaminantes para el aprovechamiento y disposición de lodos y biosólidos, por lo que las plantas de tratamiento de aguas estarán obligadas a cumplir con diversos criterios y deberán implantar y desarrollar tecnologías que produzcan biosólidos que puedan ser depositados o reutilizados apropiadamente.

1.2 LODOS RESIDUALES

1.2.1. CLASIFICACIÓN

Los lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales son generados en distintas etapas del tren de tratamiento y sus características dependen de las operaciones y procesos que se apliquen durante el mismo. Para realizar el tratamiento de aguas residuales existen procesos biológicos y fisicoquímicos. De acuerdo con esto se puede hacer la siguiente clasificación de los lodos producidos.

Lodos primarios:

Proceden del proceso de sedimentación primaria, en promedio su porcentaje de sólidos es del 5%, son generalmente de color gris, de aspecto grasoso y en la mayoría de los casos producen un olor extremadamente molesto (Winkler 1994).



En estos lodos se encuentra presente una gran variedad de microorganismos cuyo origen es primordialmente intestinal, aunque pueden ser de otras fuentes.

Lodos secundarios:

Se producen a partir de la actividad biológica de los microorganismos que intervienen en el proceso de tratamiento y son separados en la unidad de sedimentación secundaria; sus características dependen básicamente del proceso biológico empleado en el tratamiento de aguas residuales y del sustrato. Los procesos biológicos más comunes en el tratamiento de aguas residuales son los lodos activados y los filtros percoladores (Metcalf & Eddy, 1996).

Lodos fisicoquímicos:

Son producto de la sedimentación de los sólidos suspendidos y material coloidal del agua residual, como resultado de los procesos de coagulación y floculación por la adición de reactivos químicos.

1.2.2. CARACTERÍSTICAS

Las características y composición de los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua residual municipal dependen del origen de la misma y del proceso que los produce. Entre las más importantes se encuentran las siguientes:

Características físicas

- 1) **Contenido de sólidos:** El contenido de sólidos generalmente se expresa en g/L o porcentaje de sólidos (peso/volumen). Por ejemplo, los lodos activados contienen menos de 1% (10 g/L) de materia sólida, el de los filtros percoladores de 0.5 a 2% de sólidos y los lodos del tratamiento primario hasta 5%. La proporción de materia orgánica en los sólidos de los lodos está entre 70 y 80% (Winkler, 1994).
- 2) **Tamaño de partícula:** El tamaño de partícula en un lodo es altamente variable y es un factor que incide directamente en la facilidad para desaguar un lodo. Si las partículas tienen un tamaño entre 1 y 10 micras, el secado es más difícil.
- 3) **Sedimentabilidad o velocidad de sedimentación:** La capacidad de sedimentación de un lodo depende de la concentración de sólidos suspendidos del mismo, de la viscosidad del líquido, del tamaño y forma del sedimentador y particularmente de las propiedades químicas, físicas y electrostáticas de la materia en suspensión. Los lodos, al tener normalmente una concentración elevada de sólidos, no sedimentan de manera discreta sino zonal, es decir, la sedimentación individual de las partículas se ve obstaculizada debido a la presencia de partículas colindantes.



- 4) **Forma en que se encuentra el agua:** La manera en que se encuentra el agua en los lodos determina la mejor forma de separarla del sólido. El agua puede encontrarse en cuatro formas distintas (Vesilind et al, 1986):
- *Agua libre:* Es el agua que se encuentra débilmente ligada a las partículas, incluso puede considerarse que no está adherida a los sólidos y puede liberarse al sedimentar las partículas por acción de su propio peso.
 - *Agua de flóculo:* Es el agua atrapada en los flóculos formados y cuya liberación se logra al comprimirlos. Los métodos empleados para removerla son mecánicos como los filtros banda o prensa.
 - *Agua capilar:* Es el agua, presente en los flóculos, pero unida por fuerzas capilares. Esta puede eliminarse si el lodo es compactado a presiones muy altas.
 - *Agua particulada:* Es el agua que forma parte de la composición química de las partículas y su eliminación se logra únicamente por acción química o térmica, modificando la estructura de las partículas.
- 5) **Reología:** Es importante para el estudio de los lodos su caracterización como fluido. Colin (1983) distingue cuatro categorías de lodo desde el punto de vista reológico, estos son lodos líquidos, lodos plásticos, lodos sólidos susceptibles de ser compactados y lodos con volumen constante.

Características químicas

Estas definen las opciones de tratamiento y en cierta forma la disposición final. Pueden dividirse en inorgánicas y orgánicas.

- 1) **Inorgánicas:** Son todos aquellos parámetros a considerar que no incluyen carbono orgánico. Los dos más importantes son:
- *Metales pesados:* Su acumulación produce impactos ambientales negativos, causando trastornos no solo en el ser humano sino también en especies animales, vegetales e incluso de otros reinos. Entre los de más relevancia encontramos al arsénico, al cadmio y al mercurio por mencionar algunos. Montalvo y Guerrero (2003), consideran que en los procesos de digestión anaerobia, los efectos tóxicos que causan los metales son los siguientes: interfieren en la membrana de las células de los microorganismos disminuyendo el potencial energético de la cadena de transporte de electrones; destruyendo el metabolismo enzimático e inactivan a las enzimas al reaccionar los metales con los grupos HS⁻ de los aminoácidos. Chiu-Yue Lin (1992), mencionan que



los efectos tóxicos causados por metales, son más fuertes en las bacterias metanógenas que en las acetógenas.

- *Nutrientes:* Considerando el hecho que el lodo es ampliamente usado con fines agrícolas, es muy importante conocer su contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, para determinar su valor como mejorador de sus suelos.

- 2) **Orgánicas:** La materia orgánica en los lodos es de origen animal y vegetal, principalmente microorganismos. Es importante considerar a la materia orgánica susceptible de ser degradada por acción microbiana, que se considera como una medida de la carga contaminante de los residuos, y a los tóxicos orgánicos, difícilmente biodegradables, poco solubles en agua, lipofílicos y por ende altamente acumulables en los tejidos. Estos compuestos son altamente tóxicos y potencialmente carcinogénicos. Dentro de los tóxicos orgánicos se encuentran dos grupos prioritarios por su alta toxicidad: los pesticidas organohalogenados como el DDT y los hidrocarburos aromáticos polinucleares. Una vez que el lodo es dispuesto en el suelo, estos compuestos pueden dispersarse por volatilización, dependiendo de la temperatura ambiental, el método de aplicación y la velocidad del viento, y por fotodescomposición, que se da por la incidencia de la radiación solar en el lodo.

Características biológicas

La característica biológica más importante en los lodos residuales es la presencia de microorganismos patógenos. Los lodos al ser el subproducto obligado del tratamiento de las aguas residuales, acarrean organismos patógenos, que si el lodo no es tratado adecuadamente, pueden causar problemas sanitarios al ser dispuestos en el suelo. Debido a que los lodos son obtenidos generalmente por procesos de sedimentación de las aguas residuales, la concentración de microorganismos es mucho mayor, variando en especies y densidad dependiendo de las condiciones de salud de la población y de las diferentes épocas del año.

Debido a los problemas del tiempo y costo que presenta el monitoreo de microorganismos patógenos, se recurre al uso de un indicador que permite estimar el grado de contaminación biológica presente en las aguas y lodos residuales. El grupo de microorganismos denominados coliformes es el generalmente utilizado como indicador. Han sido utilizados como indicadores porque muchos son originarios del tracto digestivo del hombre y de los animales de sangre caliente, no son patógenos, son fáciles de aislar y normalmente sobreviven más tiempo que los microorganismos que producen enfermedades. Los coliformes pueden dividirse en totales y fecales, siendo la principal diferencia entre ellos, la capacidad de los fecales de crecer a mayor temperatura en condiciones de laboratorio (Peiczar, Reid y Chan, 1988).

1.2.3. TRATAMIENTO



Los procesos para tratar los lodos varían según el tipo de agua residual de la que se derivan, del proceso utilizado para el tratamiento de éstas y del método de disposición al que serán destinados los lodos. Los objetivos principales del tratamiento de los lodos son reducir su masa y volumen, para facilitar su manipulación, y aumentar su estabilidad biológica a fin de producir un material suficientemente inofensivo para su disposición. Generalmente, los lodos residuales pasan por el siguiente tren de tratamiento para su disposición final: pretratamiento, espesamiento, estabilización, acondicionamiento (incluyendo desinfección), deshidratación y secado.

Pretratamiento:

Esta etapa tiene la finalidad de que la alimentación a las instalaciones de tratamiento sea relativamente constante y homogénea, así como prevenir el desgaste de ciertos equipos como bombas y sistema de distribución. En el pretratamiento se maneja generalmente cuatro operaciones (Metcalf & Eddy, 1996): dilaceración, desarenado, mezclado y almacenamiento.

Espesamiento:

Consiste en reducir el volumen del lodo a manipular, aumentando la concentración de los sólidos en el mismo. En esta etapa un pequeño incremento en la concentración de los sólidos redundará en una gran reducción en el volumen de agua de los lodos. El espesado se suele llevar a cabo mediante procedimientos físicos que incluyen la flotación, el espesado por gravedad y la centrifugación (Winkler, 1994). Si los lodos se van a estabilizar por digestión anaerobia, su espesamiento no debe pasar del 7% en sólidos totales (70 g/L), considerándose como óptima una concentración entre el 3 y el 6%, con objeto de no afectar las propiedades reológicas del lodo y sus consecuencias en bombas, tuberías y mezcladores (Noyola, 1998b).

Estabilización:

Es el proceso en el que se busca eliminar los olores desagradables, inhibir, reducir o eliminar el potencial de descomposición espontánea, reducir la presencia de patógenos, disminuir la atracción de vectores y transformar en la medida de lo posible a la materia orgánica en compuestos más simples y asimilables, esto último sobre todo si al lodo se le va a dar un uso agrícola. Los procesos de estabilización pueden dividirse en biológicos y químicos (Metcalf & Eddy, 1996 y WEF, 1993).

I. Estabilización biológica: Es la estabilización de los lodos mediante la transformación que se da a través de la acción de microorganismos, principalmente bacterias; existen tres tipos principales de procesos biológicos para la estabilización.

➤ **Digestión Anaerobia:** Este proceso se encuentra entre las formas de tratamiento de residuos más antiguas. En la digestión anaerobia la materia orgánica se estabiliza



mediante microorganismos en ausencia de oxígeno, produciendo principalmente metano y dióxido de carbono. Este proceso suele tener lugar en intervalos mesofílico (35°C) y termofílico (55°C) de temperatura. Los reactores de digestión anaerobia pueden ser cilíndricos o con forma de huevo; los cilíndricos son los más populares aunque actualmente han entrado en aplicación los reactores tipo huevo por favorecer los fenómenos de transferencia de masa y eliminar la necesidad de limpiar los tanques, aunque son más costosos en su construcción.

- *Digestión Aerobia:* En este caso, la estabilización de los lodos se da en presencia de oxígeno, obteniendo como productos finales dióxido de carbono agua y amoníaco, el cual puede oxidarse, si las condiciones lo permiten, hasta nitrato. Este proceso suele emplearse en el tratamiento de los lodos secundarios y en plantas con capacidad inferior 20,000 m³/d. Sin embargo, recientemente se han empleado en plantas de mayor capacidad. Estos reactores son de forma rectangulares o cilíndricos.
- *Composteo:* Es un proceso generalmente aerobio que implica una compleja destrucción de la materia orgánica junto con la producción de sustancias húmicas para dar lugar a una producto final estable. A diferencia de la digestión tanto aerobia como anaerobia, en el composteo se necesita deshidratar el lodo, es decir, se requiere un porcentaje de sólidos entre 40-60%. El sistema de composteo más utilizado es la pila estática aireada, que consiste en una red de tuberías de conducción de aire sobre las que se distribuye una mezcla de lodo deshidratado y un material de soporte, como astillas de madera, residuos de poda de árboles, que se añade al lodo para proporcionarle soporte estructural y aumentar su porosidad con el fin de mejorar la aireación. Dicha aireación no solo es necesaria para aportar oxígeno a los microorganismos, sino también para controlar la temperatura y eliminar la humedad excesiva (Metcalf & Eddy, 1991; WEF, 1993). Una característica importante del composteo es que conforme se estabiliza la materia orgánica, la pila se va calentando hasta alcanzar temperaturas entre 50 y 70 °C que permiten la destrucción de organismos patógenos y la conversión de aproximadamente 20 al 30% de los sólidos volátiles a dióxido de carbono y agua.

II. Estabilización química: Consiste en el uso de compuestos químicos como la cal y el cloro. La estabilización con cloro se usa escasamente, mientras que la cal es ampliamente usada, siendo ésta, de bajo costo de inversión (Lue-Hing et al ,1992).

La estabilización con cal consiste en añadir al lodo dosis suficientes de cal (alrededor de 0.3 kg Ca(OH)₂/ kg ST) para elevar su pH por encima de 12. Dado que la reacción de la cal con el agua del lodo es exotérmica, la temperatura se incrementa, alcanzando valores superiores a 50 °C. El efecto combinado de un entorno fuertemente alcalino, además del efecto de pasteurización debido a la temperatura, hace desfavorable la actividad biológica de los microorganismos, reduciendo sustancialmente el número de microorganismos patógenos.

Como consecuencia de ello, el lodo no se pudre, tiene olor a amoníaco y no provoca riesgos para la salud pública. Sin embargo estas condiciones se mantendrán si el pH no desciende del valor de 11, por lo menos 2 horas después del tratamiento. El lodo



estabilizado con cal presenta condiciones favorables para su disposición en relleno sanitario, en suelos forestales ácidos, e inclusive en suelos no alcalinos destinados al cultivo (Lue-Hig et al 1992).

Acondicionamiento:

Se utiliza para facilitar la concentración del lodo con la finalidad de realizar una buena deshidratación. El acondicionamiento, cuando es químico, puede lograrse mediante iones inorgánicos polivalentes o polielectrolitos, logrando reducir la humedad del lodo hasta niveles del 65%.

Otro tipo de acondicionamiento es el térmico, el cual requiere altas temperaturas (180-200 °C) y presiones (10-20 atm) durante cortos periodos de tiempo. En este tipo de acondicionamiento, aparte de destruir la afinidad de los sólidos por el agua, se consigue la esterilización de los lodos.

Desinfección:

La desinfección de los lodos está adquiriendo gran importancia como proceso adicional debido a las estrictas normas aplicables a la reutilización de lodos y su aplicación en suelos.

En la pasteurización, la temperatura se eleva hasta los 70 °C durante 30 minutos, permitiendo con esto, la inactivación de organismos patógenos y parásitos. Los dos métodos que se emplean para la pasteurización de lodos son la inyección directa de vapor y el intercambio directo de calor; aunque también se aplica la digestión aerobia termofílica en combinación con la digestión anaerobia para lograr este fin (digestión en dos fases) (Metcalf & Eddy, 1991).

En el almacenamiento a largo plazo el lodo líquido digerido se acumula en lagunas excavadas en el suelo, por lo que se requiere disponer un terreno suficiente. Los tiempos de retención típicos que se necesitan para la desinfección de lodos varían entre 60 y 120 días, a las temperaturas de 20 y 4 °C respectivamente (Metcalf & Eddy, 1991).

Para evitar una posible contaminación debida a las lagunas de almacenamiento de lodos, éstas deben contar con un buen diseño, especialmente en relación con la percolación y el desarrollo de malos olores.

Deshidratación:

Es la remoción física de suficiente cantidad de agua de los lodos para que adquiera características casi sólidas, debido a alguna o varias de las siguientes razones: se reduce el costo de transporte al reducir el volumen del lodo, es más fácil de manipular que un



lodo líquido, es necesario para procesos subsecuentes como incineración o composteo, se reduce el potencial de putrefacción en algunos casos y se reduce la producción de lixiviados si el lodo se dispone en un relleno sanitario. Para la deshidratación se utilizan tecnologías como la filtración al vacío con tambor rotatorio, filtros banda, filtros prensa, lechos de secado y el centrifugado (Winkler, 1994).

Secado:

Es una operación unitaria que involucra la reducción del contenido de agua por la vaporización de ésta en aire. Si se utilizan lechos de secado, la evaporación a la atmósfera se produce por la diferencia en las presiones de vapor. Pero, si se utiliza secado mecánico se aporta calor externo para aumentar la capacidad de retención de vapor del aire ambiental y para proporcionar el calor latente necesario para la evaporación. Después del secado, el contenido de humedad del lodo es menor al 10%. Los lodos secos pueden aprovecharse como fertilizantes o acondicionadores del terreno, pero los costos de secado son elevados.

Reducción térmica:

Es un proceso que se aplica principalmente a los lodos deshidratados, y no es recomendable para lodos ya estabilizados, especialmente por digestión aerobia y anaerobia, ya que la estabilización por estos métodos reduce el contenido volátil de los lodos y por lo tanto aumentan las necesidades de combustible auxiliar. De acuerdo a Metcalf & Eddy (1991), las principales ventajas y desventajas que presenta el proceso de reducción térmica son las siguientes;

Ventajas

- Máxima reducción de volumen, disminuyendo así las necesidades de disposición final.
- Destrucción de organismos patógenos y compuestos tóxicos.
- Posible recuperación de energía.

Desventajas

- Altos costos de inversión inicial y de operación.
- Efectos negativos de los residuos producidos, asociados a emisiones de aire y cenizas.
- La evacuación de los residuos es complicada y costosa, debido a que pueden llegar a ser considerados como peligrosos.

Los procesos de reducción térmica son la incineración en hornos de pisos múltiples, incineración en hornos de lecho fluidizado, incineración conjunta, oxidación por vía húmeda y oxidación por vía húmeda con reactores profundos.

1.3 DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia se lleva a cabo en ambientes que se caracterizan por la ausencia total de oxígeno molecular, en donde se realizan una serie de procesos bioquímicos



complejos a través de los cuales diversos grupos de microorganismos degradan la materia orgánica, generando como productos finales materia celular, metano y dióxido de carbono.

1.3.1. HISTORIA

La digestión anaerobia es el método más común de estabilización de lodo con producción simultánea de energía. El primero en tener conocimiento de que se producía un gas combustible que contiene metano fue Donald Cameron, que construyó el primer tanque séptico en la Ciudad de Exeter, Inglaterra, en 1895, del que recogió y utilizó el gas para el alumbrado de los alrededores de la planta. En 1904 se instaló en Hampton, Inglaterra, el primer tanque de doble acción (sedimentación- digestión) al incorporar la sedimentación al tratamiento de lodos. Se conocía con el nombre de tanque hidrolítico de Travis y funcionó hasta 1936. Entre 1909 y 1912 se llevaron a cabo experimentos en una instalación similar denominada tanque biológico. Bajo un diseño semejante en 1940, Kart Imhoff patentó en Alemania un tanque de doble acción hoy día conocido como tanque Imhoff. Una de las primeras instalaciones que, en los Estados Unidos, empleó tanques de digestión separados, fue la planta de tratamiento de agua residual de Baltimore (Maryland). Se construyeron tres tanques de digestión rectangulares como parte de la planta original en 1911; más adelante, en 1914 se añadieron 16 tanques de digestión circulares y, posteriormente, se instaló un tanque rectangular en 1921.

En el periodo comprendido entre 1920 y 1935 se estudió ampliamente el proceso de digestión anaerobia, realizando mejoras considerables en los reactores, principalmente el calentamiento y el mezclado, logrando con esto mejores rendimientos. Los conceptos de digestión de alta y baja tasa surgieron en esta época.

La digestión anaerobia termofílica de los lodos ha sido investigada desde los años veinte, encontrando estudios muy importantes sobre la producción termofílica de metano a partir de residuos, como el realizado por Rudolfs y Heukelekian a fines de los años veinte (Zinder, 1988). Desde ese tiempo, se encontró que la digestión anaerobia termofílica tenía velocidades de reacción mayores a las experimentadas en condiciones mesófilicas y favorecía la sedimentabilidad de los sólidos. Esos dos aspectos han sido ampliamente corroborados en fechas más recientes (Hashimoto, 1982; Varel et al., 1980). Además, se ha demostrado que la reducción de microorganismos indicadores y patógenos es más eficiente a altas temperaturas (Varel et al., 1980, Lee, 1989). Hashimoto en 1982 encontró que la velocidad máxima de crecimiento, μ_m , y la tasa de utilización de sustrato para la digestión anaerobia de residuos, se incrementó linealmente con las temperaturas entre 20 y 60 °C y que por encima de los 60 °C había un descenso en el valor de μ_m .

Hashimoto también encontró que cuando las cargas orgánicas eran altas o los tiempos de retención cortos, la digestión anaerobia a altas temperaturas podría ser mucho más favorable que bajo condiciones mesófilicas. Esto se ha demostrado en experimentos de laboratorio ya que la digestión termofílica aumenta las capacidades de los digestores mediante la adición



de calor, lo que no representa a la larga costos adicionales (Rowe, 1971) y puede tener una tasa de producción de biogás hasta 50% mas alta que la digestión mesofílica (Pfeffer, 1974).

Por otro lado, se han hecho algunos estudios examinando el efecto combinado de la temperatura y el ion amonio. El ion amonio es un nutriente necesario para el crecimiento del consorcio bacteriano anaerobio (McCarty, 1964), pero cuando las concentraciones exceden un cierto límite, la metanogénesis se inhibe (McCarty y Mkinney, 1961; McCarty, 1964; Koster y Lettinga, 1984). Se ha encontrado también, que la cantidad de amonio libre se incrementa con la temperatura, lo cual redundará en un aumento en los ácidos grasos volátiles (metabolitos intermedios del proceso anaerobio) por lo que se tiene mayor concentración de éstos en la digestión anaerobia termofílica que en la mesofílica (Garber et al, 1975; Zeeman et al., 1985).

Desde el punto de vista microbiológico, el primer hecho importante fue el aislamiento de la primera especie anaerobia termofílica, *Methanobacterium thermoautotrophícum*, de un digestor de lodos en 1972 por Zeikus y Wolfe, la cual crecía de manera óptima entre los 65 y 70 °C. A partir de ahí se intensificaron los esfuerzos para develar los aspectos fundamentales de la microbiología termofílica, descubriendo, tal vez como lo más importante, el hecho de su versatilidad nutricional, al existir especies tanto autótrofas como heterótrofas, así como litótrofas y quimiótrofas (Sundaram, 1986). La gran duda de cómo es que los termofílicos resistían tales temperaturas no ha sido resuelta del todo, pero se ha encontrado que cuentan con proteínas más estables térmicamente debido al aumento de interacciones moleculares entre aminoácidos específicos y la intervención de diversos cofactores. Además, su citoplasma contiene menos agua interna, ya que la empaquetan; tiene un alto grado de hidrofobicidad y cuentan en su cubierta celular con ácidos grasos más largos y saturados (Koga et al, 1993).

Al igual que otros procesos para la estabilización de lodos, la digestión anaerobia tiene ventajas y desventajas, entre las más comunes se encuentran las siguientes (Noyola 1998b):

Ventajas

- Reducción de la masa y el volumen del lodo mediante su conversión a metano dióxido de carbono y agua. Esta reducción se encuentra entre el 25 y 45 % de los sólidos totales.

- El biogás producido (metano y dióxido de carbono) es un gas combustible que convierte a la digestión anaerobia en un proceso productor neto de energía. Así esta energía se utiliza para mantener el digestor a 35 °C, además de que el exceso puede emplearse en producción de energía eléctrica para la planta de tratamiento de aguas. Mediante cogeneración, el biogás puede suministrar los requerimientos de calor del



digestor y hasta el 60 % de la energía eléctrica para los aeradores del sistema de lodos activados correspondientes.

- Una vez digeridos los lodos, por su estabilidad y características fisicoquímicas, pueden ser aprovechados como mejoradores de suelos en una gran variedad de situaciones.

Desventajas

- Costo de inversión inicial altos. Tanques cubiertos, intercambiadores de calor y dispositivos para el manejo seguro de biogás son componentes necesarios en una planta de digestión de lodos.
- Largos tiempos de retención hidráulica para mantener a las bacterias metanogénicas dentro del sistema, aunado a un menor factor de sobrediseño para aceptar sobrecargas orgánicas.
- Características inadecuadas del sobrenadante, por lo que tiene que retornarse al inicio de proceso del tratamiento del agua, lo cual implica una carga adicional al sistema. Sus principales contaminantes son materia orgánica soluble, nitrógeno amoniacal, sulfuros, además de ausencia de oxígeno disuelto.
- En el caso particular de México, muy poca, prácticamente nula experiencia en el diseño, construcción y operación de digestores anaerobios para lodos de purga.

De hecho, debido al énfasis en la recuperación y conservación de la energía así como en la búsqueda de lograr un uso benéfico de los lodos de purga, la digestión anaerobia se mantiene como el proceso predominante para la estabilización de lodos (Metcalf y Eddy, 1991).

