



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Ambiental

**ESTABILIDAD DE UN DIGESTOR ANAEROBIO
TERMÓFILO EN CONDICIONES NO HABITUALES
DE OPERACIÓN**

Autor:

Morales Chuquimantari, Edson Javier

Tutor:

Fernandez Polanco, Fernando

**Ingeniería Química y Tecnología del Medio
Ambiente**

Valladolid, Julio 2015.

D.Sc. FERNANDO FERNANDEZ POLANCO, profesor/a del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Valladolid, INFORMA:

Que D. EDSON JAVIER MORALES CHUQUIMANTARI ha realizado bajo nuestra dirección el Trabajo Fin de Master titulado: **Estabilidad de un Digestor Anaerobio Termófilo en condiciones no habituales de operación**

Valladolid, 13 de JULIO de 2015

D.Sc. Fernando Fernandez Polanco

Reunido el Tribunal designado por el Comité Académico del Master de Ingeniería Ambiental, para la evaluación de Trabajos Fin de Master, y después de estudiar la memoria y atender a la defensa del trabajo “**Estabilidad de un Digestor Anaerobio Termófilo en condiciones no habituales de operación**”, presentado por el alumno D. Edson Javier Morales Chuquimantari, decidió otorgarle la calificación de

_____.

Valladolid, 13 de Julio de 2015

El Presidente

El Secretario

Fdo.:

Fdo.:

Vocal

Fdo.:

Estabilidad de un Digestor Anaerobio Termófilo en condiciones no habituales de operación

E Morales.
Universidad de Valladolid
E-mail address: edson.morales.ch@gmail.com

Abstract

This study investigate the stability of a thermophilic anaerobic digester (55 ° C) in unusual operating conditions treating sludge produced in a wastewater treatment plant, with an average composition : COD 30,000 mg / l; SV 20 g / l; pH 8.0; N-NH₃ 272 mg / l; N-NKT 1811 mg / kg. The aim was to transform a thermophilic anaerobic methanogenic reactor into an acidogenic one. It was proposed to work by modifying the hydraulic retention time (progressive reduction from 23 to 4.5 days) by increasing the feed flow rate, accompanied with the subsequent raise in the values of organic loading rate. The results showed that these increases in the reactor loading were tolerated and the methanogenic behavior cannot be transformed into acidogenic, as indicated by average methane productivity around 5.19 l / d and SV removal of 37%.

Palabras Claves Digestión Anaerobia, Reactor Termófilo, Ácidos Grasos Volátiles

Introducción

Se entiende por residuo a todo material que es destinado al abandono por su productor o poseedor, pudiendo resultar de un proceso de fabricación, transformación, utilización, consumo o limpieza.

En la Actualidad existe una tendencia de desarrollo orientada hacia el ciclo urbano del agua para ser auto sostenible y que minimice el requerimiento de energía y la aportación de residuos al medio natural (Benito 2011). Por ello la importancia de regresar el agua que se toma de la naturaleza en una condición "aceptable" para que siga su camino dentro del gran ciclo hidrológico (Lahera 2010). Resulta paradójico que el intento de una sociedad industrializada por mejorar la relación con el medio ambiente a través de la depuración de las aguas que ella contamina, termine generando un nuevo problema en forma de lodos.

La adopción de una determinada política ambiental se ve reflejada en la legislación, que se encarga de establecer el tipo de actuaciones destinadas a solventar la problemática dentro de este marco se contó con la Decisión 2000/532/CE en la cual

proporciona una lista de residuos de conformidad con el apartado a) del artículo 1 de la Directiva 75/442/CEE sobre residuos y con el apartado 4 del artículo 1 de la Directiva 91/689/CEE sobre residuos peligrosos y se le asigna el código 190805 con la denominación de "Lodos del tratamiento de aguas residuales urbanas".

En España los lodos que se producen en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), tienen consideración de residuo y por tanto les aplica la Ley 22/2011 de Residuos y Suelos Contaminados y las disposiciones de desarrollo de la misma, además de la normativa específica (RD 1310/1990) que regula la aplicación de los lodos a los suelos agrícolas y que incorpora la Directiva 86/278/CEE relativa a la protección del medio ambiente y, en particular de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura.