1.3.2. MICROBIOLOGÍA Y BIOQUÍMICA

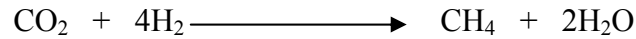
Durante la digestión anaerobia, la materia orgánica, en ausencia de oxígeno molecular, nitratos y sulfatos, es convertida a metano y dióxido de carbono por la combinación de la actividad de cinco diferentes grupos de microorganismos, tanto anaerobios estrictos como facultativos.

Las bacterias son incapaces de alimentarse de materia orgánica particulada, por lo que los biopolímeros (proteínas, carbohidratos y lípidos) son inicialmente hidrolizados por medio de enzimas extracelulares a compuestos más simples y asimilables por las bacterias, como son azúcares, aminoácidos y ácidos grasos. Posteriormente, los azúcares y aminoácidos sirven de sustrato a organismos fermentadores, mientras que los ácidos grasos superiores son asimilados por oxidadores anaerobios. Los productos de estas reacciones son acetato,

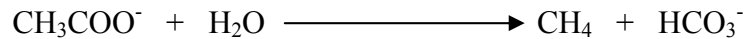


hidrógeno, biomasa y productos intermedios como el propionato y butirato. Estos últimos son degradados hasta acetato e hidrógeno por un grupo de bacterias llamadas OHPA (bacterias acetogénicas productoras obligadas de hidrógeno, por sus siglas en inglés), las cuales deben existir en relación sintrófica con las metanogénicas que utilizan hidrógeno. El acetato y el hidrógeno son finalmente los verdaderos sustratos de las bacterias metanogénicas, las cuales se dividen en dos grupos tróficos:

Bacterias metanogénicas hidrogenofilicas, que utilizan el hidrógeno producido por las OHPA para reducir CO_2 en CH_4 .

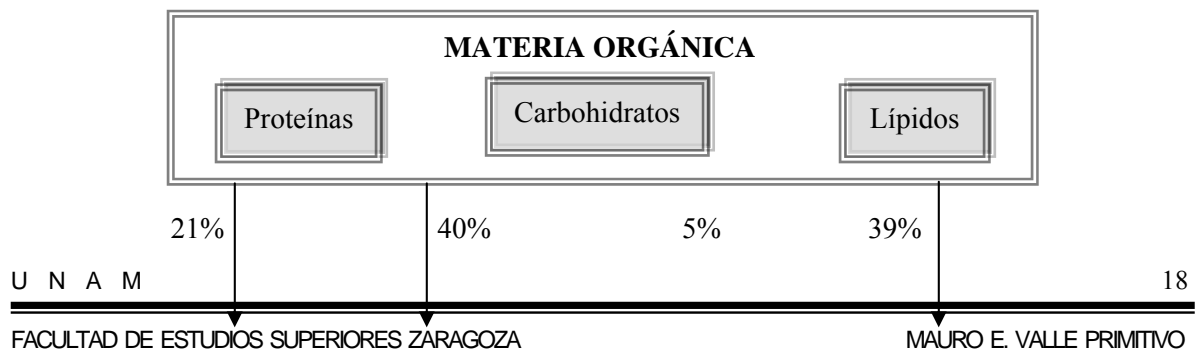


Bacterias metanogénicas acetoclásticas, que transforman el acetato en CH_4 . Esta transformación contribuye con el 70% de la producción total de metano en los digestores.



En resumen, se pueden identificar seis procesos de conversión en digestión anaerobia (figura 1.2).

- 1.- Hidrólisis de biopolímeros (proteínas, carbohidratos y lípidos)
- 2.- Fermentación de aminoácidos y lípidos
- 3.- Oxidación β -anaerobia de ácidos grasos de cadena larga y alcoholes
- 4.- Oxidación anaerobia de productos intermedios como ácidos volátiles (excepto acetato)
- 5.- Conversión de acetato a metano
- 6.- Conversión de hidrógeno a metano



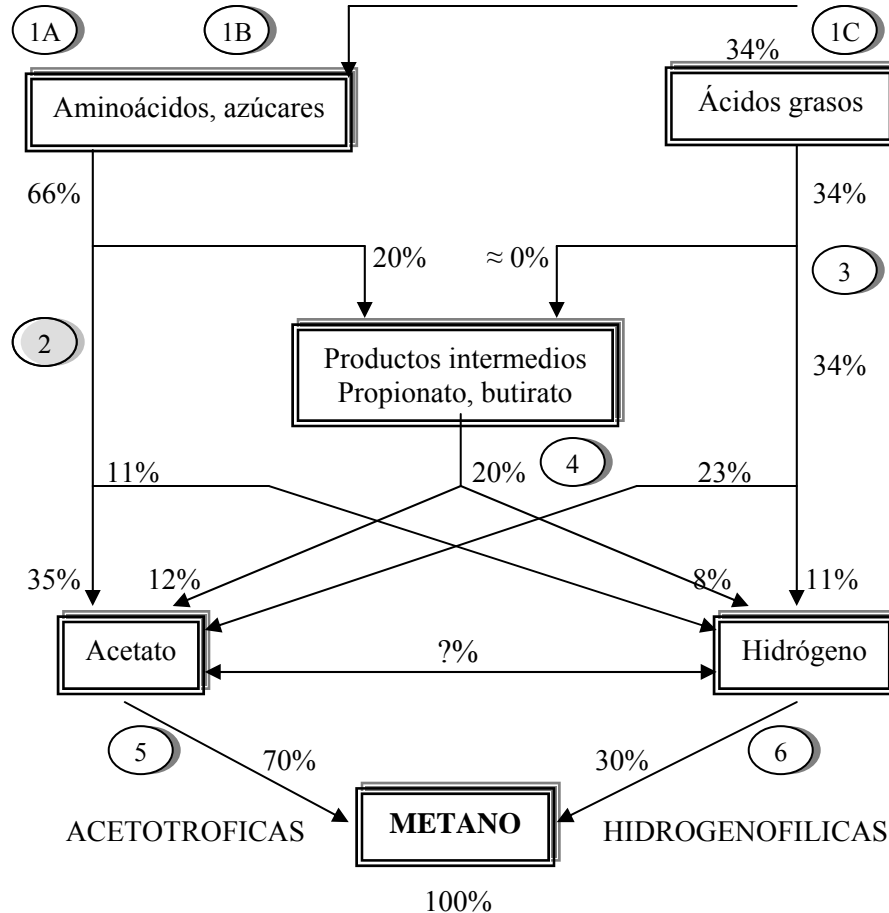


Figura 1.2 Diagrama de flujo en la digestión anaerobia de la materia orgánica particulada a metano (Gujer & Zehnder, 1983)

Un aspecto importante dentro del proceso, es que el desarrollo de las bacterias OHPA (bacterias acetogénicas productoras obligadas de hidrógeno) se puede inhibir por presiones elevadas de hidrógeno (producto de su metabolismo). Ante esta limitante, se desarrolla una relación sintrófica entre las bacterias OHPA con las bacterias metanogénicas hidrogenofílicas, las cuales se encargan de consumir el hidrógeno producido, manteniendo así la presión de dicho gas a niveles adecuados para que la conversión de los ácidos grasos volátiles en acetato e hidrógeno pueda ser consumada (Noyola, 1998b).

El equilibrio entre la fermentación del propionato y la oxidación del hidrógeno resultante es crucial para un proceso de digestión anaerobia estable. Las condiciones óptimas para esta reacción son muy estrictas y principalmente controladas por la concentración del hidrógeno libre. En un digestor estabilizado la concentración típica de hidrógeno se encuentra en 10^{-4} atm (Noyola, 1998b).

1.3.3. REQUERIMIENTOS FISICOQUÍMICOS



Los principales factores ambientales que inciden en el buen funcionamiento de un proceso anaerobio, están relacionados con aquellos parámetros cuyo control y conocimiento permitirá evitar cualquier falla de operación o tomar a tiempo las medidas correctivas necesarias, lo cual se verá reflejado en un buen crecimiento de la biomasa anaerobia y por consiguiente una mayor eficiencia en la remoción de la materia orgánica y en la producción de biogás.

Los factores ambientales más importantes para el funcionamiento de un proceso anaerobio son:

Temperatura:

La actividad de la biomasa microbiana es sensible a la temperatura del medio en que se desarrolla. Un aumento limitado de temperatura de corta duración hace que la actividad microbiana aumente; sin embargo, si esta temperatura se mantiene, la degradación del complejo enzimático celular y el aumento de la muerte microbiana reduce el número de microorganismos, pudiendo llegar a desaparecer especies microbianas completas. Además la temperatura afecta a las constantes de equilibrio químico, produciendo desplazamientos o redisoluciones de compuestos inorgánicos, cambios en la composición del gas por efecto de la diferente solubilidad, etc.

La temperatura define a las especies predominantes de organismos anaerobios, siendo éstas las termófilas (50-60°C), mesófilas (20-40°) y psicrófilas (6-20°C). La temperatura óptima de crecimiento para los microorganismos anaerobios en intervalo mesofílico es de 37°C (Noyola, 1998b) y en el termofílico es de 55°C (Malina & Pohland, 1992). En el intervalo termofílico se pueden distinguir diferentes tipos de bacterias: termotolerantes (que crecen entre 40 y 50°C, pero también a 35°C), las termofílicas estrictas (que no pueden crecer por debajo de 40°C), las moderadamente termofílicas que tienen su intervalo de crecimiento entre los 50 y los 65° y las extremadamente termofílicas que se desarrollan a temperaturas superiores a los 65°C (Hamer et al., 1985).

pH:

De forma similar a la temperatura, el pH en los reactores anaerobios, y en general en cualquier proceso biológico, ejerce una gran influencia sobre la actividad de los microorganismos. La digestión anaerobia puede llevarse a cabo dentro de un intervalo de pH comprendido entre 6.2 y 7.8, siendo el óptimo entre 7.0 y 7.2. Fuera de este rango señalado como óptimo, la digestión puede continuar aunque en forma ineficiente hasta un pH de 6.2, en donde las bacterias metanogénicas son afectadas severamente (Noyola, 1998b) y a niveles de pH alcalinos, se afecta principalmente a las bacterias metanogénicas



acetoclásticas (Malina y Pohland, 1992). Al igual que en el caso de la temperatura, modificaciones en el pH afectan de manera significativa a los microorganismos metanogénicos.

Alcalinidad:

Debido a que las bacterias acidogénicas poseen una mayor actividad que las bacterias metanogénicas, ante sobrecargas orgánicas son capaces de provocar la acidificación del reactor, lo que puede evitarse manteniendo en el digestor una suficiente capacidad amortiguadora (buffer) (Noyola, 1998b). Mientras la digestión anaerobia prosiga con normalidad, la alcalinidad oscilará entre 1000 y 5000 mg CaCO₃/L en digestores de lodos. La alcalinidad útil para fines de amortiguamiento de pH es la debida a los bicarbonatos, en tanto que la alcalinidad debida a los ácidos grasos volátiles (AGV) puede usarse para medir de forma indirecta su concentración, la cual se debe mantener en el nivel más bajo posible. Un criterio para verificar si la carga orgánica suministrada al digestor es adecuada para el proceso anaerobio, es la relación α , la cual se calcula al dividir la alcalinidad debida a los bicarbonatos entre la alcalinidad total. La primera se calcula mediante un procedimiento de titulación de una muestra de lodo, midiendo el consumo de ácido (H₂SO₄) de normalidad conocida (normalmente 0.1 N) hasta un pH de 5.75 y la segunda, midiendo el volumen total del mismo ácido hasta un pH de 4.3 (Jenkins et al., 1983), por lo que la relación α puede calcularse con la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{Alc(HCO_3^-)_{5.75}}{Alc(total)_{4.3}}$$

Donde:

$Alc(HCO_3^-)_{5.75}$ = Alcalinidad debida a los bicarbonatos, obtenida a partir de la titulación de la muestra con H₂SO₄ hasta un pH de 5.75. Se expresa en (mg CaCO₃/L).

$Alc(total)_{4.3}$ = Alcalinidad total, obtenida a partir de la titulación de la muestra con H₂SO₄ hasta un pH de 4.3. Se expresa en (mg CaCO₃/L).

El valor de α durante el arranque de un digestor de lodos deberá mantenerse arriba de 0.4; un valor superior a 0.5 muestra una operación estable, pudiéndose incrementar la carga del digestor (Noyola, 1994). La relación α con valores superiores a 0.5, indica que existe un equilibrio entre los bicarbonatos, producidos por la descarboxilación del acetato durante la producción de metano por las bacterias metanogénicas acetoclásticas, y de los ácidos grasos volátiles, producidos durante la etapa de acidogénesis del proceso de digestión anaerobia. Valores de α inferiores a 0.4 son debidos a la acumulación de AGV, lo que indica que el sistema tiene problemas para consumir la cantidad de sustrato que a el ingresa, debido a que



la velocidad de consumo de sustrato de las bacterias fermentativas es mayor que la de las bacterias metanogénicas, consumidoras de AGV.

El valor de α puede emplearse para indicar el ritmo de aumento de carga durante un arranque, así como una adecuada alarma si el reactor esta siendo sobrecargado (Noyola, 1994). Debe mencionarse que los valores recomendados de α son diferentes según se trate de un digestor de lodos o de un reactor anaerobio que trata aguas residuales, ya sea municipales o industriales. Los valores de α que pueden considerarse aceptables son menores en 0.2 unidades para el caso de los digestores de lodos.

La alcalinidad debida a los AGV se define mediante la siguiente expresión:

$$Alc(AGV) = Alc(total)_{4.3} - Alc(HCO_3^-)_{5.75}$$

Donde:

$Alc(AGV)$ = Alcalinidad debida a los AGV (mg $CaCO_3/L$).

Nutrientes

La digestión anaerobia como cualquier otro proceso biológico, necesita además de una fuente de carbono, nutrientes inorgánicos esenciales para el adecuado crecimiento de los microorganismos involucrados, así como para incrementar la actividad específica de utilización de sustrato. La ausencia o limitación de estos nutrientes es por lo tanto un factor limitante para el proceso. Montalvo y Guerrero (2003), consideran que los nutrientes (macronutrientes) más importantes en procesos anaerobios son el nitrógeno, el fósforo y el azufre. Para que un reactor opere de manera adecuada se debe cuidar que los nutrientes se encuentren en ciertas proporciones; comúnmente se ha recomendado para el proceso anaerobio una relación DQO:N:P:S de 400:5:1:0.2 (Noyola, 1998b).

Además de las necesidades de nitrógeno, fósforo y azufre, también se requiere la presencia de micronutrientes (Montalvo y Guerrero, 2003), elementos traza como hierro, níquel, cobalto y molibdeno (Tabla 1.4), los cuales son necesarios para el buen funcionamiento del consorcio microbiano, principalmente para la actividad de los metanógenos, y que en ciertas concentraciones aumentan la eficiencia del proceso. A diferencia de los macronutrientes, los nutrientes traza se requieren en cantidades muy pequeñas (partes por millón).



Tabla 1.4. Metales nutrientes requeridos por la biomasa anaerobia, en función de la concentración en DQO del agua (Noyola, 1998b).

Elemento	Concentración del metal mg/L	
	para 10 g DQO / L	para 50 g DQO / L
Fe	0.5-20	3-100
Ni	0.05-3	0.3-15
Co	0.05-2	0.3-10
Mo	0.01-0.05	0.005-0.2

1.4 ESTIMULACIÓN

Con el fin de optimizar la producción de biogás para la recuperación de energía, se ha estudiado el efecto de aplicar pretratamientos para modificar las características físicas y químicas de los lodos, esperando una mayor conversión de los compuestos orgánicos complejos, es decir, en la etapa hidrolítica de la digestión anaerobia. Para tal situación, se han empleado tanto el pretratamiento térmico como el alcalino y la combinación de ambos. Más recientemente, Barjenbruch y Kopplow (2003) realizaron un estudio basado en pretratamientos térmico, mecánico y enzimático. Sin embargo, la metanogénesis que es la última etapa del proceso de digestión anaerobia, se considera como limitante debido a la baja rapidez de producción de bacterias metanogénicas y a su sensibilidad a cambios bruscos en las condiciones prevalecientes de los digestores. Por esto, se busca favorecer el crecimiento de los microorganismos que se presentan en la etapa de la metanogénesis suministrándoles los nutrientes necesarios para su crecimiento; dichos nutrientes pueden encontrarse en el sustrato principal o bien pueden ser suministrados por adición externa (Montalvo y Guerrero 2003).

1.4.1. MICRONUTRIENTES (metales traza)

La metanogénesis, última etapa del proceso de digestión anaerobia, es considerada como limitante por la baja tasa de crecimiento de la flora metanogénica y por su sensibilidad a cambios bruscos en las condiciones prevalecientes en el digestor. El favorecer el crecimiento de los microorganismos que predominan en esta etapa es deseable por lo que deberán de suministrárseles todos los nutrientes, elementos traza y factores de crecimiento necesarios. Estudios realizados por varios investigadores (Zehender 1978; Daniela et al., 1986; Speece, 1983 y Sharma y Singh, 2001), han demostrado que ciertos elementos, entre



ellos hierro, níquel y cobalto son necesarios para todos los microorganismos metanogénicos estudiados; metales como molibdeno, selenio, magnesio y otros, se requieren para algunos metanogénicos en específico. Montalvo y Guerrero (2003) y White y Stuckey (2000), consideran que el hierro, cobalto, níquel y molibdeno son micronutrientes obligatorios para las bacterias metanogénicas; Kida et al., (2001), concluyeron que estos metales presentan un efecto de estimulación en la metanogénesis de las bacterias acetoclásticas e hidrogenofílicas, con lo cual se puede incrementar la carga volumétrica de carbón orgánico total. Llangovan y Noyola (1993) mencionan que la adición de nutrientes es un factor importante para obtener buenas eficiencias en la degradación anaerobia de residuos sólidos. En un estudio sobre degradación anaerobia de vinazas, Espinosa et al. (1995) encontró que al adicionar hierro, cobalto, níquel y molibdeno, se incrementó la producción de metano y se redujo la concentración de AGV's.

El níquel es esencial para los metanógenos ya que es constituyente del citocromo de la coenzima F_{430} (el número se debe a los nanómetros a los que tiene su máxima absorción) (Speece et al., 1983). La coenzima F_{430} es un tetrapirrol que como se dijo contiene níquel, siendo el único con esta característica encontrado hasta ahora en la naturaleza, por lo que se considera exclusivo de los metanogénicos. La importancia de la F_{430} es que es el grupo prostético (fracción de una enzima que no está constituida por aminoácidos) del sistema enzimático reductor de la $CH_3 - S CoM$, es decir, es requerida para el paso final de la formación de metano tanto a partir de acetato como a partir de la reducción del CO_2 (Jones et al, 1987). Jarrell y Denny (1982), determinaron en un estudio, que la población metanogénica que se encarga de transformar acetato a metano y CO_2 tuvo que ser estimulada por la adición de níquel.

El cobalto es necesario para la biosíntesis de corrinoides; además, es el ion central en derivados de la vitamina B12, la cual se encuentra envuelta en la transferencia de grupos metilo en la metanogénesis; también se encuentra presente en bacterias metanotróficas y acetotróficas (Jetten et al., 1992). Por otra parte, Bhattacharya (et al., 1995), mencionan que el cobalto es esencial en la transformación de la metilcobalamina, la cual es una enzima que participa en la formación de metano.

El hierro es importante para la conversión de ácido acético a metano, ya que tiene un efecto estimulador sobre las bacterias metanogénicas.

Por otro lado, estudios realizados por Millán et al. (2001 y 2003), mostraron que la introducción de zeolitas naturales y modificadas con metales (Ni, Co y Mg), en reactores anaerobios, tuvo un efecto positivo en la actividad metanogénica específica de dichos reactores. Además, determinaron que los microorganismos, durante el metabolismo, fueron capaces de capturar los metales inmovilizados en las zeolitas de acuerdo a sus requerimientos.

1.4.2. APLICACIÓN DE ADITIVOS



Las enzimas son sustancias orgánicas especializadas compuestas por polímeros de aminoácidos, que actúan como catalizadores biológicos en el metabolismo de los seres vivos. Con su acción, determinan la selectividad de los reactivos y regulan la velocidad de muchas reacciones químicas implicadas en este proceso, como es el caso de la generación de metano a partir del CO_2 .

Las enzimas se clasifican en varias categorías: hidrolíticas, oxidantes y reductoras, dependiendo del tipo de reacción que controlen. Las enzimas hidrolíticas aceleran las reacciones en las que una sustancia se rompe en componentes más simples por reacción con moléculas de agua. Las enzimas oxidativas, conocidas como oxidasas, aceleran la reacción de oxidación, y las reductoras las reacciones de reducción en las que se libera oxígeno. Otras enzimas catalizan otros tipos de reacciones.

En la digestión, las enzimas que rompen los hidratos de carbono no tienen efecto sobre las grasas y las proteínas. Recíprocamente, tampoco las enzimas que hidrolizan las grasas o las proteínas tienen efecto sobre la hidrólisis de los hidratos de carbono. Para catalizar las múltiples reacciones químicas que se producen en las células hacen falta una gran variedad de enzimas, siendo cada una altamente específica en su acción. Este carácter específico se lo da la forma plegada de cadena de la proteína que constituye la gran molécula de la enzima, así como la sustitución de sus sitios activos (lugar donde se realiza la reacción) en la superficie de la enzima, en lo que han de encajar determinadas partes de las moléculas de los sustratos.



2. JUSTIFICACIÓN

En México, de los más de 205 m³/s de agua residual municipal que se generan, solo se trata cerca del 35%. Se espera que este porcentaje se incremente debido al cumplimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SERMARNAT-1996. Esto ocasionará que se generen cerca de 700,000 toneladas anuales de lodo (base seca) de acuerdo con la CNA. En cuanto al tipo de lodo que será generado, se espera que una parte sea de origen fisicoquímico, ya que de 1666 plantas que existen actualmente, 17 emplean este tipo de proceso, algunas de ellas con caudales mayores al metro cúbico por segundo (CNA, 2006). Hoy en día, el Tratamiento Primario Avanzado (TPA) ha adquirido fuerza como una opción para el tratamiento del agua residual municipal con fines de reutilizarse en riego agrícola. Una de las desventajas de aplicar el TPA como proceso para tratar las aguas residuales es la producción de lodos, los cuales llevan consigo todos los contaminantes que fueron separados del agua. Para regular esta problemática, se cuenta con la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, en la cual se establecen los límites de contaminantes en los lodos estabilizados (biosólidos), con la finalidad de reutilizarlos o disponerlos de manera segura.

Como una consecuencia de la falta de una normatividad que regulara las descargas y manejo de los lodos de desecho en las plantas de tratamiento de aguas residuales, en el país se cuenta con poca experiencia en el tratamiento de estos residuos. Debido a ésto, en la mayoría de las plantas de tratamiento, a excepción de las construidas en los últimos años, los lodos de desecho se descargan a los sistemas de alcantarillado municipales, en suelos y otros cuerpos receptores, sin un tratamiento previo.

Por consecuencia, surge la necesidad de buscar nuevas tecnologías de tratamiento que ofrezcan resultados aceptables y que sean competitivas desde el punto de vista económico, sin poner en riesgo al medio ambiente y principalmente la salud de la población. Actualmente, la búsqueda y aplicación de estas nuevas tecnologías son fortalecidas por la norma NOM-004-SEMARNAT-2002.

Los procesos biológicos, particularmente la digestión anaerobia de lodos de desecho, a pesar de requerir una alta inversión inicial, ofrecen ventajas importantes para considerarla como una tecnología perdurable, al lograr la conversión y reducción de la materia orgánica sin necesidad de agregar insumos, con costos de operación y mantenimiento relativamente bajos (Noyola, 1998 b). Otra ventaja que presenta este tipo de proceso es la recuperación de energía en forma de gas metano, subproducto que al ser aprovechado como combustible puede satisfacer los requerimientos para la calefacción de los digestores, además de cubrir parcialmente otras necesidades energéticas en la planta de tratamiento. Por otro lado, la generación de biosólidos con características adecuadas para su reutilización como mejoradores de suelos facilita y abarata en gran medida su disposición final.



Como una opción para la eliminación de organismos patógenos y parásitos, los cuales causan problemas de salud en la población, se ha considerado la digestión anaerobia en fase termofílica (Temperatura de 55 °C), ya que en estudios anteriores por el grupo de investigación del Instituto de Ingeniería de la UNAM y otros grupos de investigación se han reportado adecuados porcentajes de remoción e inclusive la eliminación total de dichos organismos.

Sin embargo, en estudios anteriores por el antes mencionado grupo de investigación, se determinó que la digestión anaerobia de los lodos de desecho provenientes de una planta de tratamiento de tipo fisicoquímico, no alcanzó un funcionamiento adecuado y estable, pues los parámetros de operación presentaron variaciones considerables y la carga orgánica aplicada fue muy limitada (Orozco,2002 y Cabirol et al., 2003).