El tratamiento anaerobio por Metanogénesis se utiliza mucho en la estabilización de lodos de aguas residuales y residuos sólidos urbanos (McCarty 2001). En la tabla 1 muestra las ventajas e inconvenientes según McCarty.

Tabla 1: Ventajas e inconvenientes del tratamiento anaerobio

Ventajas	Inconvenientes
Baja producción de residuos sólidos biológicos.	Crecimiento lento de microorganismos.
Bajo requerimiento de nutrientes.	Desprendimiento de olor.
El metano es un producto final muy útil.	Requerimientos más elevados de regulador para controlar el pH.
Generalmente, genera energía.	Escasa eficiencia de eliminación con residuos sólidos.
Es posible una carga orgánica elevada.	

La digestión anaerobia (DA) es una tecnología robusta y eficiente para la valorización energética de los distintos tipos de biomasa (incluidos los residuos orgánicos y lodos de depuradora), y se espera que juegue un papel crucial en el futuro de la producción de energía renovable (Lauwers et al. 2013). La digestión anaeróbica procede de una serie de cuatro pasos metabólicos: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Un número diverso de bacterias participan en los tres primeros pasos y en la formación de metano (por arqueas metanogénicas) que deriva principalmente de acetato e hidrógeno (el CO₂ viene a ser un subproducto). La digestión anaerobia de lodo residual sigue siendo limitada, debido a la hidrólisis, considerado el paso limitante de la velocidad de todo el proceso y con el fin de aumentar o acelerar las tasas de biodegradación, se ha probado diversos tratamientos previos de hidrólisis térmica, enzimática, química o mecánica (Gagliano et al. 2015).

En los tratamientos de doble fase (termófilo/mesófilo), la etapa de la acidogénesis termofílica también puede ofrecer beneficios operacionales, tales como aumento de las tasas de hidrólisis, producción eficiente de Ácidos Grasos Volátiles (AGVs) y una disminución en el volumen del digestor (como resultado de la mayor tasa de acidogénesis en comparación con que a temperaturas mesófilas). Hay poca información sobre los procesos anaerobios de doble fase, se lo recopilado menciona que la etapa acidogénica termofílica es optimizada para alcanzar la tasa máxima de producción de ácido acético, el cual posteriormente se conecta a una reactor anaerobio metanogénico mesófilos para terminar el tratamiento. Aun es controvertido si la acidificación completa o parcial mejoraría la eficiencia global de la digestión anaerobia, así como la forma en que se debe lograr la acidificación

parcial. Sin embargo, los procesos de doble fase que acidifican completamente aguas residuales (el influente) pueden implicar considerablemente mayor construcción y costos operativos debido a la necesidad de un reactor adicional para la acidificación completa de los compuestos orgánicos influentes (Woong et al. 2012).

Sin embargo, casi todos estos estudios se han centrado acidogénesis en el rango mesófilo de temperatura, mientras que la información de los acidogénesis en rangos de temperatura termófilos es muy limitado (Han-Qing Yu et al. 2002).

Este trabajo tiene como objetivo estudiar la influencia de la carga orgánica a diferente TRH (modificando los tiempos de retención hidráulico) sobre el comportamiento de un Reactor Anaerobio Termófilo Metanogénico, tratando de transformarlo a un Reactor Acidogénico; todo esto para brindar un tratamiento para un lodo mixto (mezcla de lodo de un decantador primario y secundario) procedente de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de Valladolid – España.

Materiales y métodos

Lodo a tratar

Fue proporcionado por la Estación Depuradora de Aguas Residuales de Valladolid (EDAR). El lodo con el que se trabajo fue colectado de la etapa de espesamiento donde se centrifugaba la mezcla del fango del decantador primario y el exceso del decantador secundario, a esta mezcla se le denominó lodo mixto espesado.

Reactor

Para el tratamiento se utilizó con un reactor termófilo de 50 litros de volumen a una temperatura de 55C° (± 2), dicho reactor ya se encontraba en funcionamiento por lo que no fue necesario inocularlo y arrancarlo.