Por otro lado, con el fin de optimizar la producción de biogás para recuperación de energía, se ha estudiado el efecto de aplicar pretratamientos o aditivos para mejorar las características de los lodos con el fin de favorecer el crecimiento de los microorganismos en la etapa metanogénica, suministrándoles los nutrientes necesarios para su crecimiento o para mejorar la digestibilidad del lodo (Zehnder 1978; Speece 1983; Stuckey *et al.*, 1984; Daniels *et al.*, 1986).

La metanogénesis que es la última etapa del proceso de digestión anaerobia, se considera como limitante debido a la baja rapidez de producción de bacterias metanogénicas y a su sensibilidad a cambios bruscos en las condiciones prevalecientes de los digestores. Por ésto, se busca favorecer el crecimiento de los microorganismos que se presentan en la etapa de la metanogénesis suministrándoles los nutrientes necesarios para su crecimiento; dichos nutrientes pueden encontrarse en el sustrato principal o bien pueden ser suministrados por adición externa (Montalvo y Guerrero 2003).



3. OBJETIVO

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la aplicación de aditivos nutrientes en la estabilización anaerobia termofílica de dos tipos de lodos de desecho, uno proveniente de una planta de tratamiento fisicoquímico (tratamiento primario avanzado) y otro proveniente de una planta de tratamiento por lodos activados (tratamiento convencional).

3.2 HIPÓTESIS

La digestión anaerobia termofílica de lodos procedentes del tratamiento fisicoquímico y biológico de aguas residuales puede mejorar su desempeño mediante la adición de metales micronutrientes. Así mismo, que el empleo de un aditivo comercial, puede contribuir a lograr mayores cargas orgánicas en los digestores alimentados con el lodo fisicoquímico y biológico.



3. OBJETIVO

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la aplicación de aditivos nutrientes en la estabilización anaerobia termofílica de dos tipos de lodos de desecho, uno proveniente de una planta de tratamiento fisicoquímico (tratamiento primario avanzado) y otro proveniente de una planta de tratamiento por lodos activados (tratamiento convencional).

3.2 HIPÓTESIS

La digestión anaerobia termofílica de lodos procedentes del tratamiento fisicoquímico y biológico de aguas residuales puede mejorar su desempeño mediante la adición de metales micronutrientes. Así mismo, que el empleo de un aditivo comercial, puede contribuir a lograr mayores cargas orgánicas en los digestores alimentados con el lodo fisicoquímico y biológico.

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para el desarrollo experimental de esta investigación se operaron dos digestores en régimen semicontinuo y mezcla completa, ambos en forma de huevo (debido a que dicha geometría presenta ventajas importantes en cuanto operación y mantenimiento), con volumen total de 8 L y volumen efectivo de tratamiento de 5 L .

4.1 MUESTREO DE LOS LODOS

Los digestores se alimentaron con lodo biológico proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales “Cerro de La Estrella” ubicada en la delegación Iztapalapa y lodo fisicoquímico proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales “San Andrés Mixquic” ubicada en le delegación Milpa Alta, en México, D.F., ambas operadas por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México del Gobierno del Distrito Federal.

En la planta “Cerro de La Estrella” (figura 4.1) el tratamiento del agua se realiza por medio de un proceso biológico, denominado lodos activados. La planta cuenta con una capacidad de 2 m³/s. Actualmente, opera al 92% de su capacidad. Por otra parte, en la planta “San Andrés Mixquic” el tratamiento del agua se realiza por medio de un proceso fisicoquímico, denominado tratamiento primario avanzado (TPA). La planta cuenta con una capacidad de 0.03 m³/s (30 L/s). Actualmente, opera al 80% de su capacidad (2074 m³/d).



Figura 4.1 Planta de tratamiento de aguas residuales “Cerro de la Estrella”

Una vez muestreados los lodos, estos fueron tamizados en mallas número 4 y 10 (aberturas 4.76 y 2 mm), para retirar las partículas gruesas que pudieran bloquear las conducciones de los digestores, tales como mangueras y piezas de cobre. Posteriormente, las muestras de lodo se almacenaron en un cuarto frío (4 a 6°C), las muestras se preservaron en bidones para que el lodo se sedimentara y ya sedimentado se retiraba la mayor cantidad de agua posible. Para la alimentación se tomó diariamente el volumen necesario y se dejó alcanzar la temperatura ambiente antes de ser ingresado a los digestores con el objeto de evitar un choque térmico de la biomasa.

4.2 DIGESTORES A ESCALA LABORATORIO

El estudio se realizó con dos digestores anaerobios de lodos operados en forma independiente (figura 4.2); dichos digestores fueron de geometría oval (Egg-Shaped-Digesters), debido a que este tipo de geometría presenta condiciones óptimas para la recirculación de lodos, con lo cual se mejora el mezclado, se evitan las zonas muertas y la acumulación de sólidos. Los digestores denominados T1 y T2 se operaron en régimen semicontinuo con un mezclado completo y en condiciones de termofilia (55°C). Dichos digestores tuvieron un volumen total de 8 L, siendo 5 L el volumen útil o efectivo para el tratamiento del lodo. La diferencia que hubo entre los digestores T1 y T2 fue que T1 era alimentado con lodo biológico y T2 con lodo fisicoquímico.



Figura 4.2 Al centro, uno de los dos digestores termofílicos utilizados en este trabajo



Los digestores fueron contruidos de fibra de vidrio. En la parte superior del digestor se localiza una cubierta de Nylamid. Entre la unión de la cubierta y el digestor se colocó un empaque para sellar y evitar las fugas de biogás. La cubierta presentaba tres perforaciones, dos de estas $\text{Ø } 2/3''$, contaban con arreglos de piezas de cobre; una de estas perforaciones era para recircular el lodo por un tubo de $\text{Ø } 3/8''$, la otra era para la evacuación del biogás hacia su medición. En la perforación central se colocó un tubo de $\text{Ø } 1/2''$ de polipropileno, el cual se introdujo dentro del digestor de forma de servir tanto como protección y alineación para la flecha del agitador mecánico, como al mismo tiempo para proporcionar un sello hidráulico, evitando fugas de biogás.

La medición del biogás se realizó con una probeta invertida de 2000 ml de volumen; en el caso de T1, la probeta llegó a ser de 4000 ml. Ambas probetas estaban sumergidas en un recipiente con agua con lo que era posible cuantificar el volumen de biogás producido diariamente. El sistema estuvo precedido de una trampa de humedad y por un septo de hule para tomar la muestra de biogás, con la finalidad de determinar la composición de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) mediante cromatografía de gases. En la parte inferior de los digestores se tenía un arreglo de piezas de cobre conectado a una manguera tramada de plástico de $\text{Ø } 2/3''$ para la recirculación del lodo (figura 4.3), por medio de una bomba peristáltica de la marca Masterflex. Las líneas de recirculación eran también utilizadas para transferir calor y controlar la temperatura dentro de los digestores a $55\text{ }^\circ\text{C}$.

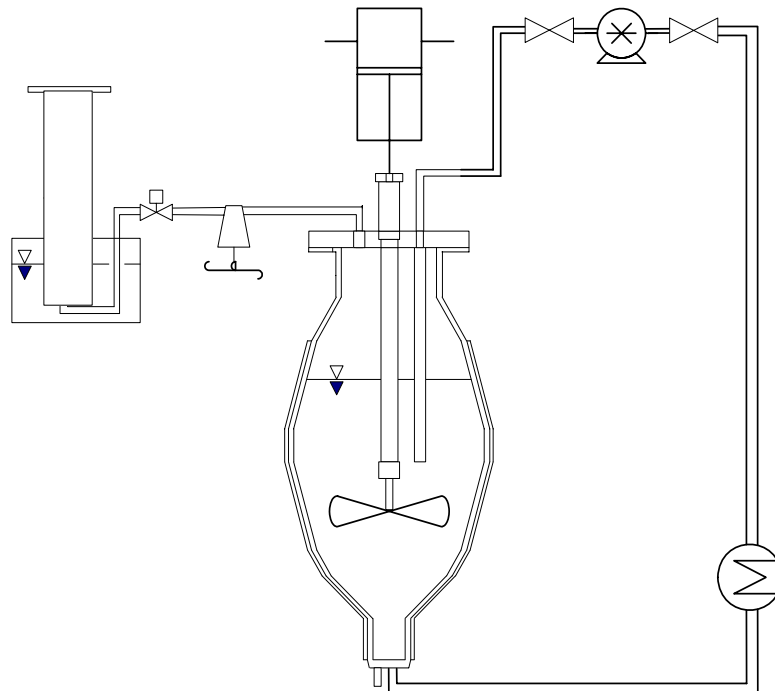


Figura 4.3 Arreglo de los digestores termofílicos T1 y T2



Todo el dispositivo se encontraba en un cuarto caliente con una temperatura controlada ($35^{\circ}\text{C}\pm$). Para mantener la temperatura de 55°C en los digestores, se contaba adicionalmente con un sistema de calefacción en seco sobre la línea de recirculación, con base en un intercambiador de calor eléctrico, para alcanzar la temperatura de 55°C ($\pm 1^{\circ}\text{C}$); el sistema era autoajustable y estaba equipado con alarmas para indicar variaciones de temperatura. A este sistema se sumó un sensor de temperatura (termopar), el cual tenía como función monitorear permanentemente la temperatura en el interior del digestor para evitar posibles variaciones.

Para evitar pérdidas de calor, los digestores termofílicos fueron aislados térmicamente con un chaleco de poliestireno de alta densidad al igual que las mangueras de las líneas de recirculación.

El mezclado mecánico se realizaba mediante una flecha de agitación con propelas, de $\varnothing 5/16''$, la cual trabajaba mediante un motor eléctrico ubicado en la parte superior del digestor.

Operación

Antes de comenzar la fase experimental los digestores solo se mantenían con recirculación y eran alimentados y purgados periódicamente con el fin de mantener la biomasa activa.

El digestor denominado T1, se mantuvo operando a TRH de 13 días, es decir, se alimentaba diariamente con 385 ml de lodo biológico. En el día 57 se comenzó a agregar 0.34 ml de una dosis de micronutrientes (metales traza) con concentraciones indicadas más adelante.

Al día 245 se comenzó la adición de un aditivo (características indicadas mas adelante), sin dejar de suministrar la dosis de metales, se continuó la adición de ambos y las condiciones de operación de TRH y temperatura antes mencionadas hasta el final de este desarrollo experimental.

Con lo que respecta a T2, se comenzó operando con un TRH de 20 días, es decir se alimentaba diariamente con 250 ml de lodo fisicoquímico y 0.34 ml de la dosis de micronutrientes (metales traza).

Al día 112 se cambió el tiempo de residencia a 25 días, es decir se alimentaban 200 ml de lodo. En el día 223 se comenzó la adición del mismo aditivo, sin dejar de suministrar la dosis de metales, hasta el final de este desarrollo experimental.

La adición de metales traza en ambos digestores se hizo con base en Espinosa et al. (1995), es decir, se aforó en 1L: Fe 150 mg , Ni 22.5 mg , Co 15 mg , Mo 0.3 mg (Tabla 4.1); de esta solución se tomaban 0.34 ml para la alimentación diaria .

Tabla 4.1 Metales traza adicionados a los digestores T1 y T2



Elemento	Concentración del metal mg/L	Compuesto adicionado
Fe	150	FeSO ₄ ·7H ₂ O
Ni	22.5	NiCl ₂ ·6H ₂ O
Co	15	CoCl ₂ ·6H ₂ O
Mo	0.3	MoO ₃

Por otra parte, la dosis del aditivo con nombre comercial NRP-10 el cual es un estimulante metabólico natural libre de microorganismos (que proporciona micro-nutrientes y enzimas intra-celulares para incrementar el ritmo metabólico) se hizo con una dilución de 1-10 del concentrado de éste; de esta dilución se añadían 2 ml a la alimentación diaria a partir de las fechas ya señaladas.

En la tabla 4.2 se muestran las condiciones de operación de los digestores para cada una de las tres etapas del desarrollo experimental. Para T1: sin metales (etapa 1), con metales (etapa 2), metales con aditivo (etapa 3). Para T2: TRH de 20 días (etapa 1), TRH de 25 días (etapa 2), con aditivo (etapa 3): todas las etapas de T2 contenían dosis de metales.

Tabla 4.2 Condiciones de operación en las tres etapas de los digestores T1 y T2

REACTOR	<i>Digestor T1</i>			<i>Digestor T2</i>		
	<i>Etapa 1</i>	<i>Etapa 2</i>	<i>Etapa 3</i>	<i>Etapa 1</i>	<i>Etapa 2</i>	<i>Etapa 3</i>
Temperatura (°C)	55	55	55	55	55	55
TRH (días)	13	13	13	20	25	25
Metales (ml)	0	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
Aditivo (ml)	0	0	3	0	0	3

4.3 TÉCNICAS ANALÍTICAS



En la evaluación del funcionamiento de los digestores durante el periodo de operación se emplearon métodos estandarizados (APHA, AWWA, WPCF, 1989). Los parámetros analizados, la técnica empleada y su frecuencia de medición para ambos digestores son indicados en la Tabla 4.3

Tabla 4.3 Parámetros analizados durante el monitoreo del funcionamiento de los digestores anaerobios termofílicos T1 y T2.

Parámetro	Técnica	Frecuencia de Medición
Sólidos suspendidos totales (SST; mg/L) Sólidos suspendidos volátiles (SSV; mg/L) Sólidos suspendidos fijos (SSF; mg/L)	SM	Tres veces por semana
pH (unidades de pH)	Potenciómetro	Diaria
Temperatura (T; °C)	Termómetro	Diaria
Alcalinidad (Alc; mg CaCO ₃ /L)	SM	Diaria
Relación de alcalinidades (α ; adim.)	CBPA-II	Diaria
Ácidos grasos volátiles (AGV; mg/L)	Cromatografía de gases	Tres veces por semana
Producción de biogás	Medidor de gas húmedo	Diaria
Composición de biogás	Cromatografía de gases	Tres veces por semana

CBPA-II: Manual de técnicas de laboratorio de la Coordinación de Bioprocesos Ambientales del Instituto de Ingeniería de la UNAM

Técnicas analíticas no normalizadas

La relación de alcalinidades se calculó de acuerdo con Jenkins, et al. (1983), como el cociente de la alcalinidad debida a los bicarbonatos entre la alcalinidad total, mediante la siguiente expresión:



$$\alpha = \frac{Alc(HCO_3^-)_{5.75}}{Alc(total)_{4.3}}$$

El porcentaje de remoción de sólidos volátiles (%RSV) se calculó de acuerdo a WEF, mediante la siguiente expresión:

$$\%RSV = (a-b)/(a-a*b)$$

donde:

a= fracción decimal de sv/st entrada

b=fracción decimal de sv/st salida



5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las gráficas y tablas de resultados, muestran la variación del funcionamiento de los digestores termofílicos T1 y T2, durante todo su periodo de operación, a través del análisis de diversos parámetros en los influentes y efluentes. En ellas se indican los momentos claves en la operación, como el inicio de la adición de los metales y el aditivo.

5.1 REACTOR T1 (lodo biológico)

En la tabla 5.1 se pueden ver las características del lodo que se alimentaba al digestor T1, es decir, lodo biológico. Cabe recordar que el digestor se comenzó a operar con un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 13 días y una carga orgánica promedio de 1.37 kg STV/m³*d.

Tabla 5.1 Características del lodo de alimentación al digestor T1 (lodo biológico).

Parámetro	Lodo biológico
pH	6.79
Alfa	0.33
Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /L)	1140
S.T.T. (g/l)	24.58
S.T.V. (g/l)	16.05
S.T.F. (g/l)	8.53
% S.T.V./S.T.T.	0.64



Se comenzó la operación del digestor T1 con un pH que oscilaba entre 7.4 y 7.9 (durante la primera etapa) hasta la adición de metales. Como muestra la figura 5.1.1, a partir del día 57, cuando inició la adición de metales, el pH comenzó a incrementarse lo que indicó que el sistema respondió ante el coctel de metales, para después de alrededor de 100 días, volver a los valores obtenidos antes de la incorporación de los metales al sistema. El sistema se estabilizó hasta el día 77 manteniendo una continuidad hasta el día 122, ya que a partir de este día se presentaron fluctuaciones de pH entre 7.3 y 8.3, rebasando el intervalo en el cual el proceso puede continuar aunque con menores eficiencias comprendido entre 6.2 y 7.8 (Noyola, 1998b).

Sin embargo, se siguió operando normalmente sin realizar cambios al sistema, ya que la producción de biogás se mantenía constante y la composición de CH₄ era adecuada. Al final de este periodo el pH estuvo por debajo de 8 entrando en valores cercanos a los óptimos, lo cual indica que el sistema se adaptó a la adición de metales.

Una vez pasado esto, se agregó el aditivo, en el día 245. Nuevamente el pH comienza a aumentar y sufrir fluctuaciones pequeñas hasta el final de la experimentación donde alcanzó valores de 8.4, mayores que cuando solo se agregaba metales y ya claramente por arriba del intervalo de pH adecuado para la digestión anaerobia.

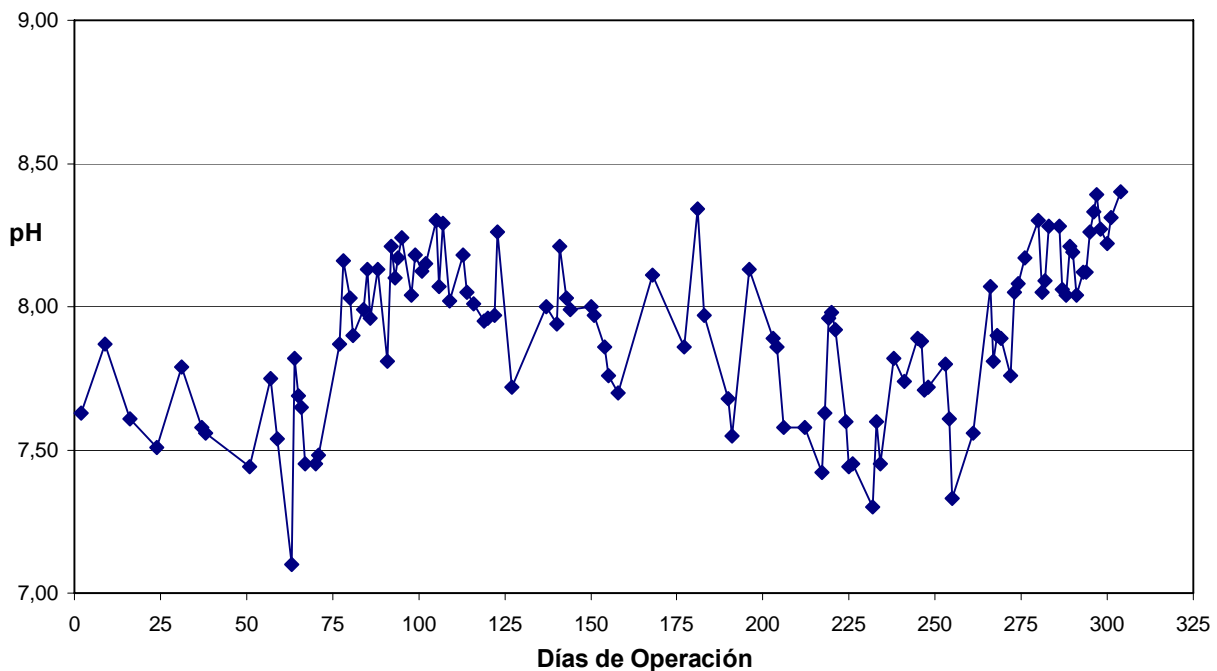


Figura 5.1.1 Variación del pH en T1



El parámetro alfa (relación de alcalinidades), considerado como una referencia para saber si el reactor está siendo sobrecargado (Noyola 1994), se mantuvo durante los primeros días de operación con valores de 0.67 a 0.74 (figura 5.1.2), valores muy adecuados para la digestión anaerobia. Una vez que se incorporaron los metales, se vio una disminución de α durante aproximadamente 25 días, lo que indicó que el digestor resintió este cambio acidificándose en cierto grado, hasta valores de 0.54 en α . Sin embargo, estos valores se encuentran dentro del intervalo óptimo, ya que valores superiores a 0.4 son adecuados en digestores anaerobios de lodos.

Pasados los primeros 25 días a partir del cambio, el sistema volvió a estabilizarse y se mantuvo con un α promedio de 0.71 durante 156 días, lapso en que se vieron variaciones de 0.62 a 0.79. A partir del día 245, cuando se añadió el aditivo, el valor bajó hasta llegar a 0.5 lo que coincide con un aumento en la concentración de los AGV's. Posteriormente se registraron valores de 0.74 a 0.83 para terminar con un α de 0.79 al final de la fase experimental.

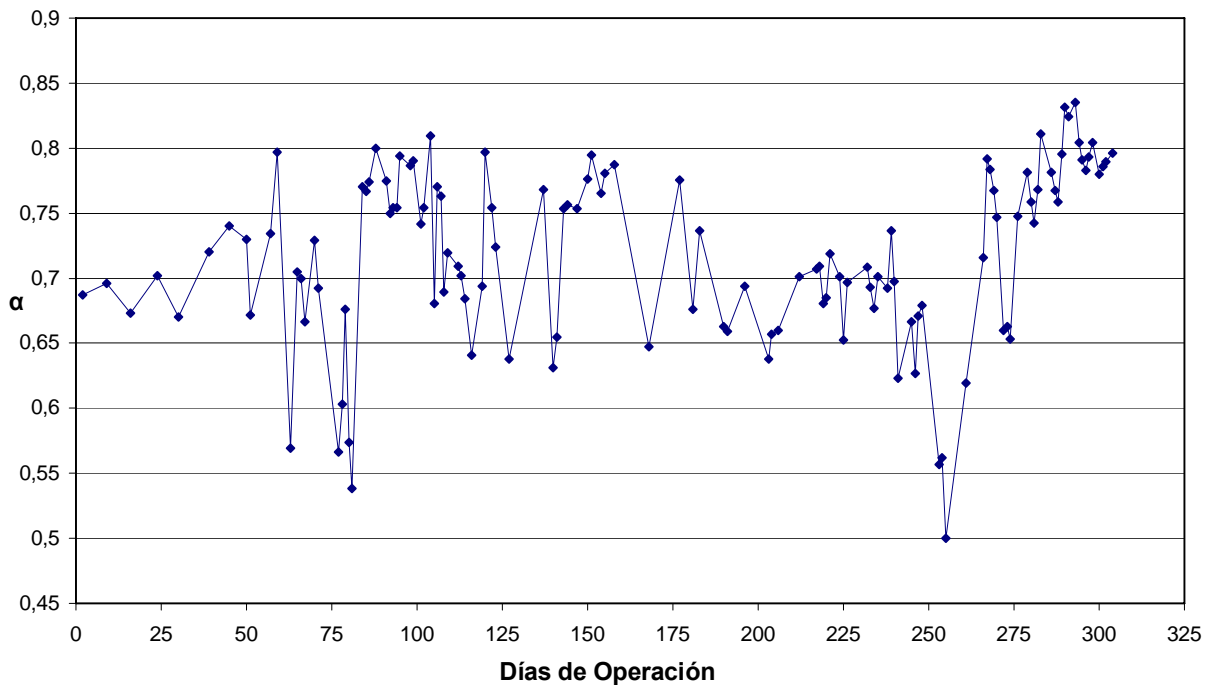


Figura 5.1.2 Relación de Alcalinidades (α) en T1



Los valores de alcalinidad (figura 5.1.3) que se tenían en el comienzo de la operación variaron de 1320 a 1480 mg CaCO₃/L. Una vez que se adicionaron los metales hubo también una ligera caída de estos valores recuperándose satisfactoriamente, comenzándose a incrementar cerca del día 127, con una pequeña caída al final de este periodo, es decir poco antes de la incorporación del aditivo. Si bien la alcalinidad había tenido una tendencia independiente a la del pH, una vez incorporado el aditivo en el sistema, el comportamiento fue más parecido entre estos dos parámetros, es decir la alcalinidad mostró sus valores más altos en este periodo al igual que el pH. Al final del experimento, la alcalinidad parece estabilizarse sobre 3000 mgCaCO₃/L, valor muy adecuado para un digestor de lodos, normalmente en el intervalo de 1000 a 5000 mg CaCO₃/L en que Malina y Pohland (1992), consideran que la digestión anaerobia se puede realizar de manera adecuada.

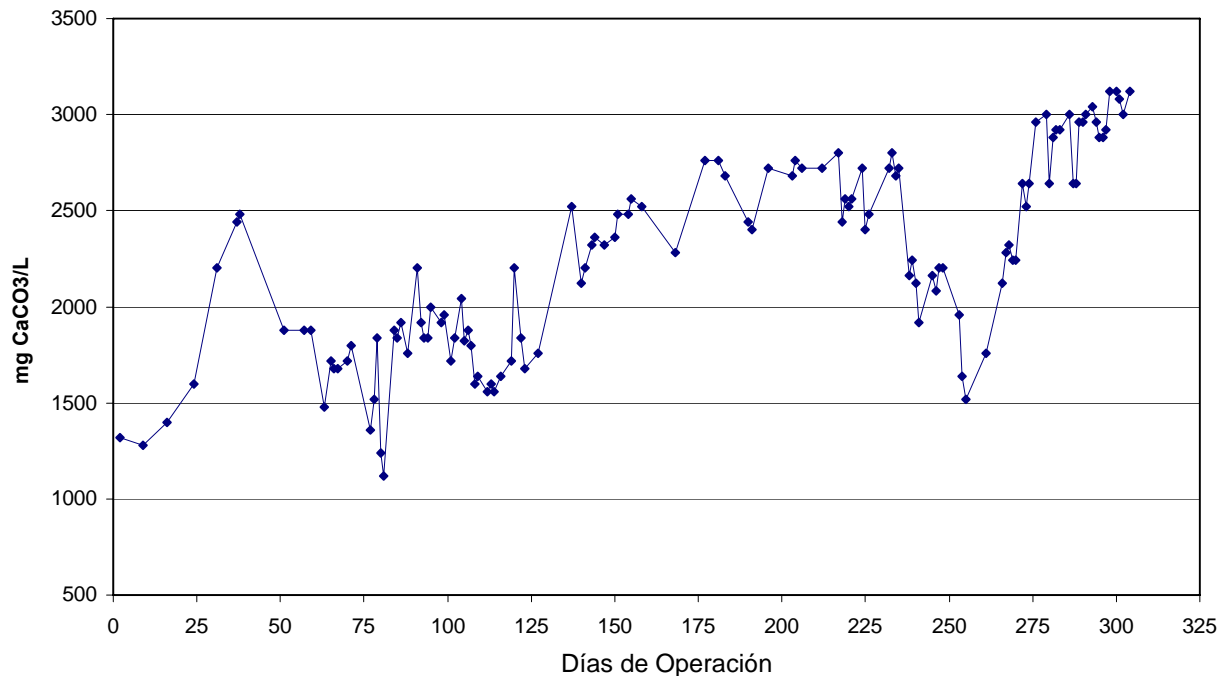


Figura 5.1.3 Variación de la Alcalinidad en T1



Al comenzar a operar el reactor se tenía una producción de biogás de entre 2400 y 3000 mL/d (figura 5.1.4) y a partir del día 50 comenzó a incrementarse la producción hasta llegar a 3300 mL. este incremento coincide con el inicio del periodo en que se agregaron los metales. A pesar que en la parte final de este periodo se presentaron dos valores del orden de los 2500 mL/d, en la mayor parte de este periodo hubo una producción entre 3000 a 3800 mL/d. Al igual que los parámetros α y pH, la producción de biogás comienza a decrecer alrededor del día 190, alcanzando un valor mínimo de 2350 mL/d, lo que hace suponer que se debió a una ligera sobrecarga en el digestor, relacionado seguramente a una baja en la temperatura, ya que por esos días se registró un incidente en la operación, descomponiéndose la resistencia con la que se mantenía la temperatura del lodo.

Cuando se incorporó el aditivo, la producción tuvo los altibajos normales, aunque sistemáticamente se mantuvo arriba de 3000 mL/d, alcanzando los valores mas altos a lo largo de la experimentación, se registraron valores de 3900 mL siendo el mas bajo de 3050 mL y teniendo una tendencia a la alza al final de este último periodo en el que se suministraban metales y aditivo.

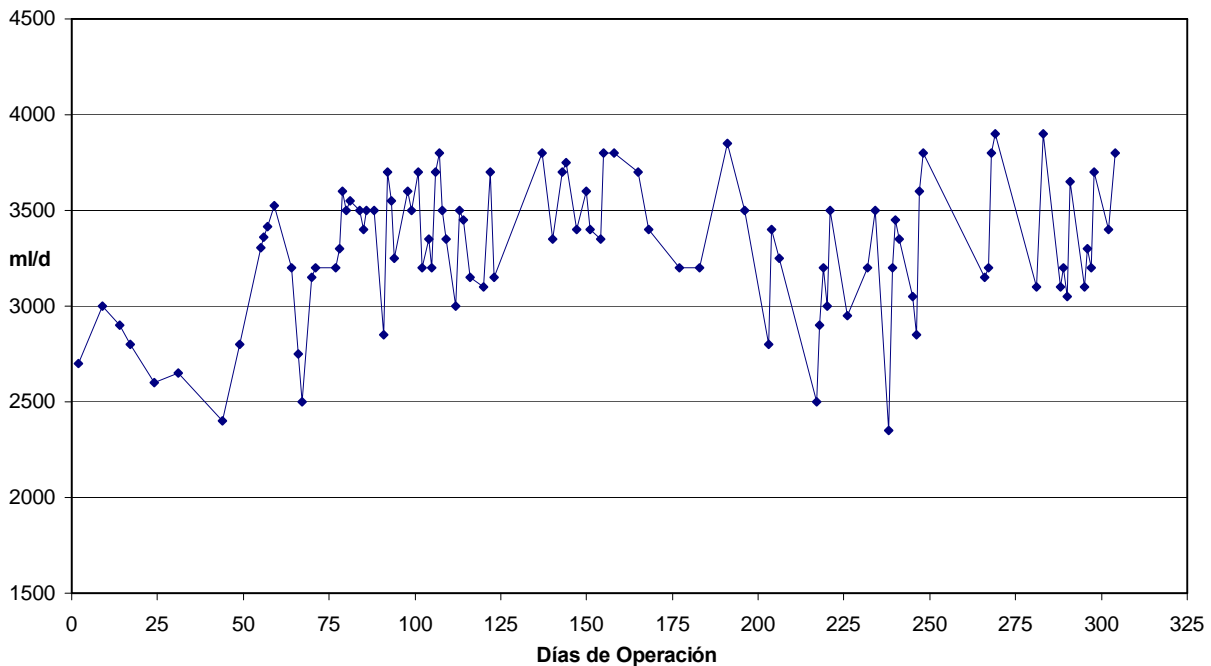


Figura 5.1.4 Producción diaria de Biogás en T1



El porcentaje de metano tiene un comportamiento un tanto similar a la producción de biogás. Como se puede ver en la figura 5.1.5 en el inicio de la parte experimental se presentaron ligeros cambios en la composición del mismo, de 54 a 62 % de metano. En la segunda etapa, cuando se agregó el coctel de metales, después de pocos días hubo una disminución en el porcentaje de metano, que corresponde con el descenso en la producción de biogás, en el pH y en el alfa registrados en esos mismos días. Lo anterior indicaría un cierto efecto de choque sobre las bacterias metanogénicas. Sin embargo, éstas logran adaptarse al cambio y comienza a aumentar el porcentaje llegando a valores de hasta 76 % de metano. Al final de este periodo se presentan altibajos muy similares a los de la producción de biogás y en los mismos días.

Una vez que se adicionó el aditivo, las bacterias volvieron a resentir el cambio inhibiéndose durante varios días, con los valores más bajos a lo largo de la experimentación, hasta 46 % de metano. Una vez estabilizado el sistema, se presentaron los valores más altos, hasta un 80 % de metano. En la mayor parte de la fase experimental los valores estuvieron dentro del intervalo esperado, es decir 60 a 75 % de metano (Malina & Polhand, 1992).

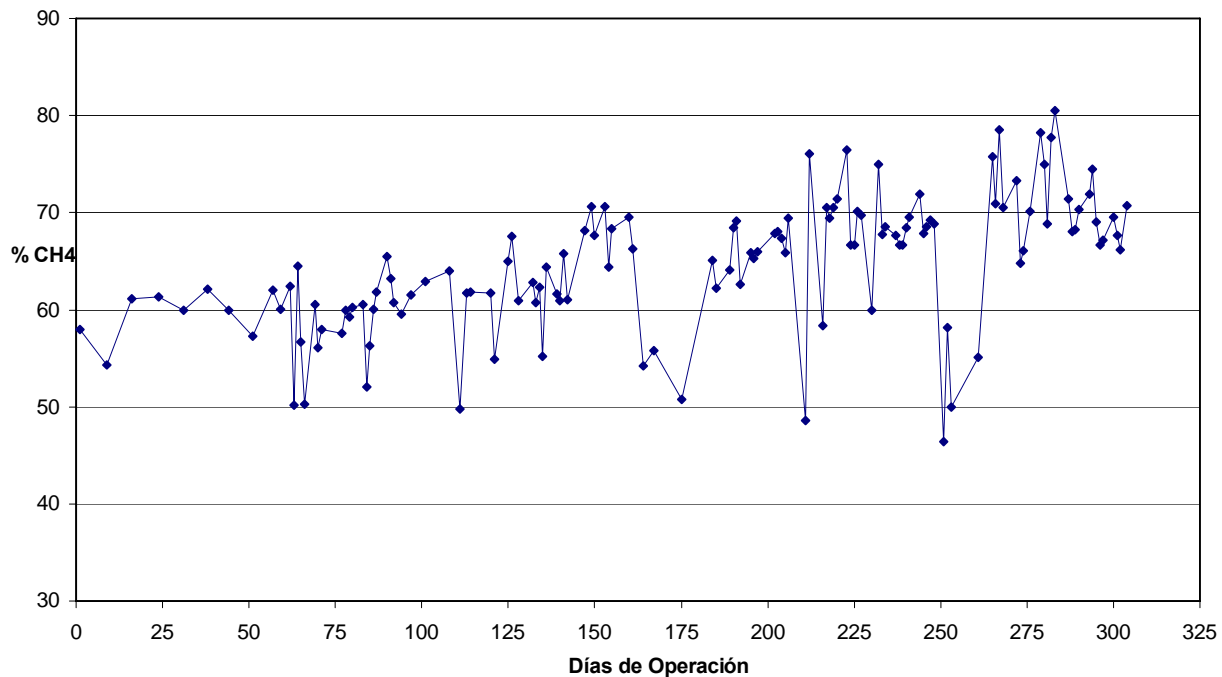


Figura 5.1.5 Porcentaje de CH₄ en T1



Al inicio del periodo de operación, el porcentaje de remoción de sólidos volátiles (%RSV) comenzó a disminuir hasta alcanzar valores de 13% (figura 5.1.6), debido a una sobrecarga en el sistema (ya que se dejó de alimentar periódicamente para hacerlo todos los días), al igual que la producción de biogás, entre los días 30 y 50. Después de la adición de los metales, después de un punto bajo, hubo un incremento muy marcado, el cual con el tiempo fue moderándose. Este comportamiento podría indicar que en un primer tiempo el digestor se desestabilizó cuando se le aplicaron los metales, pero en poco tiempo mostró resultados positivos. Posteriormente se estabilizó en valores de 30 a 40 %. Al final del periodo con metales, se registró una baja inesperada, hasta valores del 20%. Este aparente desequilibrio se manifiesta también en el pH, la alcalinidad y la producción diaria de biogás.

Como se observó en otros parámetros, el sistema se resintió con la adición del aditivo. En este último periodo, el %RSV aumentó sistemáticamente hasta alcanzar valores de 60 % manteniendo una tendencia a la alza.

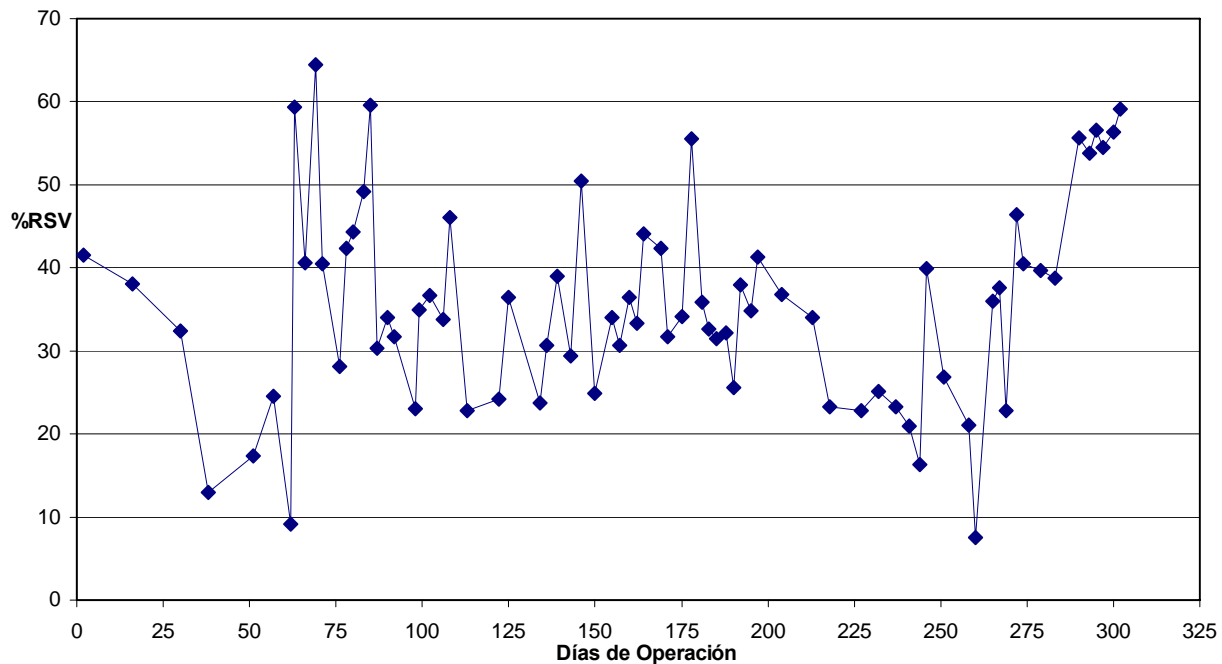


Figura 5.1.6 Porcentaje de Remoción de Sólidos Volátiles en T1

Al comienzo de este trabajo experimental se tenía una concentración de ácidos grasos volátiles (AGV's) por arriba de los 200 mg/L como se verá en las siguientes gráficas. En la figura 5.1.7 se observa que la mayor cantidad de AGV's corresponde al ácido acético seguido por el ácido propiónico. Como fue mencionado para los parámetros ya presentados, se puede observar una ligera acidificación cuando se comienza la operación del digestor, donde los valores de ácido acético y propiónico llegan a alcanzar valores de hasta 150 mg/L. Después de este valor, descienden y cuando se agregan los metales comienza a acidificarse nuevamente y es aquí cuando se registró la mayor concentración de ácido acético (291 mg/L) asociado con un pico de propiónico, lo cual indica cierto impacto negativo al inicio de la dosis de metales, como ya fue sugerido con anterioridad. Después de un periodo relativamente largo de valores bajos de AGV's, de nuevo se presenta un incremento hacia el final del periodo con metales, fenómeno que ya ha sido también señalado. Al inicio de la incorporación del aditivo, se presenta otra inestabilidad por pocos días y en esta ocasión es el ácido propiónico el que alcanza la mayor concentración (306 mg/L) con el acético en 260 mg/L. Después de esto, la concentración de ambos ácidos comienza a disminuir sistemáticamente, es decir el consorcio bacteriano vuelve a estabilizarse.

Cabe señalar que sólo en los periodos en los que el sistema presentó la mayor concentración de acético y propiónico se midió la presencia del ácido iso-butírico, el cual llegó hasta 110 mg/L. Como se presenta en la figura 5.1.8. otros ácidos volátiles también se identificaron sólo en los días siguientes a la adición de metales y del aditivo.

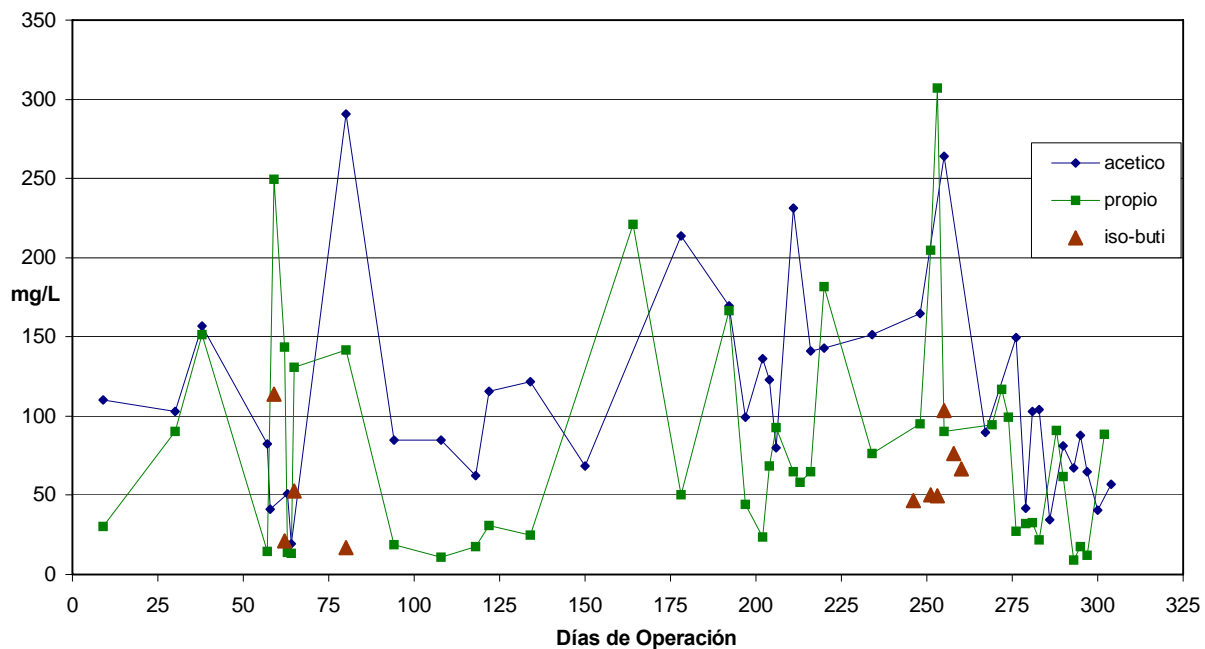


Figura 5.1.7 Concentraciones de ácidos acético, propiónico e iso-butírico en T1



En efecto, en la figura 5.1.8 se puede observar que además de los ácidos antes mencionados, también se tenía al inicio de este trabajo una concentración de ácido butírico de 50mg/L y 13 mg/L de ácido iso-valérico. Sin embargo, estas concentraciones aumentan cuando se incorporan los metales y el aditivo, obteniéndose concentraciones de ácido iso-valérico de hasta 200mg/L y de butírico de 92 mg/L, apareciendo concentraciones de ácido valérico por debajo de 35 mg/L en los momentos en el que el digestor está más acidificado.

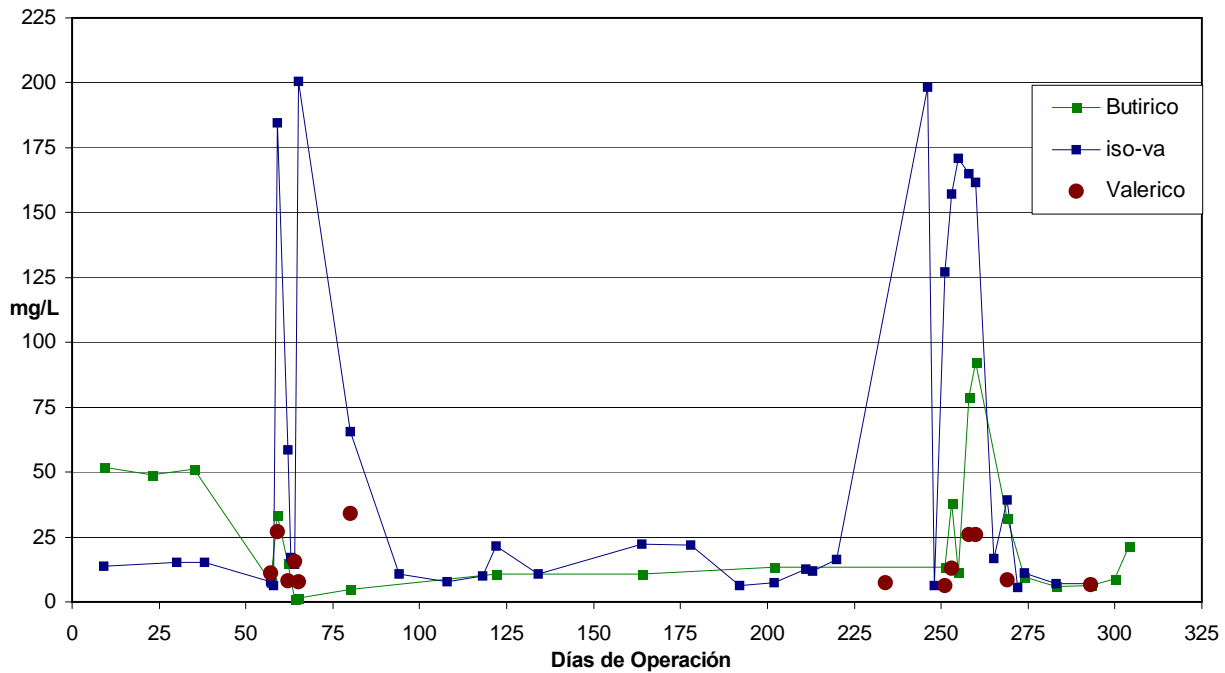


Figura 5.1.8 Concentración de ácido butírico, iso-valérico y valérico en T1



Finalmente, la figura 5.1.9 muestra la suma total de los AGV's y el comportamiento de los mismos durante el proceso. Esta figura tiene una buena correlación con la que presenta el comportamiento de la relación de alcalinidades (figura 5.7.2) como era de esperarse. Ambas figuras muestran que el digestor si resintió la adición de los nutrientes y que después pudo adaptarse. Al inicio de la experimentación se tenía una concentración de AGV's alrededor de los 200 mg/L, la cual aumenta cuando se agregaron los metales hasta alcanzar valores de 600 mg/L; cuando fue adicionado el aditivo se obtuvieron las concentraciones más altas de todo el proceso, cerca de los 700 mg/L.

Fuera de estos dos periodos de acumulación de AGV's, en la mayor parte del proceso las concentraciones de AGV's se mantuvieron en un intervalo adecuado para la operación del digestor, por debajo de 300 mg/L (Malina & Poholand, 1992). En particular se puede señalar que en la etapa estable después de agregar el aditivo, la concentración de AGV's se mantiene alrededor de 100 mg/L, aspecto que va en el sentido del resto de los parámetros medidos en este digestor, y que indica los beneficios de este aditivo.

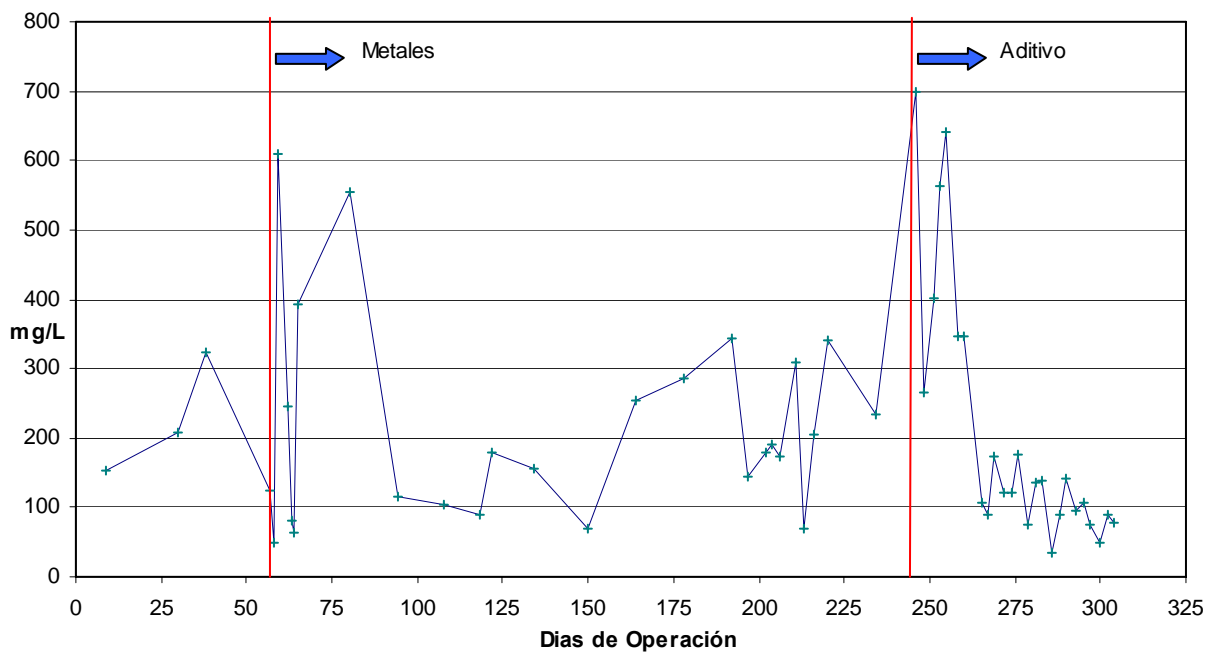


Figura 5.1.9 Concentración Total de ácidos grasos volátiles en T1



5.2 REACTOR T2 (lodo fisicoquímico)

En la tabla 5.2 se puede ver las características del lodo que se alimentaba al digestor T2 es decir, lodo fisicoquímico. Cabe recordar que el digestor se comenzó a operar con un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 20 días y una carga orgánica promedio de 1.0 kg STV/m³*d. Es necesario señalar que este lodo, contrariamente a lo que se esperaría para uno de este tipo, tenía una relación volátil/total muy baja (51%), lo que demuestra que este lodo estaba muy mineralizado (alto contenido de inorgánicos, por ejemplo tierra y arcillas)

Tabla 5.2 Características del lodo de alimentación al digestor T2 (lodo fisicoquímico).