El sistema de tratamiento estaba compuesto con una alimentación (tanque con homogenización mecánica) que estaba conectada a una bomba en la cual se regulaba el caudal de alimentación, salida de tratamiento (tanque de almacenamiento), un compresor que tenía la función de proporcionar presión para reinyectar el biogás al reactor cuyo fin fue de agitar la biomasa dentro del reactor, un condensador para poder separar el vapor de agua del biogás, una recirculación con una bomba, un equipo

de pulsos para obtener el volumen de gas que se produjo y válvulas para las tomas de muestras respectivas. A continuación se muestra un la figura 1 que esquema de del reactor que se tomó del trabajo de Benito 2001.

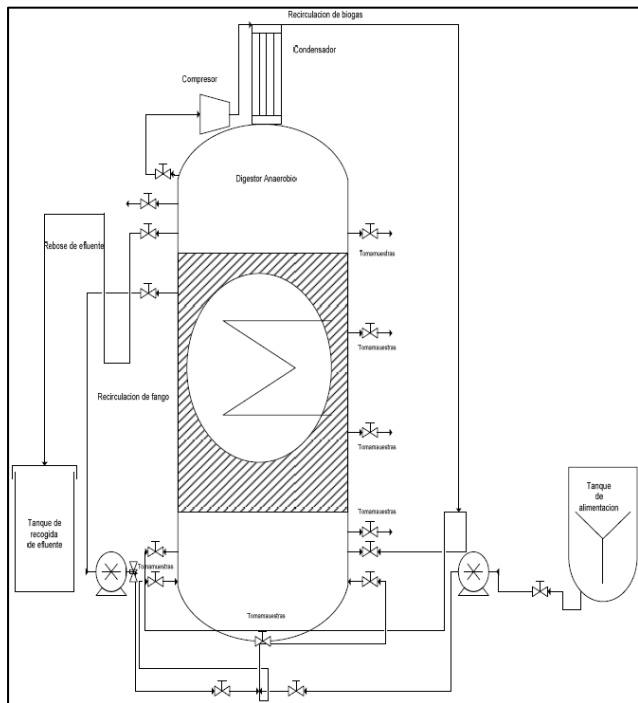


Figura 1: Esquema de un Reactor Termófilo Anaerobio

Monitoreo de parámetros

Se monitorearon y controlaron varios parámetros para vigilar la evolución del reactor durante el tratamiento: Las tomas de muestras en la alimentación y salida del tratamiento para la determinación en laboratorio de la Demanda Química de Oxígeno total (DQOt), Sólidos Totales y Volátiles (ST y SV), Amonio, Nitrógeno Kjeldahl (NKT); la Centrifugabilidad, Filtrabilidad, Tiempo de Succión Capilar (CST) y Viscosidad se analizaron se analizaron periódicamente durante la investigación. Las muestras tomadas solo a la salida del tratamiento que se analizaron en laboratorio fueron los Ácidos Grasos Volátiles (AGVs) y la Alcalinidad, las cuales se analizaron periódicamente y previamente filtradas, todos estos parámetros antes mencionados fueron analizados tomando como referencia el “Standard Methods (APHA, 2005)”.

Para la determinación de la composición de biogás se usó de un equipo de cromatografía de gases (Marca VARIAN, modelo CP-3800), la muestra se colecto directamente de la línea de biogás con una jeringa de 100 µ litros; los resultados obtenidos se almacenaron

en un registro electrónico del equipo. El volumen de gas se determinó con un equipo que contabilizaba pulsos, cada pulso era equivalente a 120 ml de biogás. La composición del biogás se analizó periódicamente veces por semana en función a lo requerido.

A partir de los parámetros determinados en laboratorio se calcularon:

Carga Másica:

$$CM = \frac{g\ SV_{alimentación}}{gSV_{reactor} \times día} \dots\dots (ec\ 1)$$

Tiempo de Retención Hidráulico:

$$TRH = \frac{Litros_{reactor}}{Caudal_{alimentación}} \dots\dots (ec\ 2)$$

Productividad de biogás:

$$Productividad = \frac{ml_{biogás}}{g\ SV_{eliminada}} \dots\dots (ec\ 3)$$

Carga volumétrica:

$$CV = \frac{g\ SV_{alimentación}}{Litros_{reactor} \times día} \dots\dots (ec\ 4)$$

Otros como él % de eliminación de DQO, SV y ST.