Parámetro	<i>Lodo fisicoquímico</i>
pH	7.09
Alfa	0.3
Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /L)	2420
S.T.T. (g/L)	35.83
S.T.V. (g/L)	17.58
S.T.F. (g/L)	18.25
% S.T.V./S.T.T.	0.51



En el día 27 se comenzaron a operar con normalidad, es decir, alimentar y purgar diariamente y el pH se fue incrementando, en particular a partir del día 50 alcanzando valores de pH por arriba de 7 (figura 5.2.1). Sin embargo, este parámetro fue después decreciendo, debido a una acidificación en el reactor, causado por una elevada concentración de AGV's principalmente ácido acético, como se verá más adelante. Ante esto, el día 115 se aumentó el TRH de 20 a 25 días y con ello la carga orgánica disminuyó de 0.67 a 0.61. Después de este cambio, el pH comenzó a elevarse, para mantenerse entre 7 y 7.5 unidades, valores que según Noyola (1998) son considerados como óptimos para que se lleve a cabo un buen proceso.

Una vez que se agregó el aditivo, el pH volvió a incrementarse hasta rebasar las 7.5 unidades llegando hasta 7.7 para terminar apenas por debajo de 7.5.

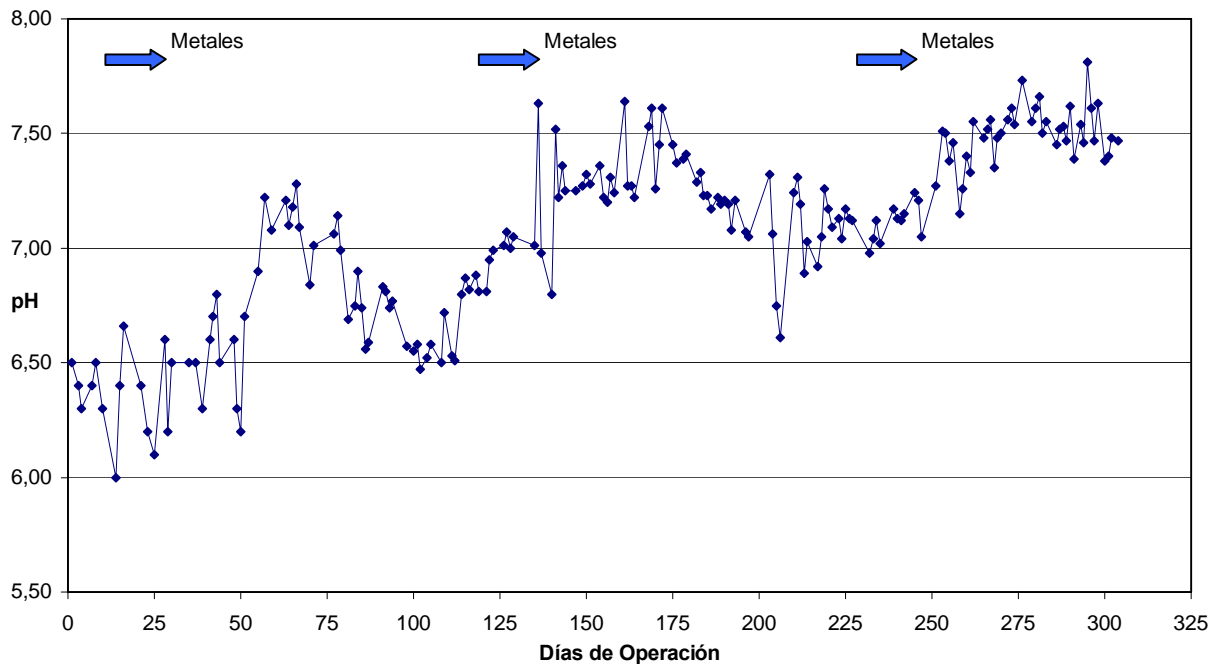


Figura 5.2.1 Variación del pH en T2



Como se puede ver en la (figura 5.2.2) la relación de alcalinidades α se mantuvo constante con valores de 0.31 a 0.37 hasta el día 75 cuando su valor comenzó a disminuir alcanzando valores por debajo de 0.25, lo que fue un claro indicio de que el digester estaba siendo sobrecargado, observación apoyada con otros indicadores como los AGV's y el pH.

A partir del cambio del TRH el parámetro α fue aumentando hasta alcanzar valores de 0.37 pero se estabilizó en 0.3, hasta antes de agregar el aditivo. En presencia de este suplemento, los valores de α fueron aumentando hasta 0.45, los más altos a lo largo del experimento para este digester, lo que indicaba que la concentración de AGV's había disminuido como se podrá ver mas adelante.

En la última etapa de operación y hacia el final de ésta, los valores de α se mantuvieron por arriba de 0.4, valor todavía aceptable para un digester de lodos. Sin embargo, en el resto de la experimentación, este parámetro estuvo siempre por debajo de 0.4, lo que denota una acidificación del sistema y por lo tanto problemas de sobrecarga o de inhibición de las bacterias metanogénicas.

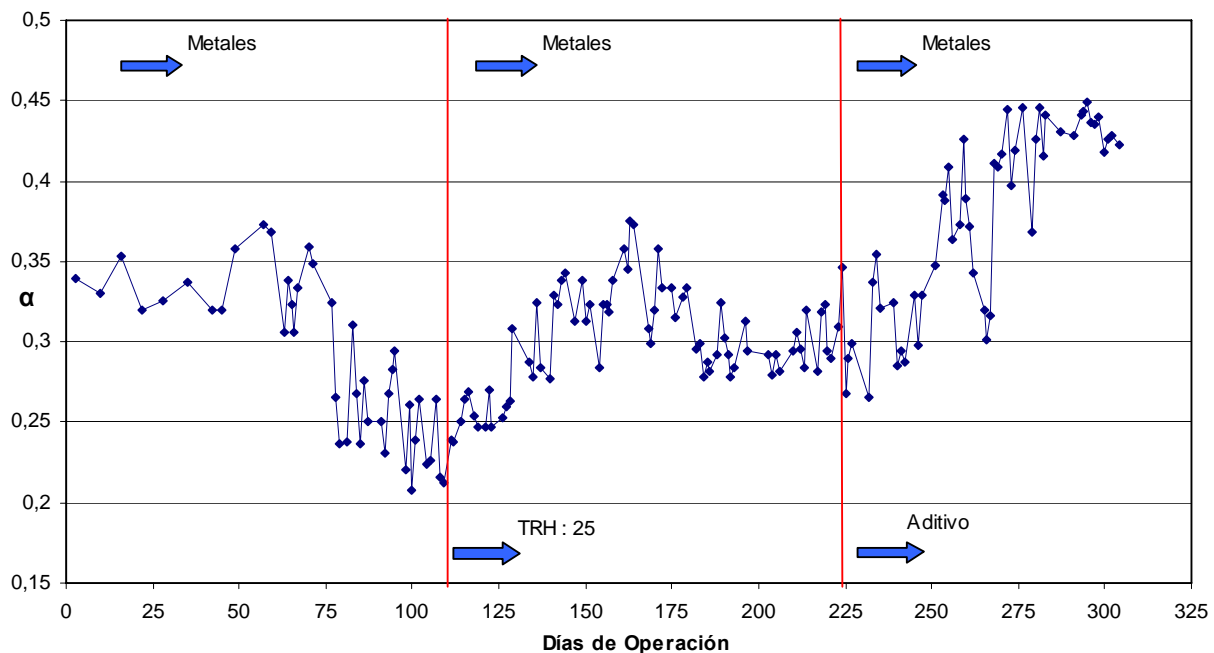


Figura 5.2.2 Relación de Alcalinidades (α) en T2



Se comenzó a trabajar con valores de alcalinidad de 1500 mg CaCO₃/L y fue aumentando progresivamente hasta llegar a 3120 (figura 5.2.3), posteriormente se mantuvo oscilando entre los 2000 y 3000 mg CaCO₃/L. Cuando se cambió el TRH a 25 días la alcalinidad se mantuvo a lo largo de este periodo entre 2500 y 3000 mg CaCO₃/L.

Cuando se agregó el aditivo, el comportamiento de la alcalinidad fue prácticamente el mismo ya que se mantuvo entre 2500 y 3000 mg CaCO₃/L la mayor parte del tiempo, presentando 3500 en su punto más alto y 2160 en el punto más bajo, para terminar en 2840 mg CaCO₃/L. Los valores de alcalinidad se mantuvieron durante la mayor parte del trabajo experimental en el rango de 1500 a 3000 mg CaCO₃/L, adecuado para que se lleve a cabo un buen proceso de digestión anaerobia, sin embargo, esto no se tuvo del todo. La poca variación en este parámetro, a pesar de los cambios evidentes en la relación de alcalinidades, AGV's y pH confirman que la alcalinidad no es un buen indicador del estado de un digestor.

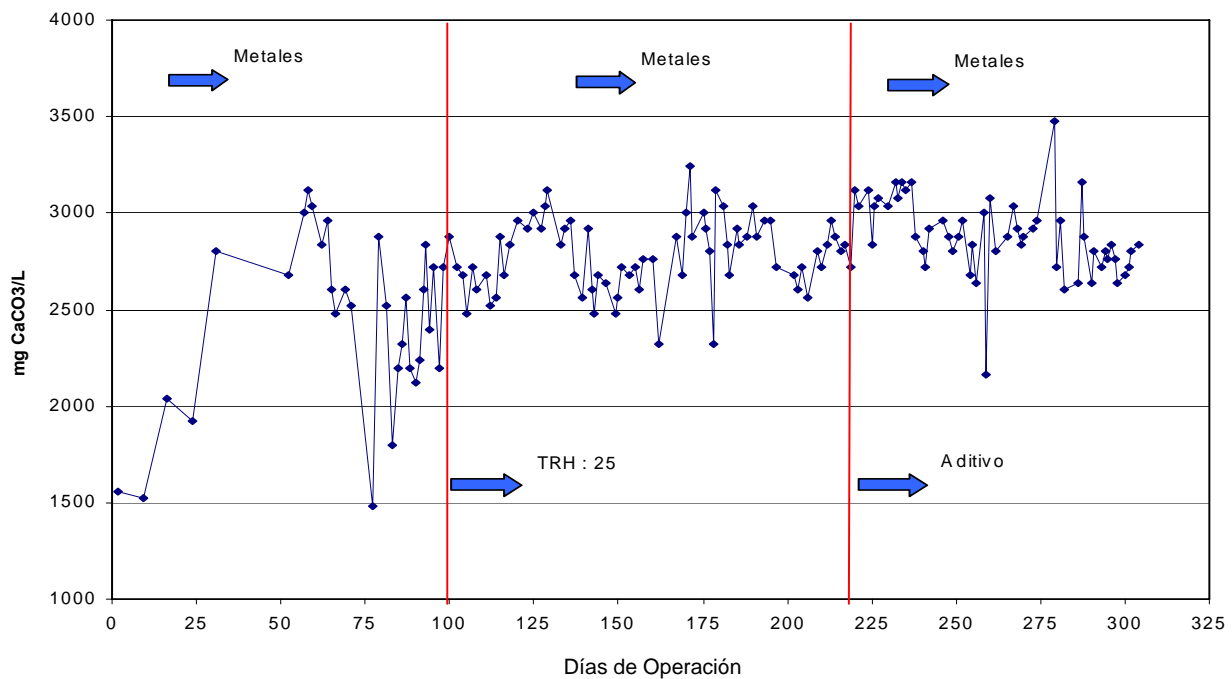


Figura 5.2.3 Variación de la Alcalinidad en T2



La producción de biogás en la primera etapa se mantuvo entre 200 y 300 mL; cuando se cambió el TRH a 25 días la producción de biogás aumentó ligeramente es decir en 100 mL (figura 5.2.4), llegando a producir en algunos días hasta 400 mL, lo que sugiere una mejor degradación de los ácidos acético y propiónico. Con el mismo patrón, la adición del producto hizo que el sistema resintiera el efecto, presentándose una disminución en la producción de biogás de hasta 200 mL que coincidió con un aumento en la concentración de ácido acético. Pasado esto, la producción fue a la alza ya que se alcanzaron valores de 400 a 540 mL/d. Este resultado indica que debido a la incorporación del aditivo en conjunto con los micronutrientes se tuvo una mayor degradación de los ácidos, transformándose esto en biogás y una vez que se llegó al punto más alto en la producción de biogás, el sistema se estabilizó al final de la parte experimental en 400 mL. Esto resulta en un incremento total de 200 mL desde el inicio hasta la parte final de este proceso.

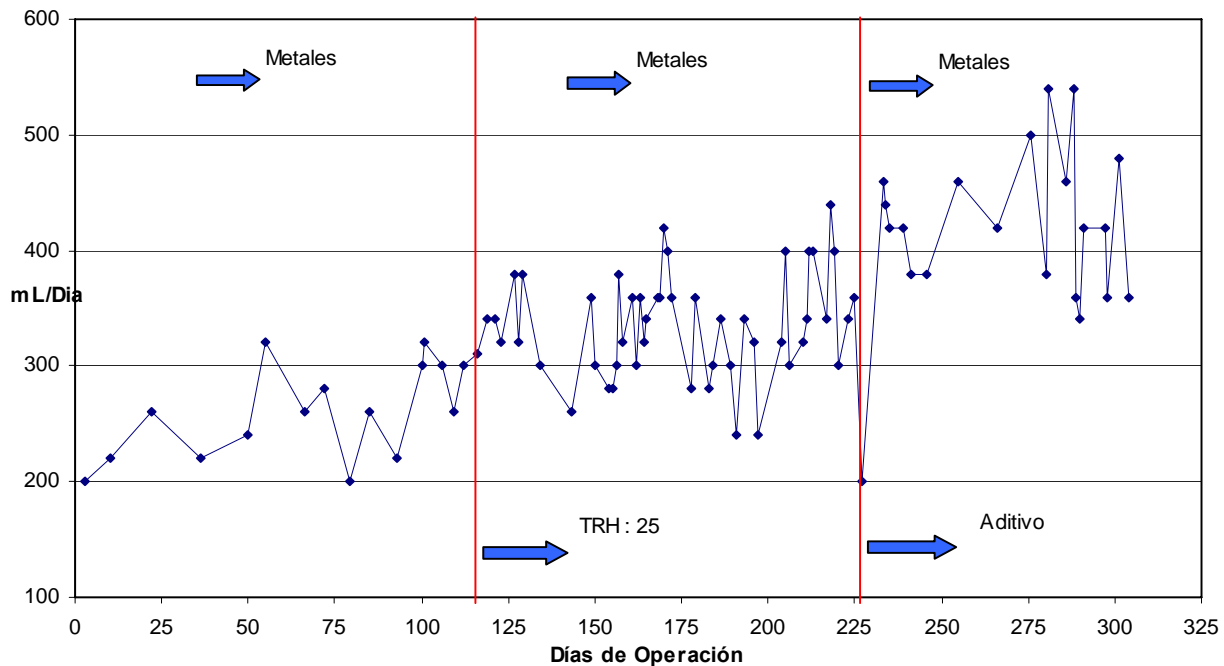


Figura 5.2.4 Producción de Biogás en T2

Se tuvo un porcentaje de metano en la producción de biogás entre 36 y 43% los primeros 58 días; después de esto el porcentaje comenzó a disminuir hasta un 25% (figura 5.2.5). Y es en este mismo periodo cuando la concentración de ácido acético aumentó, por lo que las bacterias acetoclásticas se inhibieron provocando con ello la baja producción de metano. Una vez que se cambió el TRH a 25 días, la producción de metano aumentó, lo que sugiere que el digester estaba siendo sobrecargado antes del cambio del TRH; el valor se incrementó paulatinamente hasta alcanzar valores por arriba del 60%.

Ya incorporado el aditivo el porcentaje se mantuvo arriba de 65% por 20 días, y presentó una caída hasta llegar a 58%; sin embargo se recuperó y alcanzó el máximo registrado en toda la parte experimental con un 69% de metano en la composición del biogás. Después de este punto la composición comenzó a disminuir hasta 43%, presentándose una inhibición en las bacterias metanogénicas.

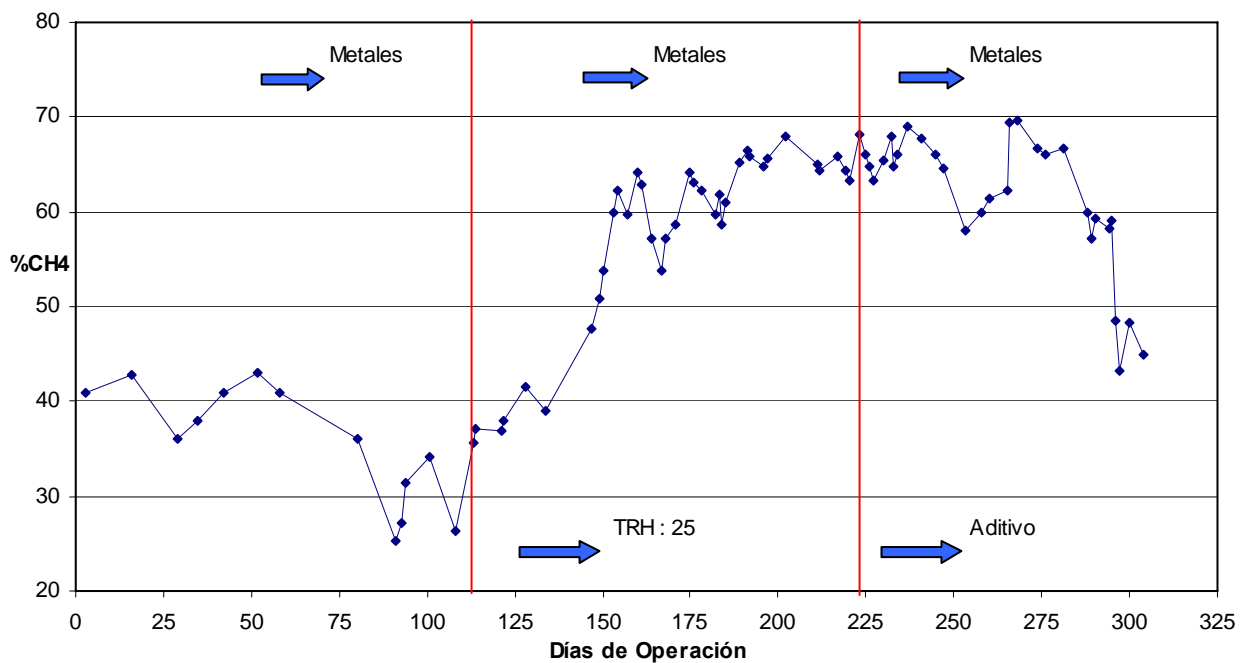


Figura 5.2.5 Porcentaje de CH₄ en T2



El digester T2 comenzó a operarse con valores de 12% en remoción de sólidos volátiles (%RSV) y fue aumentando paulatinamente hasta alcanzar valores de remoción del 28% (figura 5.2.6). Sin embargo, después de que el digester alcanzara dicho valor, el %RSV vino a la baja hasta registrar 9 % de RSV. Pocos días después se cambió el TRH a 25 días. Ya con TRH de 25 días se tuvieron altibajos con intervalos de 25 a 10% de RSV teniendo un promedio en este periodo del 20.9 %, valores muy bajos con respecto al 60 y 80% reportado por Krugel et al. (1998) trabajando con lodo primario convencional en digestores a escala real.

Una vez que se agregó el aditivo, los valores de %RSV fueron incrementándose y es en este mismo periodo cuando se registró el valor más alto a lo largo de la fase experimental, es decir 29% RSV, lo que coincide con el registro de los valores más altos de porcentaje de metano. En general, los diversos parámetros indican que este fue un periodo muy activo para el digester T2. Sin embargo al final de la fase experimental el %RSV sufrió una caída para terminar con valores del 14%.

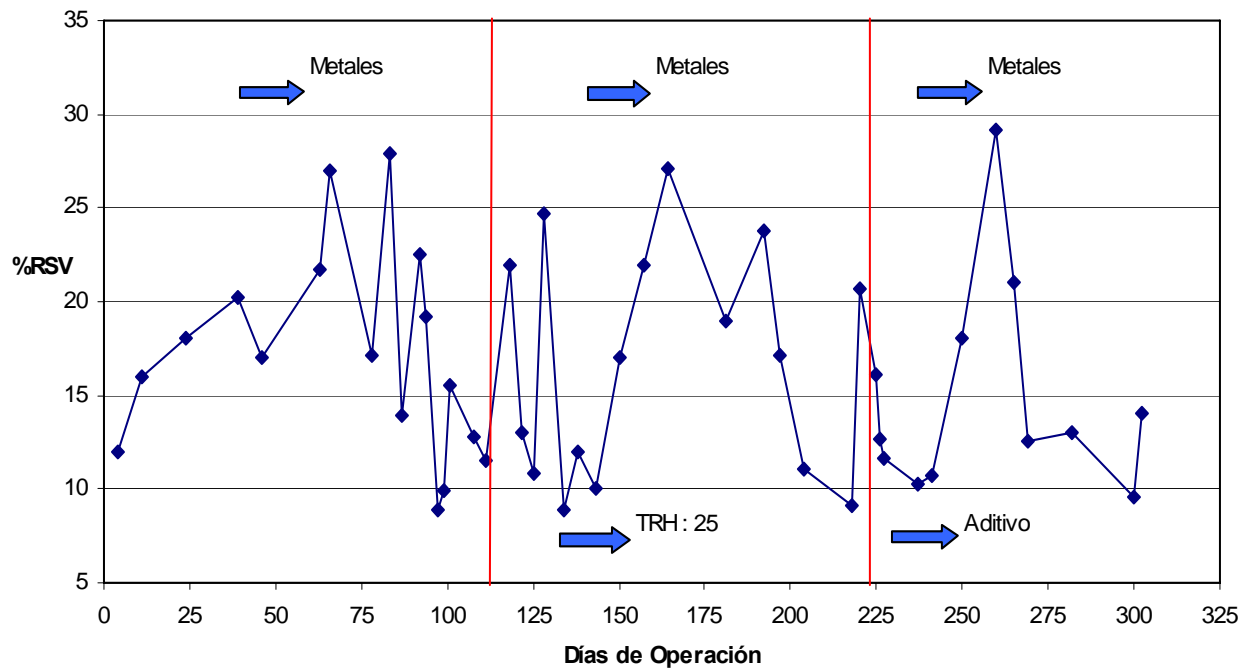


Figura 5.2.6 Porcentaje de Remoción de Sólidos Volátiles en T2



En este digestor las concentraciones de AGV's fueron mayores en comparación a T1, inicialmente con concentraciones de ácido acético de 450 a 630 mg/L; de ácido propiónico de 72 a 190 mg/L y de ácido iso-butírico de alrededor de 100 mg/L. Este último mantuvo esta concentración por los primeros 175 días (figura 5.2.7). Cerca del día 59, las concentraciones de los ácidos acético y propiónico comenzaron a incrementarse, registrando el ácido acético su concentración más alta (994 mg/L) en el día 94. Esto se reflejó en la disminución del parámetro α así como en el pH y en el %CH₄, lo cual nos sugiere una inhibición en las bacterias acetoclásticas.

Una vez que se cambió el TRH a 25 días las concentraciones de los ácidos acético y propiónico comenzaron a decrecer, y es en el día 190 cuando los tres ácidos registraron una caída importante con respecto a su concentración, registrando los valores más bajos hasta ese momento. Después de agregado el aditivo las concentraciones aumentaron solo un poco, para después comenzar a disminuir cerca del día 230, siendo en este periodo cuando los ácidos acético y propiónico registraron sus valores más bajos, 145 y 10 mg/L respectivamente. Al final de la fase experimental, la concentración del ácido acético presentó un alza para terminar en 511 mg/L.

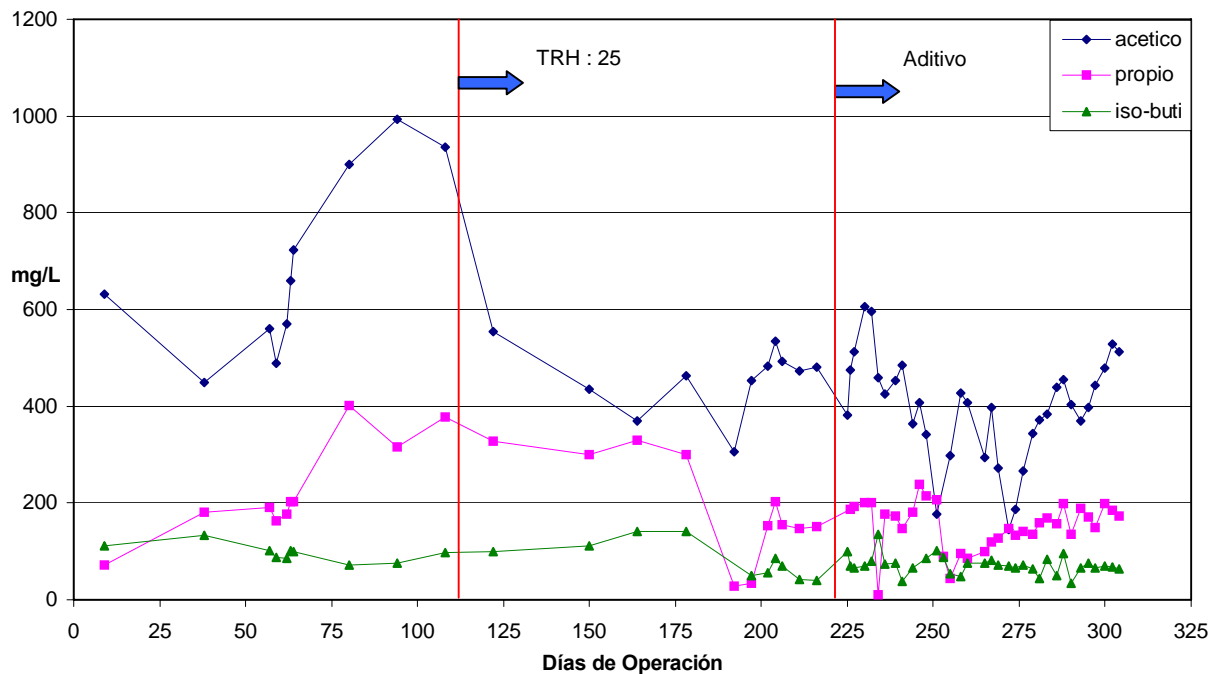


Figura 5.2.7 Concentración de ácido acético, propiónico e iso-butírico en T2



Tal como se muestra en la figura 5.2.8 el ácido iso-valérico se mantuvo entre 165 a 235 mg/L al comienzo de la fase experimental a un TRH de 20 días. Con el cambio del TRH se presentó un aumento alcanzando su concentración más alta (269 mg/L). Así mismo, después de que se incorporó el aditivo, cerca del día 258 se registró la concentración más baja 105 mg/L , para terminar alrededor de 170 mg/L. Con respecto a los ácidos butírico y valérico, las concentraciones fueron relativamente bajas al comienzo de este proceso, por debajo de los 40 mg/L. Se registró un aumento cerca del día 61, al igual que los ácidos acético y propiónico, con valores por arriba de 50 mg/L.

Con TRH de 25 días, las concentraciones de ambos ácidos se mantuvieron constantes y bajas: 25 mg/L para el butírico y 9 mg/L para el valérico, sin cambio, incluso después de la adición del aditivo.

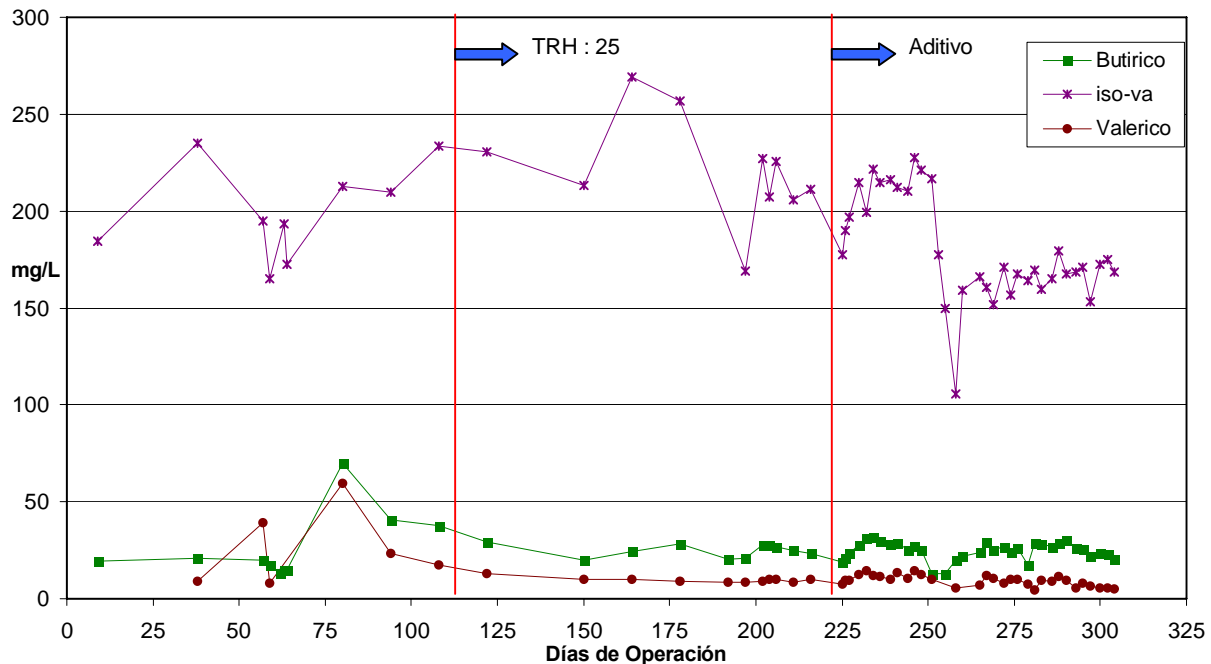


Figura 5.2.8 Concentración de ácido butírico, iso-valérico y valérico en T2



Finalmente la suma de todos los ácidos se presenta en la figura 5.2.9 donde se muestra que inicialmente se tuvieron concentraciones de 1019 a 1105 mg/L y cerca del día 60 el digester comenzó a acidificarse, producto de un aumento marcado en la concentración de los ácidos, hasta una concentración de 1700 mg/L. Con el cambio del TRH a 25 días, la concentración de los ácidos fue disminuyendo y para el día 192 se registraron 552 mg/L. Después de agregar el aditivo se registró la concentración más baja de todo el proceso (497 mg/L) y para el final del proceso las concentraciones fueron a la alza, para terminar en 942 mg/L, lo cual se vio reflejado en una disminución en el % de CH₄.

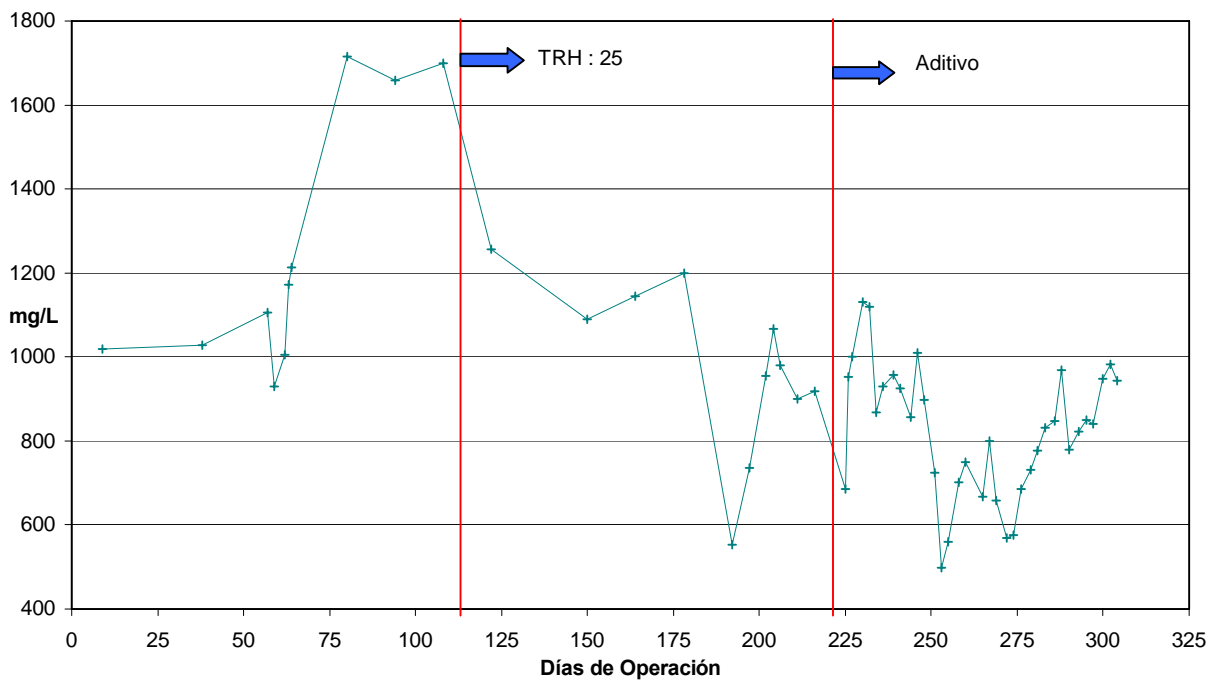


Figura 5.2.9 Concentración total de ácidos grasos volátiles en T2



5.3 RESUMEN DE RESULTADOS

En las tablas 5.3 y 5.4 se muestra un resumen de los datos antes presentados, dividido en los tres diferentes periodos de este trabajo experimental, es decir, para T1: antes de agregar metales, después de agregar metales y después de la adición del aditivo más los metales. Para T2: TRH de 25 días con metales, TRH de 20 días con metales y después de incorporar el aditivo y los metales.

Tabla 5.3 Resumen de los resultados promedio representativos durante cada periodo de operación del digestor T1. Entre paréntesis la desviación estándar.

Parámetro	Reactor T1			
	Influente	Sin metales	Con metales	Metales y aditivo
Temperatura (°C)	-	51(±3)	55(±3)	55(±3)
TRH (días)	-	13	13	13
pH	6.79(±0.05)	7.6(±0.2)	7.9(±0.3)	8.2(±0.1)
Alfa	0.33(0.03)	0.72(±0.03)	0.71(±0.05)	0.8(±0.02)
Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /L)	1140(106)	2680(±170)	3181(±605)	3720(±161)
Biogás (mL/día)	-	3056(±441)	3348(±331)	3383(±269)
%Metano	-	60(±2)	65(±5)	69(±2)
%RSV (g/L)	-	28	35	41
S.T.T. (g/L)	24.58	7.04	16.12	10.75
S.T.V. (g/L)	16.05	4.54	9.51	6.26
S.T.F. (g/L)	8.53	2.5	6.61	4.49
% S.T.V./S.T.T.	0.64(±0.18)	0.64(±0.01)	0.59(±0.01)	0.58(±0.01)
Carga Orgánica (kg STV/m ³ * d)	-	1.37	1.38	1.42
Acético (mg/L)	-	114	129	34
Propiónico (mg/L)	-	85	75	45
Iso-butírico (mg/L)	-	0	51	65
Butírico (mg/L)	-	40	12	10
Iso-valérico (mg/L)	-	13	14	35
Valérico (mg/L)	-	11	17	14
Concentración total AGV's (mg/L)	-	263	298	203



Tabla 5.4 Resumen de los resultados promedio representativos durante cada periodo de operación del digestor T2. Entre paréntesis la desviación estándar

Parámetro	Reactor T2 (siempre con metales)			
	Influente	TRH 20 días	TRH 25 días	Metales y aditivo
Temperatura (°C)	-	57(±3)	55(±1)	55(±3)
TRH (días)	-	20	25	25
pH	7.09(±0.23)	6.8(±0.2)	7.1(±0.1)	7.5(±0.1)
Alfa	0.3(±0.04)	0.27(±0.04)	0.3(±0.01)	0.42(±0.0)
Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /L)	2420(±54)	2503(±326)	2836(±150)	2754(±78)
Biogás (mL/día)	-	270(±38)	338(±56)	400(±69)
%Metano	-	30(±4)	65(±3)	57(±7)
%RSV (g/L)	-	18	17	14
S.T.T. (g/L)	35.83	28.77	30.79	29.93
S.T.V. (g/L)	17.58	13.38	15.29	14.18
S.T.F. (g/L)	18.25	15.39	15.49	15.75
% S.T.V./S.T.T.	0.49(±0.02)	0.46(±0.09)	0.5(±0.04)	0.47(±0.01)
Carga Orgánica (kg STV/m ³ * d)	-	1.0	0.69	0.68
Acético (mg/L)	-	797	460	376
Propiónico (mg/L)	-	279	124	158
Iso-butírico (mg/L)	-	89	57	67
Butírico (mg/L)	-	32	24	25
Iso-valérico (mg/L)	-	204	208	166
Valérico (mg/L)	-	33	9	8
Concentración total AGV's (mg/L)	-	1434	882	800



Como se puede observar en la tabla 5.3, la incorporación de aditivos nutrientes en el reactor T1 contribuyó a mejorar el proceso de digestión anaerobia de lodo biológico o convencional, tanto con la incorporación de metales por separado como en conjunto con el aditivo. En la segunda etapa, es decir con la adición de metales, la producción de biogás aumentó casi 300mL y en la tercera etapa, con metales y aditivo, solo aumentó 40 mL; los incrementos en el porcentaje de metano y en la relación de alcalinidades se presentaron en ambas etapas. Fue en la tercera fue en donde se obtuvo menor concentración de AGV's y mayor %RSV.

Con lo que respecta al digestor T2, éste tuvo más inconvenientes para digerir el lodo de tipo fisicoquímico alimentado, tal como ya ha sido reportado (Tinajero, 2004) lo cual se aprecia en la tabla 5.4. Es notoria la mejoría que se obtuvo en todos los parámetros al disminuir la carga orgánica aplicada de 1.0 a 0.69 kgSTV/m³d y el aumento resultante en el TRH de 20 a 25 días; debe recordarse que en ambas condiciones se agregaron metales. Tal respuesta denota claramente que el digestor estaba inhibido en la primera condición de operación y que los metales aparentemente no estaban contribuyendo a disminuir este problema. En este cambio, el aumento en la producción de biogás puede considerarse limitado, no así el aumento en el porcentaje de metano, el cual fue acompañado con una clara disminución en la concentración de ácidos grasos.

En la tercera y última etapa, con la incorporación del aditivo, la producción de biogás volvió a incrementarse, pero esta vez disminuyó el porcentaje de metano de 65 a 57%. La concentración de AGV's se redujo, mostrando que el aditivo tuvo un efecto positivo en su conversión a metano. Este resultado se vio reflejado en una clara mejoría en la relación de alcalinidades, la cual alcanzó 0.42. Sin embargo, el %RSV disminuyó en esta tercera etapa, lo cual no es congruente con los resultados mostrados en otros parámetros. Sin duda, el cambio de lotes en los lodos alimentados introdujeron una variable que no fue controlada, dada la dificultad para mantener una calidad constante en el lodo muestreado en la planta de tratamiento.

Los resultados obtenidos con el digestor T2 muestran que la adición del aditivo permitió alcanzar mejores indicadores (mayor relación de alcalinidades, menor concentración de AGV's, con la mayor producción de biogás). Para el digestor T1, tanto los metales como el aditivo contribuyeron a mejorar la digestión del lodo convencional, con valores más adecuados para el caso de ambos productos juntos. Cabe mencionar que en los dos digestores, la última etapa (incorporación de aditivo) tuvo menor tiempo de duración (59 y 81 días para T1 y T2 respectivamente), comparada con la segunda etapa (metales y cambio de TRH para T2), 188 y 111 días para T1 y T2 respectivamente, debido a limitantes de tiempo disponible para la fase experimental.



Por otro lado, se considera necesario investigar alguna técnica hidrolítica que permita ayudar a la primera de las etapas limitantes del proceso anaerobio, es decir, la hidrólisis de la materia orgánica particulada rompiendo las moléculas complejas para proporcionar mayor sustrato soluble a las bacterias metanogénicas. A este respecto, Moeller (1999) propuso la adición de estimulantes (extracto de levadura), lo cual realizó en digestores alimentados con lodos primarios. En ese trabajo se encontró que: el mejoramiento de la digestión anaerobia mediante la adición de extracto de levadura se confirma solo para cargas orgánicas volumétricas menores a $1.9 \text{ kg DQO/m}^3 \cdot \text{d}$.

Aunque no se realizaron determinaciones microbiológicas, otros trabajos realizados por el grupo de investigación muestran que la temperatura de 55°C logra la remoción de patógenos y parásitos para cumplir la Clase A de la NOM-004 para estos parámetros. Lo anterior a pesar de que se tengan procesos ineficientes en lo que se refiere a la estabilización de la materia orgánica, como fue el caso del digestor T2.



6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos durante el periodo experimental se puede concluir lo siguiente:

- La dosis de metales en la primera etapa del proceso experimental no fue suficiente para alcanzar una operación adecuada del digester T2, alimentado con lodo fisicoquímico con un TRH de 20 días, ya que la relación de alcalinidades mostró valores bajos (0.27) y una alta concentración de AGV's (1432 mg/l), indicativo de un digester sobrecargado.
- Los relativamente buenos resultados obtenidos en la segunda etapa experimental para el digester T2, no se le pueden atribuir a los metales ya que éstos se venían incorporando desde el inicio de la fase experimental y aun así el digester presentaba problemas de inhibición. La mejoría se debió a la disminución de la carga orgánica que se alimentaba al digester.
- Con un TRH de 25 días, el digester T2, con adición de metales y del aditivo presentó una reducción en la concentración de AGV's, con el consecuente aumento en la producción de biogás y en la relación de alcalinidades llegando ésta a 0.42. Sin embargo, la carga orgánica aplicada bajo estas condiciones (0.68 kgSTV/m³d) es demasiado si se compara con la aplicada a digestores que reciben lodos de desecho de plantas convencionales.
- En el digester T1 se identificaron beneficios al agregar la dosis de metales y el aditivo al sistema, ya que se registró un incremento en el porcentaje de metano, una reducción en la concentración de ácido acético y un aumento en el %RSV.
- La adición del aditivo a la digestión anaerobia del lodo fisicoquímico tuvo un impacto positivo, aunque limitado frente a los problemas de inhibición inherentes al sistema que no permiten un mejor proceso de digestión.



- Con base a los resultados obtenidos en este trabajo experimental, se recomienda el uso de la mezcla metales y aditivo, para ambos tipos de lodos., no así el uso de metales con la dosis utilizada en este trabajo para la estabilización de este tipo de lodos, específicamente en el proceso de digestión anaerobia termofílica. Por otra parte, se recomienda el uso de aditivo y metales para la estabilización de lodo biológico debido a los resultados obtenidos en el digestor comparativo T1.

6.2 RECOMENDACIONES

- Realizar una especiación de metales nutrientes en ambos digestores, con el fin de conocer la distribución de los elementos traza en el lodo, y determinar si existen carencias de los mismos.
- Debido a que la incorporación de metales no presentó mayor relevancia para el lodo fisicoquímico, se recomienda trabajar con otras concentraciones de metales, diferentes a las empleadas en este trabajo.
- Para el caso del digestor T2 sería conveniente investigar con mayor profundidad la incorporación de metales y aditivo con el TRH de 20 días, para tener una mejor comparación de la adición de aditivos nutrientes con los mismos TRH.
- Se recomienda la adición del aditivo durante un tiempo de experimentación mayor al que se tuvo en este trabajo y variar las dosis para identificar la más adecuada.



7. REFERENCIAS

- Aitken, Michael D. and Mullenix Robert W. (1992). *Another Look at Thermophilic Anaerobic Digestion Of Wastewater Sludge*. Water Environmental Research, Vol.64. No. 7 pp 915-919.
- APHA, AWWA, WPCF (1995). *Standart Methods for the examination of water and wastewater*. 19th Edition. USA
- Bode, H. and Klauwer, E. (1999). *Advantages and disadvantages of different shapes in digester desing*. WQI Casebook. March/april, pp 35-40.
- Cabirol N., Barragán E., Duran A. y Noyola A. (2003). *Effect of aluminium and sulphate on anaerobic digestion of sludge from wastewater enhanced primary treatment*. Water Science and Technology, 235-240.
- Daniels B.N. y Rajagopal B.S. (1986). *Assimilatory reduction of sulfate and sulfite by methanogenic bacteria*. *Applied & Environ. Microbiology*, pp 51.
- Environmental Protection Agency (1996a). *A guide to the biosolids risk assessments for the EPA part 503 rule*. USA.
- Environmental Protection Agency (1996b). *A plain English guide to the biosolids risk assessments for the EPA part 503 rule*. USA.
- Ghosh, S., Conrad, J.R., Klass, D.L. (1975). *Anaerobic acidogenesis of wastewater sludge*. *Journal WPCF*. Vol 47. No. 1. pp 30-45.
- Gujer, W. & Zehnder, J.B. (1983). *Conversión procesos in anaerobic digestión*. *Wat. Sci. Tech*. Vol 5. pp. 127-167.
- Jenkins, S.R., Morgan, J.M., Zhang, X, (1991). *Measuring The Usable Carbonate Alkalinity Of Operating Anaerobic Digesters*. *Res. J. WPCF*, Vol. 63 No.1
- Kayhaniman, M. and Richard, D. (1995). *Pilot-Scale Hight Solid Thermophilic Anaerobic Digestion Of Municipal Solid Waste Whit an Emphasis on Nutrient Requirements Biomas and Energy*. Vol. 8 No. 6, pp. 433-444.
- Khanal S.K., Isik H. and Sunk S. (2006). *Effect of ultrasonic pre-treatment on aerobic digestion of waste activated sludge*.



- Kim, M., Ahn, Y.H., Speece, R.E. (2002). *Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion; mesophilic vs. termophilic* . Water Research. Vol 36. pp 4369-4385.
- Krugel Steve, Leslie Nemeth and Craig Peaddie. (1998). *Extending Thermophilic Anaerobic Digestion For Producing Clas “a” Biosolids at the Greater Vancouver Regional Districts Annals Island Wastewater Treatment Plant*. Wat. Sci. Tech. Vol. 38 No. 8-9, pp. 409-416.
- Lecchi, F., Pavan, P. Musacco, A., Mata-Alvarez, J. And Sans, C. (1992). *Comparison Between Thermophilic and Mesophilic Anaerobic Digestion Of Sewage Sludge Comino From Urban Wastewater Treatment Plants*. Wat. Sci. Tech., Vol. 26 No. 9-11, pp.2409-2412.
- Malina, J.F. and Pohland, F.G. (1992). *Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes*. Technomic Publishing Co. USA. pp. 214.
- Metcalf & Eddy (1991). *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse*. 3rd Edition. Mc Graw-Hill. USA. 1334 pp.
- Metcalf & Eddy (2003). *Wastewater Engineering: treatment and reuse*. 4th Edition. Ed. McGraw-Hill, ISBN: 0-07-112250-8, USA.
- Moeller Chávez, Gabriela Eleonora (1999). *Mejoramiento de la digestión anaerobia de lodos residuales primarios por medio de estimulación y pretratamiento*. Instituto de Ingeniería, UNAM - IMTA, México.
- Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Diario Oficial de la Federación. 15 de agosto de 2002.
- Noyola A. (1994). *Diseño, inoculación y arranque de reactores UASB*. Tratamiento anaerobio memoria del III Taller y Seminario Latinoamericano “Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales”. Universidad de la Republica. Montevideo, Uruguay. Pp 331-340.
- Noyola A. (1996). *Anaerobic Technology as a tool for the sustainable Environment; The Context of Mexico*, en Biodegradación de compuestos orgánicos. Llangovan K., Briones R. Editores, UNAM, pp. 169-172.