Estrategia de tratamiento

Consistió en evaluar los estados pseudos estacionarios del TRH. Al pasar de un TRH a otro se desestabilizó el sistema por lo que el criterio que se tomó para esta disminución fue el de conseguir una estabilidad en los parámetros evaluados (valores parecido o constantes) como fue la concentración de Amonio, Productividad de biogás, % eliminación de DQO, ST y SV.

Resultados y discusiones

Las condiciones operacionales iniciales para tratamiento fueron de un Tiempo de Retención Hidráulico teórico (TRHt) 22.52 días, caudal teórico de alimentación 2.22 l/día.

En la tabla 2 se muestra la evolución de los valores promedios parámetros en la alimentación a diferentes TRH con los que se trabajó.

Tabla 2: Evolución de los parámetros de alimentación a diferente TRH

Parámetro	TRH días					
	22.5	15	11	7.5	5.6	4.5
DQO (mg/l)	30236	28998	24634	29130	31250	28995
pH	8.15	8.06	7.95	7.88	7.90	7.9
ST (g/l)	24.9	26.3	24.1	24.4	32.5	29.6
SV (g/l)	16.9	20.6	18.8	18.9	23.7	20
NH ₃ ⁺ (mg/l)	460.7	284.8	229.6	190.5	204	264
NKT (mg/Kg)	1923.9	1904.8	1803.2	1763.7	2046.8	1425.6
CV (gSV/l·d)	0.59	1.16	1.35	2.09	3.29	3.49
CM (gSV/gSV·d)	0.06	0.08	0.1	0.18	0.24	0.29

En la figura 2 se presenta la evolución del TRH el cual se modificó de forma progresiva, esto se logró aumentando el caudal de alimentación, el cálculo se realizó haciendo uso de la ecuación 2 (ec 2) descrita en el apartado de “Monitoreo de Parámetros”. El TRH real consideró el caudal real de alimentación y difiere del TRH teórico en que consideró el caudal calculado en gabinete y al cual se programó la bomba de alimentación, esto quiere decir que lo el caudal programado en la bomba no era el que verdaderamente se alimentaba. Además se pudo observar de los resultados, que ambos describen un comportamiento similar, con la diferencia que los valores del teórico en casi toda la investigación fueron mayores al teórico.

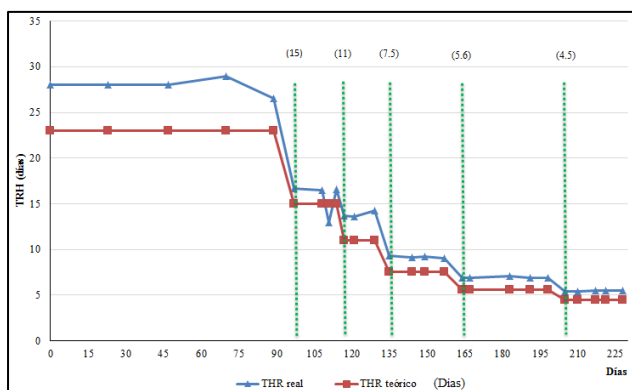


Figura 2: Evolución del Tiempo de Retención Hidráulico

En la figura 3 se representa la evolución de la concentración de sólidos volátiles de lodo mixto procedente de la EDAR, de acuerdo con los datos experimentales la concentración de SV en la alimentación tuvo un valor promedio de 19 ± 3.8 g/l. Como puede observarse las variaciones más significativas en la calidad en la concentración de la alimentación (135, 190 y 245 días) se vieron notablemente disminuidas en la concentración de los SV a la salida, circunstancia que pone en manifiesto el efecto del reactor que ha sido capaz de asumir esos

picos sin que varíe la concentración de SV en la salida.