- Noyola A. (1998 a). *Anaerobio vs. Aerobio, un debate (casi) superado*. *Biológico vs. Primario Avanzado, ¿el nuevo debate?* Ingeniería y ciencias ambientales. Num. 34, Enero-Febrero. Pp. 10-14.
- Noyola, A. (1998b). *Digestión anaerobia de lodos*. Memorias del curso “Digestión anaerobia de lodos y aguas residuales”. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, A.C. México.
- Oles, J., Dichtl, N., Niehoff, H. (1997). *Full scale experience of two stage thermophilic/mesophilic sludge digestion*. *Wat. Sci. Tech.* Vol 36. No 6-7. pp 449-456.
- Oleszkiewicz J.A. y Mavinic D.S. (2002). *Wastewater biosolids: and overview of processing, treatment and management*. *J. Environ. Eng. Sci.* 1: 75-88.
- Orozco R. S. (2002). *Subproductos del tratamiento del agua: Tratamiento de lodos fisicoquímicos por digestión anaerobia termofílica y mesofílica*. Tesis de Licenciatura Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Qasim, S. (1994). *Wastewater treatment plants*. Technomic Publishing Co. USA. 726 pp.
- Sharma J. y Singh R. (2001). *Effect of nutrients supplementation on anaerobic sludge development and activity for treating distillery effluent*. *Bioresource Technology*. 79 (2001), 203-206.
- Speece R.E. (1983). *Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment* *Environmental Sci. & Technology*, 17 (9): 416-427.
- Stuckey D.C. y McCarty P.L. (1984). *The effect of thermal pretreatment on the anaerobic biodegradability and toxicity of waste activated sludge*. *Water Resources*, 18 (11): 1343-1353.
- Tinajero, A. (2004) *Aplicación de aditivos enzimáticos y micronutrientes para la estabilización anaerobia de lodos fisicoquímicos*. Tesis de Maestría, Instituto de Ingeniería, UNAM, México
- Zábranská J., Dohányos M., Jeníček P., Ruzicikova H. y Vránová A. (2003). *Efficiency of autothermal aerobic digestion and thermophilic anaerobic digestion of municipal wastewater sludge in removing Salmonella spp. And indicator bacteria*. *Water Science and Technology*, 47 (3), 151-156.
- Zehnder A. J. B. (1978). *Ecology of methane formation*. In *Water Pollution Microbiology* Vol. 1., John Wiley & Sons.



RESULTADOS EXPERIMENTALES REACTOR T1 (lodo biológico)

RESULTADOS Y CÁLCULOS EXPERIMENTALES PARA EL DIGESTOR (TERMOFILICO T1)													
Días Op.	Alim.	T °C	Biogás	Ph	α	Alc. Tot	%CH4	%RSV	STT	STF	STV	sv/st	C.O.
1	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	385	49,3	2700	7,63	0,69	1920	76,63	41,57	6,3	2,47	3,83	0,61	0,29
3	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	385	58,2	3200	7,87	0,7	1840	54,36	26,45	6,47	2,37	4,1	0,63	0,32
10	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	385	49,2	2900	7,61	0,67	2080	61,14	38,12	7,61	2,63	4,98	0,65	0,38
17	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	385	50,5	2600	7,51	0,7	2280	61,37	24,56	6,35	2,69	3,66	0,58	0,28
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	385	52,1	2650	7,79	0,79	2800	59,96	32,39	6,3	2,47	3,83	0,61	0,29
32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	385	57,2	2800	7,56	0,82	3040	62,11	12,97	11	3,68	7,34	0,67	0,57
39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Días Op.	Alim.	T °C	Biogás	Ph	α	Alc. Tot	%CH4	%RSV	STT	STF	STV	sv/st	C.O.
41	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
43	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	385	57,2	2400	7,58	0,77	3160	59,98	22,16	7,04	2,8	4,24	0,6	0,33
45	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
48	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	385	48,3	1450	7,44	0,67	2800	57,3	17,38	7,61	2,63	4,98	0,65	0,38
52	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	385	50,2	3305	7,56	0,74	2450	59	26,6	6,47	2,37	4,1	0,63	0,32
56	385	50,5	3360	7,89	0,79	2540	58	-	-	-	-	-	-
SE COMENZÓ A AGREGAR METALES AL DIGESTOR													
57	385	50,8	3415	7,75	0,73	2560	62	22,3	5,36	2,02	3,33	0,62	0,26
58	385	51,1	3470	7,62	0,77	2600	62	-	-	-	-	-	-
59	385	58,3	3525	7,54	0,8	2360	60,08	24,56	22,9	10,8	12,1	0,53	0,93
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	385	46,6	3500	7,20	0,47	3040	62,38	32,25	13,6	4,42	9,2	0,68	0,71
63	385	54,2	3700	7,10	0,57	2600	50,14	-	-	-	-	-	-
64	385	51,6	3200	7,82	0,7	2640	64,46	32,56	14,5	7,49	6,96	0,48	0,54
65	385	54,8	3450	7,69	0,7	2440	56,67	-	-	-	-	-	-
66	385	55,9	2750	7,65	0,7	2400	50,31	40,56	24,1	13,1	11	0,46	0,85
67	385	56,8	2500	7,45	0,67	2520	-	-	-	-	-	-	-
68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
69	385	56,7	3800	7,56	0,75	2400	60,57	34,69	25,6	14,1	11,5	0,45	0,88
70	385	50,5	3150	7,45	0,73	2360	56,1	-	-	-	-	-	-
71	385	57,1	3200	7,48	0,69	2600	58	40,49	6,35	2,69	3,66	0,58	0,28
72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
76	385	56,2	4000	7,91	0,77	2480	57	34,69	5,36	2,02	3,33	0,62	0,26
77	385	55	3200	7,87	0,57	2400	57,54	-	-	-	-	-	-
78	385	50	3300	8,16	0,6	2520	59,98	42,31	5,61	2,42	3,2	0,57	0,25
79	385	56,5	3600	8,2	0,68	2720	59,27	-	-	-	-	-	-
80	385	52,1	3500	8,0	0,57	2160	60,24	44,31	5,66	2,49	3,17	0,56	0,24
81	385	57,8	3550	7,9	0,54	2080	-	-	-	-	-	-	-
82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Días Op.	Alim.	T °C	Biogás	Ph	α	Alc. Tot	%CH4	%RSV	STT	STF	STV	sv/st	C.O.
83	385	57,4	3100	8,20	0,75	2400	60,59	34,56	23,2	9,21	14	0,6	1,08
84	385	57,1	3500	7,99	0,77	2440	52,06	-	-	-	-	-	-
85	385	57,8	3400	8,13	0,77	2400	56,25	34,89	20,5	10,6	9,84	0,48	0,76
86	385	51,4	3500	7,96	0,77	2480	60,1	-	-	-	-	-	-
87	385	56,2	3900	8,10	0,85	2080	61,81	32,59	5	1,93	3,08	0,61	0,24
88	385	54,3	3500	8,13	0,8	2200	-	-	-	-	-	-	-
89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	385	57,8	4000	8,20	0,79	2480	65,52	34	7,04	2,8	4,24	0,6	0,33
91	385	58,4	2850	7,81	0,77	2840	63,2	-	-	-	-	-	-
92	385	57,4	3700	8,21	0,75	2560	60,76	31,71	15,2	5,81	9,39	0,62	0,72
93	385	56,8	3550	8,10	0,75	2440	62	-	-	-	-	-	-
94	385	57,3	3250	8,17	0,75	2440	59,54	32,45	19,3	8,24	11,1	0,57	0,85
95	385	57,8	3300	8,24	0,79	2520	-	-	-	-	-	-	-
96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
97	385	56,5	3600	8,11	0,72	2600	61,54	32,89	6,72	2,43	4,29	0,64	0,33
98	385	56,7	3600	8,04	0,79	2440	63	-	-	-	-	-	-
99	385	56,9	3500	8,18	0,79	2480	60	34,92	19,3	8,24	11,1	0,57	0,85
100	385	57,5	4000	8,10	0,74	2600	62	-	-	-	-	-	-
101	385	56,9	3700	8,12	0,74	2320	62,94	36,69	5,61	2,25	3,36	0,6	0,26
102	385	57,2	3200	8,15	0,75	2440	-	-	-	-	-	-	-
103	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
104	385	56,1	3350	8,35	0,81	2520	59	34,69	20	8,28	11,7	0,59	0,90
105	385	56,6	3200	8,30	0,68	2680	58	-	-	-	-	-	-
106	385	55,9	3700	8,07	0,77	2440	60	33,83	20,7	8,24	12,4	0,6	0,96
107	385	56	3800	8,29	0,76	2360	62	-	-	-	-	-	-
108	385	55	3500	8,00	0,69	2320	64,02	46	5,79	2,59	3,2	0,55	0,25
109	385	53	3350	8,02	0,72	2280	-	-	-	-	-	-	-
110	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
111	385	57,4	4000	8,05	0,7	2400	64	34,89	8,26	3,35	4,91	0,59	0,38
112	385	60	3000	7,91	0,71	2200	58	-	-	-	-	-	-
113	385	56,6	3500	8,18	0,7	2280	61,71	22,74	6,21	2,54	3,67	0,59	0,28
114	385	50	3450	8,05	0,68	2280	61,86	-	-	-	-	-	-
115	385	58,1	3350	8,16	0,65	2480	61	37,89	23,2	9,21	14	0,6	1,08
116	385	54,7	3150	8,01	0,64	2560	-	-	-	-	-	-	-
117	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
118	385	56,4	4000	7,92	0,68	2480	60	32,56	6,73	2,62	4,11	0,61	0,32
119	385	52,8	2250	7,95	0,69	2480	61	-	-	-	-	-	-
120	385	52,8	3100	7,96	0,8	2760	61,74	31,56	6,64	2,48	4,16	0,63	0,32
121	385	55,9	1750	7,20	0,61	2440	54,96	-	-	-	-	-	-
122	385	54,7	3700	7,97	0,75	2440	56	24,15	6,54	2,71	3,83	0,59	0,30
123	385	53	3150	8,26	0,72	2320	-	-	-	-	-	-	-
124	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Días Op.	Alim.	T °C	Biogás	Ph	α	Alc. Tot	%CH4	%RSV	STT	STF	STV	sv/st	C.O.
125	385	56,7	2800	7,60	0,55	2600	64,95	32,56	25,7	11,7	13,9	0,54	1,07
126	385	57,2	2900	7,68	0,6	2720	67,54	-	-	-	-	-	-
127	385	58,9	3200	7,72	0,64	2760	62	37,98	6,56	2,41	4,15	0,63	0,32
128	385	54,5	3500	7,75	0,65	2720	60,89	-	-	-	-	-	-
129	385	53,3	3300	7,94	0,73	2840	59	32,56	10,2	3,96	6,25	0,61	0,48
130	385	51	2000	7,01	0,24	3120	-	-	-	-	-	-	-
131	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
132	385	52	3900	7,84	0,72	2760	62,87	35,69	8,94	2,95	6	0,67	0,46
133	385	52	3800	7,96	0,43	5120	60,74	-	-	-	-	-	-
134	385	51	4000	7,94	0,81	2880	62,32	23,67	13,6	5,6	7,97	0,59	0,61
135	385	51	4000	7,94	0,73	3120	55,21	-	-	-	-	-	-
136	385	51	4000	7,98	0,74	3240	64,36	30,61	11,9	4,79	7,15	0,6	0,55
137	385	51	3800	8	0,77	3280	-	-	-	-	-	-	-
138	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
139	385	57,2	4000	7,96	0,63	3280	61,64	39,04	11,9	5,15	6,75	0,57	0,52
140	385	50	3350	7,94	0,63	3360	60,98	-	-	-	-	-	-
141	385	51	3950	8,21	0,65	3360	65,8	34,56	13,7	5,41	8,26	0,6	0,64
142	385	55,1	4000	7,98	0,7	3080	61	-	-	-	-	-	-
143	385	50	3700	8,03	0,75	3080	59	29,44	13,9	5,5	8,35	0,6	0,64
144	385	52	3750	7,99	0,76	3120	-	-	-	-	-	-	-
145	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
146	385	58,2	3850	7,99	0,79	3000	64	35,68	10,8	5,23	5,58	0,52	0,43
147	385	50	3400	7,94	0,75	3080	68,18	-	-	-	-	-	-
148	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
149	385	55,9	4000	7,96	0,76	2960	70,59	-	-	-	-	-	-
150	385	50,3	3600	8	0,78	3040	67,65	34,89	15,2	5,81	9,39	0,62	0,72
151	385	49,7	3400	7,97	0,79	3120	-	-	-	-	-	-	-
152	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
153	385	54,6	4000	7,89	0,76	3200	70,67	34,56	13,6	5,11	8,45	0,62	0,65
154	385	58,7	3350	7,86	0,77	3240	64,39	-	-	-	-	-	-
155	385	56,2	3800	7,76	0,78	3280	68,39	36,89	14,1	5,29	8,83	0,63	0,68
156	385	55,2	4000	7,8	0,74	3280	65	-	-	-	-	-	-
157	385	55,1	4000	7,84	0,77	3240	61	34,89	14,4	5,21	9,15	0,64	0,70
158	385	60	3800	7,7	0,79	3200	-	-	-	-	-	-	-
159	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
160	385	54,6	4000	7,80	0,77	3320	69,51	37,89	16,5	6,34	10,2	0,62	0,78
161	385	55,2	3800	7,78	0,74	3280	66,23	-	-	-	-	-	-
162	385	58	3600	7,68	0,75	3080	61	34,56	22,2	8,25	13,9	0,63	1,07
163	385	55,4	3600	7,79	0,7	3240	58	-	-	-	-	-	-
164	385	56,2	3400	7,82	0,73	3160	54,22	44,03	20	8,28	11,7	0,59	0,90
165	385	56,4	3700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
166	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Días Op.	Alim.	T °C	Biogás	Ph	α	Alc. Tot	%CH4	%RSV	STT	STF	STV	sv/st	C.O.
167	385	57,5	4000	8,20	0,75	3640	55,77	33,15	13,9	10,4	3,52	0,25	0,27
168	385	50,2	2600	8,11	0,65	3520	58	-	-	-	-	-	-
169	385	56,1	3200	8,1	0,67	3360	54	42,32	26,9	10,9	16	0,59	1,23
170	385	54,6	3000	8,05	0,64	3360	52	-	-	-	-	-	-
171	385	58,1	2800	8	0,62	3280	59	31,73	22,9	8,95	14	0,61	1,08
172	385	57,5	3600	8,2	0,72	3520	-	-	-	-	-	-	-
173	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
174	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
175	385	55,7	4000	8,40	0,74	3680	50,76	-	-	-	-	-	-
176	385	55,9	3800	7,9	0,68	3920	52	34,08	20,7	8,24	12,4	0,6	0,96
177	385	51,6	3200	7,86	0,78	3560	54	-	-	-	-	-	-
178	385	58,1	3600	7,8	0,68	3680	49	34,56	20,8	10,3	10,5	0,5	0,81
179	385	59,1	2900	7,81	0,69	3760	-	-	-	-	-	-	-
180	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
181	385	51,6	4000	8,34	0,68	4080	56	35,91	25,2	10,2	15	0,59	1,15
182	385	54,6	3800	7,89	0,7	3780	59	-	-	-	-	-	-
183	385	57,5	3200	7,97	0,74	3640	60	32,58	24,5	9,64	14,9	0,61	1,15
184	385	56,1	3200	7,85	0,7	3720	65,07	-	-	-	-	-	-
185	385	54,6	2800	7,84	0,67	3960	62,25	38,46	25,5	9,93	15,6	0,61	1,20
186	385	58,2	3300	8,83	0,63	4040	-	-	-	-	-	-	-
187	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
188	385	54,6	4000	7,76	0,65	4200	60	32,14	25,4	9,93	15,4	0,61	1,19
189	385	56,4	3800	7,74	0,67	3800	64,1	-	-	-	-	-	-
190	385	52,8	3600	7,68	0,66	3680	68,45	36,79	24,7	9,13	15,6	0,63	1,20
191	385	53,8	3850	7,55	0,66	3640	69,13	-	-	-	-	-	-
192	385	54,7	3800	7,61	0,66	3720	62,59	37,9	26,4	10,9	15,5	0,59	1,19
193	385	54,7	3600	7,59	0,65	3880	-	-	-	-	-	-	-
194	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
195	385	54,6	4000	7,84	0,68	3920	65,89	34,85	23,7	9,52	14,2	0,6	1,09
196	385	54,4	3500	8,13	0,69	3920	65,3	-	-	-	-	-	-
197	385	54,3	4000	8,1	0,69	4120	65,97	41,33	22,3	9,53	12,8	0,57	0,99
198	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
199	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
201	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
202	385	52,9	4000	7,88	0,66	4120	67,89	38,46	13,6	5,11	8,45	0,62	0,65
203	385	52,1	2800	7,89	0,64	4200	68,01	-	-	-	-	-	-
204	385	52,5	3400	7,86	0,66	4200	67,37	36,81	24,8	10,1	14,6	0,59	1,13
205	385	56,4	4000	7,86	0,64	4240	65,89	-	-	-	-	-	-
206	385	52	3250	7,58	0,66	4120	69,4	35,64	15,2	5,81	9,39	0,62	0,72
207	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
208	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Días Op.	Alim.	T °C	Biogás	Ph	α	Alc. Tot	%CH4	%RSV	STT	STF	STV	sv/st	C.O.
209	385	58,4	4000	7,50	0,66	3920	64	36,89	14,8	6,1	8,68	0,59	0,67
210	385	55,8	3600	7,56	0,66	3800	59	-	-	-	-	-	-
211	385	54,9	3200	7,51	0,66	3680	48,57	37,46	10,1	4,23	5,9	0,58	0,45
212	385	56,7	2000	7,58	0,7	3880	76,03	-	-	-	-	-	-
213	385	57,1	2600	7,6	0,86	3040	65	34,07	28	11,1	16,8	0,6	1,30
214	385	57,9	3600	7,56	0,66	3800	-	-	-	-	-	-	-
215	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
216	385	57,8	4000	7,50	0,66	3920	58,33	38,98	14,5	7,49	6,96	0,48	0,54
217	385	56,7	2500	7,42	0,71	3960	70,49	-	-	-	-	-	-
218	385	57,1	2900	7,63	0,71	3440	69,44	23,24	25,3	10,6	14,7	0,58	1,13
219	385	57,8	3200	7,96	0,68	3760	70,49	-	-	-	-	-	-
220	385	56,1	3000	7,98	0,68	3680	71,43	34,56	23,8	9,9	13,9	0,58	1,07
221	385	55,8	3500	7,92	0,72	3560	-	-	-	-	-	-	-
222	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
223	385	57,4	4000	7,56	0,63	4080	76,47	38,6	12,3	4,92	7,38	0,6	0,57
224	385	56,4	1750	7,60	0,7	3880	66,67	-	-	-	-	-	-
225	385	55,4	2050	7,44	0,65	3680	66,67	34,55	8,56	3,24	5,32	0,62	0,41
226	385	55,1	2950	7,45	0,7	3560	70,15	-	-	-	-	-	-
227	385	55,4	2700	7,48	0,8	3240	69,7	22,82	11,6	4,82	6,76	0,58	0,52
228	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
229	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
230	385	57,8	4000	7,40	0,71	3840	60	36,89	24,4	10,2	14,2	0,58	1,09
231	385	56,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
232	385	55,8	3200	7,3	0,71	3840	75	25,08	6,72	2,43	4,29	0,64	0,33
233	385	55,2	2250	7,6	0,69	4040	67,74	-	-	-	-	-	-
234	385	55,6	3500	7,45	0,68	3960	68,52	31,89	10,6	4,71	5,87	0,56	0,45
235	385	56,7	2200	7,46	0,7	3880	-	-	-	-	-	-	-
236	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
237	385	58,7	3800	7,8	0,68	3040	67,65	23,24	10,1	4,23	5,9	0,58	0,45
238	385	53,5	2350	7,82	0,69	3120	66,67	-	-	-	-	-	-
239	385	55	3200	7,81	0,74	3040	66,67	30,98	13,6	5,44	8,14	0,6	0,63
240	385	53,9	3450	7,82	0,7	3040	68,42	-	-	-	-	-	-
241	385	54	3350	7,74	0,62	3080	69,49	20,98	14,8	6,1	8,68	0,59	0,67
242	385	54,4	3800	7,86	0,67	3160	-	-	-	-	-	-	-
243	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
244	385	57,6	4000	7,7	0,59	2920	71,93	16,3	13,8	5,49	8,28	0,6	0,64
SE COMENZÓ A AGREGAR ADITIVO AL DIGESTOR													
245	385	50,8	3050	7,89	0,67	3240	67,86	-	-	-	-	-	-
246	385	50,6	2850	7,88	0,63	3320	68,52	39,92	8,56	3,24	5,32	0,62	0,41
247	385	51,8	3600	7,71	0,67	3280	69,23	-	-	-	-	-	-
248	385	52,3	3800	7,72	0,68	3240	68,85	45,89	15,2	5,81	9,39	0,62	0,72
249	385	53,3	3950	7,8	0,64	3320	-	-	-	-	-	-	-
250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Días Op.	Alim.	T °C	Biogás	Ph	α	Alc. Tot	%CH4	%RSV	STT	STF	STV	sv/st	C.O.
251	385	58,1	3600	7,73	0,59	3720	46,43	26,89	23,7	10,4	13,3	0,56	1,02
252	385	57,8	1700	7,72	0,58	3520	58,14	-	-	-	-	-	-
253	385	52,9	1400	7,8	0,56	3520	50	38,26	11,3	4,66	6,66	0,59	0,51
254	385	56,1	2000	7,61	0,56	2920	56	-	-	-	-	-	-
255	385	57,6	2500	7,33	0,5	3040	56	40,16	12,5	5,12	7,34	0,59	0,56
256	385	56,7	3000	7,2	0,51	2520	-	-	-	-	-	-	-
257	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
258	385	58,4	4000	7,6	0,57	3240	55	21,03	19,1	8,05	11,1	0,58	0,85
259	385	56,7	2800	7,58	0,7	2800	58	-	-	-	-	-	-
260	385	55,9	2400	7,58	0,7	2760	50	7,522	13,8	5,3	8,55	0,62	0,66
261	385	54,7	1700	7,56	0,62	2840	55,1	-	-	-	-	-	-
262	385	56,1	2300	7,6	0,64	2660	56	46,89	6,56	2,41	4,15	0,63	0,32
263	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
264	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
265	385	56,4	4000	8,12	0,77	2920	75,81	35,99	10,9	4,48	6,41	0,59	0,49
266	385	50,9	3150	8,07	0,72	2960	70,97	-	-	-	-	-	-
267	385	50,8	3200	7,81	0,79	2880	78,57	37,62	7,24	3,02	4,22	0,58	0,32
268	385	52,8	3800	7,9	0,78	2960	70,49	-	-	-	-	-	-
269	385	51,5	3900	7,89	0,77	2920	68	22,74	22,2	8,2	14	0,63	1,08
270	385	52	2400	7,86	0,75	3000	-	-	-	-	-	-	-
271	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
272	385	58,2	2550	7,76	0,66	4000	73,33	46,4	7,61	2,63	4,98	0,65	0,38
273	385	58	3500	8,05	0,66	3800	64,81	-	-	-	-	-	-
274	385	57	3700	8,08	0,65	4040	66,04	40,44	25,3	10,9	14,4	0,57	1,11
275	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
276	385	55	3800	8,17	0,75	3960	70,15	46,89	21	9,03	11,9	0,57	0,92
277	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
278	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
279	385	55	4000	8,34	0,78	3840	78,26	39,63	21	9,02	12	0,57	0,93
280	385	57,4	1950	8,30	0,76	3480	75	-	-	-	-	-	-
281	385	56,4	3100	8,05	0,74	3880	68,85	39,89	19,3	8,24	11,1	0,57	0,85
282	385	50	3600	8,09	0,77	3800	77,78	-	-	-	-	-	-
283	385	56,2	3900	8,28	0,81	3600	80,56	38,82	11,4	4,87	6,55	0,57	0,50
284	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
285	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
286	385	57,4	4000	8,28	0,78	3840	69	40,59	11,8	4,92	6,85	0,58	0,53
287	385	50	2500	8,06	0,77	3440	71,43	-	-	-	-	-	-
288	385	51	3100	8,04	0,76	3480	68,09	42,8	9,2	3,79	5,42	0,59	0,42
289	385	52,3	3200	8,21	0,8	3720	68,25	-	-	-	-	-	-
290	385	55	3050	8,19	0,83	3560	70,37	55,63	10,8	4,53	6,23	0,58	0,48
291	385	53,5	3650	8,04	0,82	3640	-	-	-	-	-	-	-
292	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Días Op.	Alim.	T °C	Biogás	Ph	α	Alc. Tot	%CH4	%RSV	STT	STF	STV	sv/st	C.O.
293	385	53	4000	8,12	0,84	3640	71,93	53,84	11,3	4,66	6,66	0,59	0,51
294	385	56	2900	8,12	0,8	3680	74,47	-	-	-	-	-	-
295	385	55,3	3100	8,26	0,79	3640	69,09	56,6	9,54	4,07	5,47	0,57	0,42
296	385	57	3300	8,33	0,78	3680	66,67	-	-	-	-	-	-
297	385	55,1	3200	8,39	0,79	3680	67,14	54,55	10,1	4,05	6,04	0,6	0,46
298	385	56,3	3700	8,27	0,8	3880	-	-	-	-	-	-	-
299	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
300	385	56	4000	8,22	0,78	4000	69,57	56,38	12,5	5,12	7,34	0,59	0,56
301	385	55	2800	8,31	0,79	3920	67,65	-	-	-	-	-	-
302	385	56,2	3400	8,3	0,79	3800	66,18	59,17	10,2	4,4	5,8	0,57	0,45
303	385	56,7	3400	8,45	0,78	3880	64	-	-	-	-	-	-
304	300	56	3800	8,40	0,8	3920	70,77	40,59	25,3	10,9	14,4	0,57	1,108