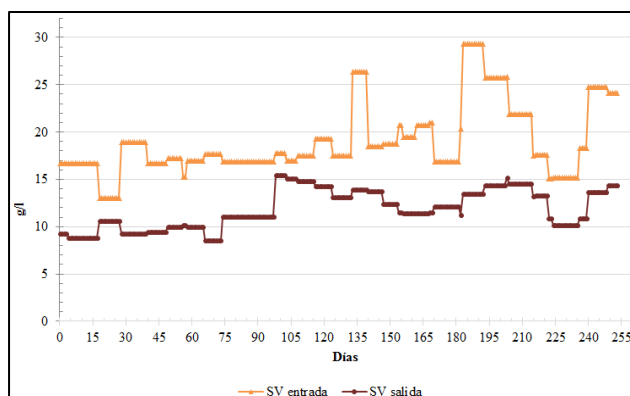


Figura 3: Evolución de la concentración de sólidos volátiles a la entrada y salida del tratamiento

En la figura 4, se presenta la evolución de la concentración de la Demanda Química de Oxígeno (DQO); se muestra un comportamiento similar al descrito la evolución de la concentración de sólidos. La DQO también describe un comportamiento irregular teniendo un valor promedio de la concentración alimentación de 29676 ± 5487 mg/l. Los picos más significativos (90, 135, 170, 180 y 245 días) en la concentración de la DQO de la alimentación se vieron notablemente amortiguadas en la concentración de DQO de salida, esto producto del reactor que tuvo la capacidad de asumir estos cambios y sin que varíe significativamente la concentración de DQO a la salida.

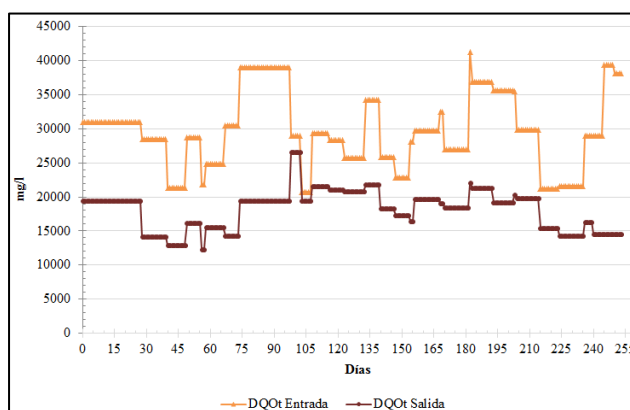


Figura 4: Evolución de la concentración de la DQO a la entrada y salida del tratamiento

En la figura 5 se muestra la evolución de los Ácidos Grasos Volátiles (AGVs), se evaluaron siguiendo dos métodos, el primero fue el del uso una equipo de cromatografía (valores más exactos) pero los resultado se obtenían luego de unos 5 días por disponibilidad de los equipos, el otro método fue por

valoración que se podía realizar en una hora (siendo el menos exacto pero el más inmediato), permitió evaluar de manera aproximada y así poder identificar cualquier anomalía. Tal como se observa en la figura 5 en el pico que aparece en el día 229, ambos métodos dan valores semejantes esto significa que el método rápido (valoración) es suficientemente preciso e indicativo como para marcar comportamientos anómalos con lo cual el método por valoración es suficientemente bueno como para utilizarlo en la gestión diaria.

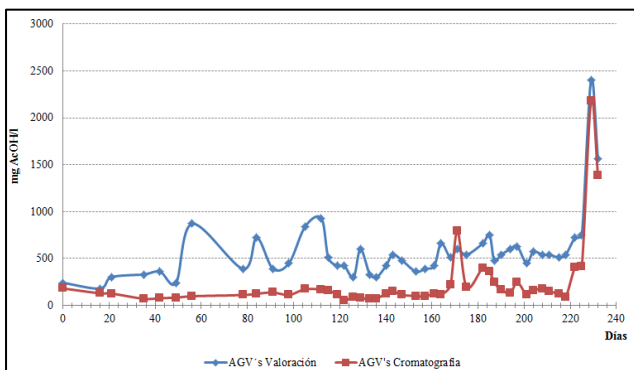


Figura 5: Evaluación de la concentración de los Ácidos Grasos Volátiles (AGVs) por cromatografía y valoración

Como se observa en la figura 6, productividad con la Carga Másica (CM) describió comportamiento inversamente proporcional (cuando incrementa su valor, el otro disminuye), esto se puede observar de forma más notable en los días 117, 167 y 217 donde se observa esa mayor diferencia. La CM tuvo un comportamiento irregular que se debió principalmente a la concentración variable de sólidos en el fango. La productividad promedio fue de 369 ± 45.2 (ml biogás/g SV alim).

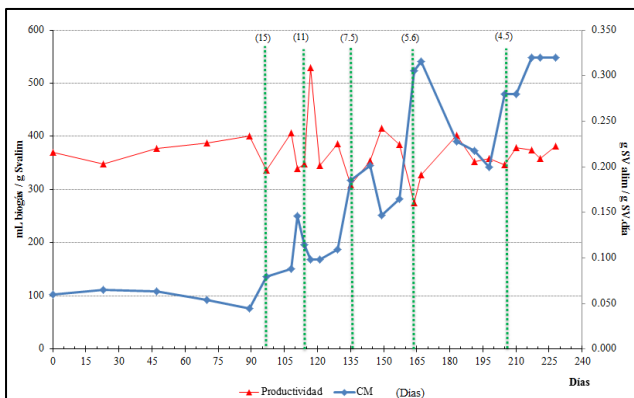


Figura 6: Productividad vs Carga Másica

Tal como se muestra en la figura 7 la CM y el % eliminación de SV tienen un comportamiento

similar a partir del día 90 de evaluación esto se debe a la variación de la concentración de SV y al caudal en la alimentación, además la concentración de SV a la salida la tiene poca variación con un valor promedio de 12.5 ± 1.7 g/l, esto contribuyó a que tenga este comportamiento.

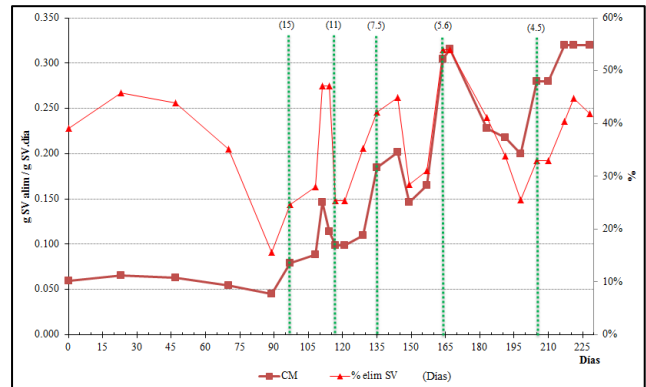


Figura 7: CM vs % eliminación de SV

En la figura 8 muestra los g SV alimentado que se convirtieron a ml de biogás (Productividad) y la cantidad de biogás que se generó, el cual tuvo un comportamiento ascendente debido al incremento de la CM, e irregular atribuido principalmente a la variabilidad de la concentración de los SV de la alimentación. Además se puede observar que el reactor va producir mayor volumen de biogás al incrementar de la carga másica pero la productividad seguirá transformando en promedio 369 ± 45.2 ml de biogás por cada g SV alimentados.

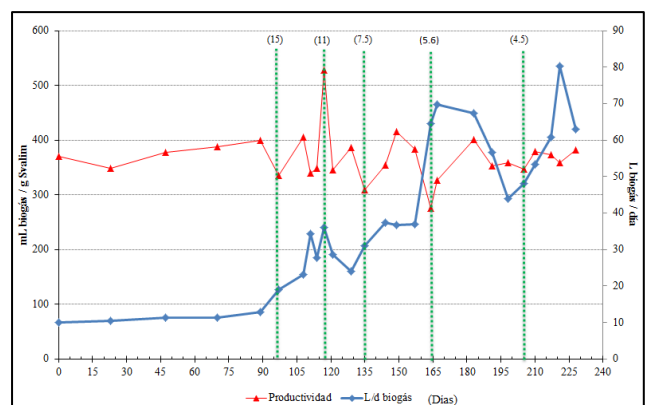


Figura 8: Productividad vs Litros biogás/día

En la figura 9 se muestra la evolución del metano y el dióxido de carbono con valores promedio de 62.9 y 33.2 respectivamente. Se puede mencionar que son valores que muestran un reactor metanogénico anaerobio y que pese al incremento de la CM tuvo

una generación regular y poco variable de metano 62.9 ± 3.8 . En los días 60 y 109 se observa comportamientos inversamente proporcionales esto se debe probablemente a que le lodo estuvo más o menos sólidos y que producto de esa aclimatación generó más o menos metano y CO_2 .