RESULTADOS EXPERIMENTALES REACTOR T2 (lodo fisicoquímico)

RESULTADOS Y CÁLCULOS EXPERIMENTALES PARA EL DIGESTOR (TERMOFILICO T2)													
Días Op.	Alim.	T °C	Biogás	Ph	α	Alc. Tot	%CH ₄	%RSV	STT	STF	STV	sv/st	C. O. (g/L*dia)
1	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	250	59,1	200	6,50	0,34	1560	41	12	30,4	16,2	14,2	0,47	0,71
3	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	250	61,3	220	6,50	0,33	1520	38	16	27,5	14,68	12,82	0,47	0,641
10	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	250	60,9	280	6,66	0,35	2040	42,86	19	24,6	14,96	9,64	0,39	0,482
17	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	250	58,1	260	6,20	0,32	1920	32	18	35,444	22,304	13,14	0,37	0,657
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	250	58,2	290	6,50	0,33	2800	36	18	27,4	15,68	11,72	0,43	0,586
32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	250	54,6	220	6,50	0,34	2360	38	14	24,9	14,68	10,22	0,41	0,511
39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Días Op.	Alim.	T °C	Biogás	Ph	α	Alc. Tot	%CH4	%RSV	STT	STF	STV	sv/st	C.O.(g/L*dia)
41	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
43	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	250	55,6	280	6,50	0,32	2460	41	17	26,4	16,4	10	0,38	0,5
45	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
48	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	250	54,3	240	6,70	0,36	2680	43	20	36,059	22,3	13,759	0,38	0,68795
52	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	250	54,9	320	6,90	0,29	2340	45	19	38,56	19,45	19,11	-	0,9555
56	250	55,8	300	7,02	0,34	2460	38	-	-	-	-	-	-
57	250	55,4	280	7,22	0,37	3000	40	36	44,052	25,864	18,188	0,41	0,9094
58	250	51,6	290	6,88	0,27	3120	41	-	-	-	-	-	-
59	250	57,4	300	7,08	0,37	3040	39	29	32,374	19,472	12,902	0,4	0,6451
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	250	57,4	280	6,88	0,26	2840	34	29,416	24,81	13,964	10,846	0,44	0,5423
63	250	56,1	300	7,21	0,31	2460	33	-	-	-	-	-	-
64	250	53,6	290	7,10	0,34	2960	34	21,722	24,008	12,898	11,11	0,46	0,5555
65	250	57,9	280	7,18	0,32	2600	31	-	-	-	-	-	-
66	250	58,4	260	7,28	0,31	2480	30	26,96	27,038	14,99	12,048	0,45	0,6024
67	250	61,6	280	7,09	0,33	-	-	-	-	-	-	-	-
68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
69	250	54,6	280	6,34	0,22	2600	38	34	28,4	16,54	11,86	0,42	0,593
70	250	52,4	260	6,84	0,36	2260	34	-	-	-	-	-	-
71	250	52,2	270	7,01	0,35	2520	35	29	19,894	16,954	2,94	0,15	0,147
72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
76	250	55,8	270	6,45	0,25	2340	32	30,65	26,9	15,89	11,01	0,41	0,5505
77	250	56,1	280	7,06	0,32	1480	30	-	-	-	-	-	-
78	250	56,8	250	7,14	0,27	2360	28	17,195	34,65	18,13	16,52	0,48	0,826
79	250	57,2	200	6,99	0,24	2880	29	-	-	-	-	-	-
80	250	57	280	6,23	0,23	2280	36	17,89	38,594	18,652	19,942	0,52	0,9971
81	250	57,1	260	6,69	0,24	2520	-	-	-	-	-	-	-
82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
83	250	57,4	260	6,75	0,31	1800	29	27,886	27,018	15,064	11,954	0,44	0,5977
84	250	58,4	280	6,90	0,27	2290	28	-	-	-	-	-	-



Días Op.	Alim.	T °C	Biogás	Ph	α	Alc. Tot	%CH4	%RSV	STT	STF	STV	sv/st	C.O.(g/L*dia)
85	250	55,8	260	6,74	0,24	2200	24	18,02	28,65	16,48	12,17	0,42	0,6085
86	250	54,6	280	6,56	0,28	2320	30	-	-	-	-	-	-
87	250	56,2	300	6,59	0,25	2560	31	13,939	22,784	11,702	11,082	0,49	0,5541
88	250	55,4	280	6,67	0,23	2200	-	-	-	-	-	-	-
89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	250	55,6	300	6,54	0,22	2120	32	17,69	12,968	6,456	6,512	0,5	0,3256
91	250	55,3	260	6,83	0,25	2240	25,33	-	-	-	-	-	-
92	250	53,8	260	6,81	0,23	2600	30	22,548	29,218	15,774	13,444	0,46	0,6722
93	250	54,1	220	6,74	0,27	2840	27,26	-	-	-	-	-	-
94	250	54,9	260	6,77	0,28	2400	31,42	19,189	24,53	12,984	11,546	0,47	0,5773
95	250	56,2	280	7,1	0,29	2720	-	-	-	-	-	-	-
96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
97	250	56,1	300	7,12	0,21	2200	32	8,9418	35,836	17,9	17,936	0,5	0,8968
98	250	54,2	280	6,57	0,22	2720	28	-	-	-	-	-	-
99	250	55,9	280	7,02	0,26	2460	24	9,9807	34,226	17,194	17,032	0,5	0,8516
100	250	54,6	300	6,55	0,21	2880	30	-	-	-	-	-	-
101	250	55,1	320	6,58	0,24	2480	34,21	15,489	34,832	18,048	16,784	0,48	0,8392
102	250	55,2	300	6,47	0,26	2720	-	-	-	-	-	-	-
103	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
104	250	55,8	300	6,52	0,22	2680	32	17,86	29,45	17,68	11,77	0,4	0,5885
105	250	56,1	280	6,58	0,23	2480	30	-	-	-	-	-	-
106	250	55,9	300	6,62	0,21	2460	31	16,98	24,6	16,49	8,11	0,33	0,4055
107	250	54,8	260	7,12	0,26	2720	29	-	-	-	-	-	-
108	250	55,1	240	6,5	0,22	2600	26,4	12,783	35,346	18,036	17,31	0,49	0,8655
109	250	55,1	260	6,72	0,21	-	-	-	-	-	-	-	-
110	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
111	250	56,1	280	6,53	0,24	2680	28	11,487	34,632	17,544	17,088	0,49	0,8544
CAMBIO DE TRH A 25 DIAS													
112	200	55,2	300	6,51	0,24	2520	29	-	-	-	-	-	-
113	200	54,9	280	7,12	0,34	2500	35,54	18,06	38,286	18,978	19,308	0,5	0,77232
114	200	54,8	260	6,8	0,25	2560	37,05	-	-	-	-	-	-
115	200	54,9	280	6,87	0,26	2880	40	17,02	33,674	32,346	1,328	0,04	0,05312
116	200	55,8	310	6,82	0,27	2680	-	-	-	-	-	-	-
117	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
118	200	55,1	300	6,88	0,25	2840	45	21,992	40,16	21,908	18,252	0,45	0,73008
119	200	54,6	340	6,81	0,25	2680	40	-	-	-	-	-	-
120	200	55,3	320	7,12	0,36	2960	39	18,06	34,785	26,988	7,797	0,22	0,31188
121	200	54,6	340	6,81	0,25	2460	36,86	-	-	-	-	-	-
122	200	55,3	300	6,95	0,27	2480	37,97	13,026	35,854	18,588	17,266	0,48	0,69064
123	200	55,3	320	6,99	0,25	2920	-	-	-	-	-	-	-
124	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Días Op.	Alim.	T °C	Biogás	Ph	α	Alc. Tot	%CH4	%RSV	STT	STF	STV	sv/St	C.O.(g/L*dia)
125	200	56,1	400	7,21	0,34	3000	51	10,855	37,55	19,236	18,314	0,49	0,73256
126	200	54,7	340	7,01	0,25	2480	49	-	-	-	-	-	-
127	200	54,9	380	7,07	0,26	2920	56	24,717	32,624	18,084	14,54	0,45	0,5816
128	200	54,8	320	7	0,26	3040	41,51	-	-	-	-	-	-
129	200	54,8	380	7,05	0,31	3120	58	18,06	33,574	16,984	16,59	0,49	0,6636
130	200	54	340	7,23	0,32	3800	-	-	-	-	-	-	-
131	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
132	200	55,2	300	7,23	0,34	2390	59	14,26	42,034	20,464	21,57	0,51	0,8628
133	200	54,7	310	7,12	0,36	2840	54	-	-	-	-	-	-
134	200	54,9	300	7,36	0,29	2920	39,07	8,8406	33,168	16,806	16,362	0,49	0,65448
135	200	54,8	320	7,01	0,28	2460	58	-	-	-	-	-	-
136	200	54,8	340	7	0,32	2960	62	12	31,2	16,196	15,004	0,48	0,60016
137	200	54	320	6,98	0,28	2680	-	-	-	-	-	-	-
138	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
139	200	55,8	320	7,12	0,34	2560	65	17,56	30,753	15,488	15,265	0,5	0,6106
140	200	54,9	340	6,80	0,28	2680	64	-	-	-	-	-	-
141	200	54,8	300	7,52	0,33	2920	68	14,29	30,282	15,036	15,246	0,5	0,60984
142	200	53,8	320	7,22	0,32	2600	62	-	-	-	-	-	-
143	200	54,8	260	7,36	0,34	2480	64	10	30,747	15,292	15,455	0,5	0,6182
144	200	55,1	280	7,25	0,34	2680	-	-	-	-	-	-	-
145	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
146	200	55,7	300	6,98	0,3	2640	64	17,46	29,222	14,366	14,856	0,51	0,59424
147	200	55,3	340	7,25	0,32	2680	47,62	-	-	-	-	-	-
148	200	54,6	360	7,02	0,33	2490	50	18,56	31,78	17,68	14,1	0,44	0,564
149	200	54,8	360	7,27	0,34	2480	50,79	-	-	-	-	-	-
150	200	55,1	300	7,32	0,31	2560	53,85	17	34,18	17,138	17,042	0,5	0,68168
151	200	55,4	310	7,28	0,32	2720	-	-	-	-	-	-	-
152	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
153	200	55,2	320	6,80	0,27	2680	60	14,69	28,778	13,484	15,294	0,53	0,61176
154	200	55,8	280	7,36	0,28	2500	62,24	-	-	-	-	-	-
155	200	56,3	280	7,22	0,32	2720	57	14,865	29,804	13,802	16,002	0,54	0,64008
156	200	56,5	300	7,2	0,32	2600	56	-	-	-	-	-	-
157	200	54,8	380	7,31	0,32	2760	59,77	22	29,83	13,832	15,998	0,54	0,63992
158	200	56,2	320	7,24	0,34	2860	-	-	-	-	-	-	-
159	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
160	200	56,5	370	6,90	0,28	2760	64,15	14,987	34,908	16,28	18,628	0,53	0,74512
161	200	55,7	360	7,64	0,36	2260	62,92	-	-	-	-	-	-
162	200	56,5	300	7,27	0,34	2320	65	15,65	29,494	14,334	15,16	0,51	0,6064
163	200	54,8	360	7,27	0,38	1920	67	-	-	-	-	-	-
164	200	55,9	320	7,22	0,37	2090	57,28	27,13	35,978	21,1834	14,795	0,41	0,591784
165	200	56,7	340	6,87	0,29	2080	-	-	-	-	-	-	-
166	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Días Op.	Alim.	T °C	Biogas	Ph	α	Alc. Tot	%CH4	%RSV	STT	STF	STV	sv/St	C.O.(q/L*día)
167	200	55,2	320	7,03	0,3	2880	53,79	62,911	22,574	16,654	5,92	0,26	0,2368
168	200	53,5	360	7,53	0,31	2500	57,09	-	-	-	-	-	-
169	200	54,3	360	7,61	0,3	2680	68	16,89	28,632	13,422	15,21	0,53	0,6084
170	200	55,8	420	7,26	0,32	3000	69	-	-	-	-	-	-
171	200	57,6	400	7,45	0,36	3240	58,58	16,48	27,752	13,02	14,732	0,53	0,58928
172	200	55,3	360	7,61	0,33	2880	-	-	-	-	-	-	-
173	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
174	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
175	200	56,7	300	7,45	0,33	3000	64,18	-	-	-	-	-	-
176	200	57,5	280	7,37	0,32	2920	63,01	16,89	29,966	14,298	15,668	0,52	0,62672
177	200	57,9	320	7,02	0,29	2800	66	-	-	-	-	-	-
178	200	57,8	280	7,39	0,33	2320	62,33	18,026	29,31	14,274	15,036	0,51	0,60144
179	200	55,6	360	7,41	0,33	3120	-	-	-	-	-	-	-
180	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
181	200	56,6	300	7,01	0,38	3040	67	19	28,956	13,982	14,974	0,52	0,59896
182	200	57,3	260	7,29	0,3	2840	59,64	-	-	-	-	-	-
183	200	56,8	280	7,33	0,3	2680	61,81	17,89	30,48	15,468	15,012	0,49	0,60048
184	200	56,7	300	7,23	0,28	2600	58,74	-	-	-	-	-	-
185	200	56,8	320	7,23	0,29	2920	61	18,065	29,294	14,2	15,094	0,52	0,60376
186	200	56,1	340	7,17	0,28	2840	-	-	-	-	-	-	-
187	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
188	200	56,3	330	7,22	0,29	2880	68	18,065	30,404	14,394	16,01	0,53	0,6404
189	200	56,4	300	7,19	0,32	2460	65,12	-	-	-	-	-	-
190	200	55,3	320	7,21	0,3	3040	67	17,46	33,006	16,09	16,916	0,51	0,67664
191	200	56,5	240	7,19	0,29	2880	66,42	-	-	-	-	-	-
192	200	55,9	330	7,08	0,28	2490	65,86	23,818	36,302	20,982	15,32	0,42	0,6128
193	200	55,8	340	7,21	0,28	2960	-	-	-	-	-	-	-
194	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
195	200	55,2	310	6,90	0,33	2960	68	17,456	30,538	15,18	15,358	0,5	0,61432
196	200	55,5	320	7,07	0,31	2480	64,74	-	-	-	-	-	-
197	200	54,9	240	7,05	0,29	2720	65,66	17,137	27,792	14,808	12,984	0,47	0,51936
198	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
199	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
201	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
202	200	55,7	340	6,80	0,34	2680	67,88	17,56	29,12	14,116	15,004	0,52	0,60016
203	200	54,5	310	7,32	0,29	2600	67	-	-	-	-	-	-
204	200	55,2	320	7,06	0,28	2720	68	11,068	31,274	16,112	15,162	0,48	0,60648
205	200	55,1	400	6,75	0,29	2600	66	-	-	-	-	-	-
206	200	54,6	300	6,78	0,28	2560	67	16,48	27,994	13,28	14,714	0,53	0,58856
207	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
208	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Días Op.	Alim.	T °C	Biogas	Ph	α	Alc. Tot	%CH4	%RSV	STT	STF	STV	sv/St	C.O.(q/L*día)
209	200	55,6	330	6,99	0,35	2800	68	16,156	34,74	17,544	17,196	0,49	0,68784
210	200	55,4	320	7,24	0,29	2720	59	-	-	-	-	-	-
211	200	55,3	340	7,31	0,31	2490	65,06	16,498	29,78	15,68	14,1	0,47	0,564
212	200	54,9	400	7,19	0,3	2840	64,42	-	-	-	-	-	-
213	200	54,6	400	6,89	0,28	2960	58	14,465	32,434	15,782	16,652	0,51	0,66608
214	200	55,4	380	7,03	0,32	2880	-	-	-	-	-	-	-
215	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
216	200	55,4	340	6,82	0,36	2800	69,33	16,25	33,14	16,102	17,038	0,51	0,68152
217	200	55,3	340	6,92	0,28	2840	65,91	-	-	-	-	-	-
218	200	55,5	440	7,05	0,32	2530	59	9,0996	32,796	16,21	16,586	0,51	0,66344
219	200	54,9	400	7,26	0,32	2720	64,29	-	-	-	-	-	-
220	200	54,8	300	7,17	0,29	3120	63,41	20,693	36,23	19,142	17,088	0,47	0,68352
221	200	54,8	340	7,09	0,29	3040	-	-	-	-	-	-	-
222	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SE COMENZÓ A AGREGAR ADITIVO AL DIGESTOR													
223	200	56,2	340	7,13	0,31	2860	68,18	20,941	12,558	5,02	7,538	0,6	0,30152
224	200	56,5	360	7,04	0,35	3120	64	-	-	-	-	-	-
225	200	55,7	360	7,17	0,27	2840	65,96	16,053	34,188	17,578	16,61	0,49	0,6644
226	200	56,8	320	7,13	0,29	3040	64,81	-	-	-	-	-	-
227	200	56,8	220	7,12	0,3	3080	63,41	11,602	31,27	15,674	15,596	0,5	0,62384
228	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
229	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
230	200	55,9	380	7,20	0,4	3040	65,38	12,725	31,54	14,924	16,616	0,53	0,66464
231	200	54,9	360	7,01	0,39	2880	58	-	-	-	-	-	-
232	200	56,1	400	6,98	0,27	3160	68	16,56	32,174	15,184	16,99	0,53	0,6796
233	200	55,5	460	7,04	0,34	3080	64,71	-	-	-	-	-	-
234	200	54,8	440	7,12	0,35	3160	66	15,656	31,636	15,374	16,262	0,51	0,65048
235	200	55,3	420	7,02	0,32	3120	-	-	-	-	-	-	-
236	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
237	200	55,3	400	7,23	0,45	3160	69,09	10,274	31,834	15,838	15,996	0,5	0,63984
238	200	55,9	420	7,46	0,44	2880	61	-	-	-	-	-	-
239	200	56,8	380	7,17	0,32	2860	59	13,46	31,81	15,102	16,708	0,53	0,66832
240	200	56,1	380	7,13	0,29	2800	62	-	-	-	-	-	-
241	200	56,2	380	7,12	0,29	2720	67,8	10,781	36,156	19,596	16,56	0,46	0,6624
242	200	55,2	360	7,15	0,29	2920	-	-	-	-	-	-	-
243	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
244	200	56,1	380	7,36	0,46	2560	59	13,465	31,504	15,59	15,914	0,51	0,63656
245	200	55,9	400	7,24	0,33	2670	66,07	-	-	-	-	-	-
246	200	56,1	380	7,21	0,3	2960	62	15,216	32,198	16,242	15,956	0,5	0,63824
247	200	56,1	420	7,05	0,33	2760	64,58	-	-	-	-	-	-
248	200	56,3	380	7,48	0,47	2880	59	14,565	28,98	16,78	12,2	0,42	0,488



Días Op.	Alim.	T °C	Biogas	Ph	α	Alc. Tot	%CH4	%RSV	STT	STF	STV	sv/st	C.O.(g/L*dia)
249	200	55,9	460	7,64	0,48	2800	-	-	-	-	-	-	-
250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
251	200	56,1	400	7,27	0,35	2880	59	13,46	31,364	15,882	15,482	0,49	0,61928
252	200	56,2	460	7,68	0,34	2960	60	-	-	-	-	-	-
253	200	56,2	480	7,51	0,39	2490	58	12,45	32,06	16,546	15,514	0,48	0,62056
254	200	56,2	440	7,5	0,39	2680	56	-	-	-	-	-	-
255	200	55,3	460	7,38	0,41	2840	55	12,46	29,78	16,45	13,33	0,45	0,5332
256	200	55,8	440	7,46	0,36	2640	-	-	-	-	-	-	-
257	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
258	200	56,4	400	7,15	0,37	3000	60	16,46	35,382	18,864	16,518	0,47	0,66072
259	200	55,9	380	7,26	0,43	2160	56	-	-	-	-	-	-
260	200	56	360	7,4	0,39	3080	61,36	29,133	39,438	23,598	15,84	0,4	0,6336
261	200	58,7	380	7,33	0,37	2680	57	-	-	-	-	-	-
262	200	59,2	360	7,55	0,34	2800	55	18,465	29,4	15,89	13,51	0,46	0,5404
263	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
264	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
265	200	59,2	400	7,48	0,32	2880	62,26	21	31,488	16,52	14,968	0,48	0,59872
266	200	59,8	420	7,52	0,3	2860	69,35	-	-	-	-	-	-
267	200	59,8	380	7,56	0,32	3040	58	16,16	31,26	16,468	14,792	0,47	0,59168
268	200	55,4	380	7,35	0,41	2920	56	-	-	-	-	-	-
269	200	56	360	7,48	0,41	2840	54	12,576	30,536	16,704	13,832	0,45	0,55328
270	200	56	360	7,5	0,42	2880	-	-	-	-	-	-	-
271	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
272	200	54	380	7,56	0,44	2640	55	13,255	30,674	16,282	14,392	0,47	0,57568
273	200	52	380	7,61	0,4	2920	56	-	-	-	-	-	-
274	200	54	400	7,54	0,42	2960	66,67	12,55	31,292	16,512	14,78	0,47	0,5912
275	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
276	200	53	400	7,73	0,45	2680	66,1	-	30,628	16,344	14,284	0,47	0,57136
277	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
278	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
279	200	49	380	7,55	0,37	3480	58	12,56	28,98	16,87	12,11	0,42	0,4844
280	200	54	380	7,61	0,43	2720	54	-	-	-	-	-	-
281	200	53	440	7,66	0,45	2960	66,67	13	30,622	15,742	14,88	0,49	0,5952
282	200	53	460	7,5	0,42	2600	59	-	-	-	-	-	-
283	200	52	460	7,55	0,44	2490	54	12,265	29,878	15,634	14,244	0,48	0,56976
284	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
285	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
286	200	53	460	7,45	0,46	2640	56	14,56	29,708	15,576	14,132	0,48	0,56528
287	200	54	460	7,52	0,43	3160	54	-	-	-	-	-	-
288	200	55	440	7,53	0,48	2880	60	16,265	30,092	15,75	14,342	0,48	0,57368
289	200	56	360	7,47	0,47	2680	57,14	-	-	-	-	-	-
290	200	53,7	340	7,62	0,48	2640	59,38	14,16	29,792	15,602	14,19	0,48	0,5676



Días Op.	Alim.	T °C	Biogas	Ph	α	Alc. Tot	%CH4	%RSV	STT	STF	STV	sv/st	C. O. (g/L*dia)
291	200	56	420	7,39	0,43	2800	-	-	-	-	-	-	-
292	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
293	200	55	400	7,54	0,44	2720	59	12,35	29,35	15,376	13,974	0,48	0,55896
294	200	55	460	7,46	0,44	2800	58,33	-	-	-	-	-	-
295	200	55	440	7,68	0,45	2760	59,09	13,55	28,976	15,508	13,468	0,46	0,53872
296	200	56	460	7,61	0,44	2840	48,48	-	-	-	-	-	-
297	200	56	420	7,47	0,43	2760	43,24	12,35	29,402	15,272	14,13	0,48	0,5652
298	200	55	360	7,63	0,44	2640	-	-	-	-	-	-	-
299	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
300	200	55	400	7,38	0,42	2680	48,39	9,6268	29,546	16,006	13,54	0,46	0,5416
301	200	53	480	7,40	0,43	2720	57	-	-	-	-	-	-
302	200	55	480	7,48	0,43	2800	56	14,096	29,882	15,71	14,172	0,47	0,56688
303	200	56	440	7,68	0,46	2680	58	-	-	-	-	-	-
304	200	55	360	7,47	0,42	2840	44,83	12,35	28,98	16,78	12,2	7,39	0,488



LISTA DE ABREVIATURAS

AGV's	Ácidos Grasos Volátiles
CBPA	Coordinación de Bioprocesos Ambientales
CNA	Comisión Nacional del Agua
DQO	Demanda Química de Oxígeno
NMP	Número Más Probable
OHPA	Bacterias acetogénicas productoras obligadas de hidrogeno, (por sus siglas en inglés)
SM	Standard Methods (APHA, AWWA, APCF, 1995)
%RSV	Porcentaje de Remoción de Sólidos Volátiles
STT	Sólidos Totales Totales
STV	Sólidos Totales Volátiles
STF	Sólidos Totales Fijos
TPA	Tratamiento Primario Avanzado
TRH	Tiempo de Residencia Hidráulico
USEPA	Environmental Protection Agency of the United Status of America