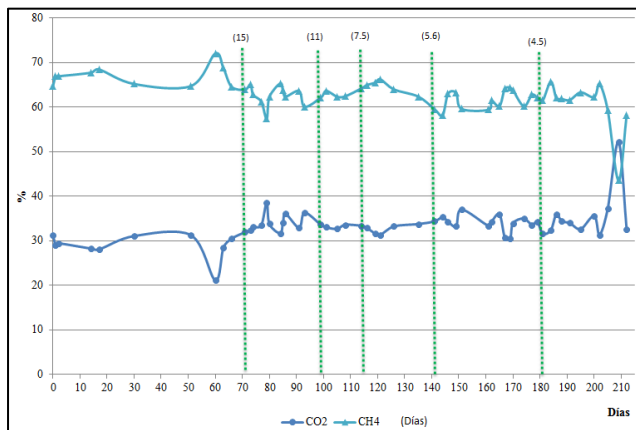


Figura 9: Evolución de contenido de Metano y CO_2

Como complemento se realizaron otras pruebas (CST, Deshidratabilidad, Filtrabilidad y Viscosidad) en laboratorio a la entrada y salida del tratamiento del lodo en los meses de Marzo y Mayo, en los cuales sufrieron una disminución del TRH teórico de 7.5 a 5.6 días.

El Tiempo de Succión Capilar (CST) es un método para medir la filtrabilidad, utilizan la presión de succión capilar de un papel poroso; midiendo el tiempo para que el filtrado avance entre los electrodos separados radialmente. Cuando una suspensión se filtra bajo la influencia de esta presión de succión, la velocidad a la cual el filtrado pasa a través del medio filtrante es controlada predominantemente por la filtrabilidad de la suspensión, de modo tal que cuanto menor sea el valor de CST medido, la filtrabilidad del fango será mejor. Las medidas de CST tienen un margen de error de entorno al 6-10 %.

Tal como se muestra en la figura 10, se pudo determinar que los valores del CST en alimentación son menores a los de la salida por lo que el fango fresco va a tener mayor deshidratabilidad que el fango tratado, esto quiere decir que se filtrará mejor la alimentación que la salida, este comportamiento se observa tanto en el mes de marzo como en mayo.

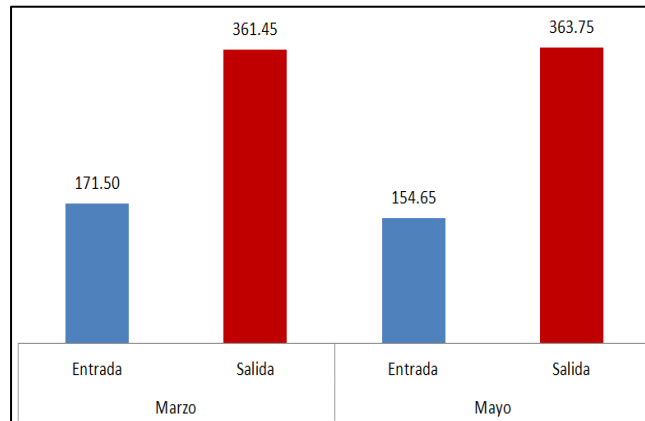


Figura 10: Tiempo de Succión Capilar (CST)

La filtrabilidad se halla midiendo la facilidad / dificultad que tiene el fango para fluir, sometido a una presión determinada, a través de un filtro. Partiendo de que a mayor es la constante de filtración mejor será la filtrabilidad del fango y mayor volumen de líquido se recogerá.

La Cte. de filtración en la alimentación tiene valores ligeramente superior al de la salida del tratamiento en marzo como en mayo.

Como se muestra en la figura 11, los valores obtenidos a la entrada como a la salida del tratamiento son muy similares para ambos meses. La filtrabilidad no es afectada significativamente por la disminución del TRH teórico de 7.5 a 5.6 día.

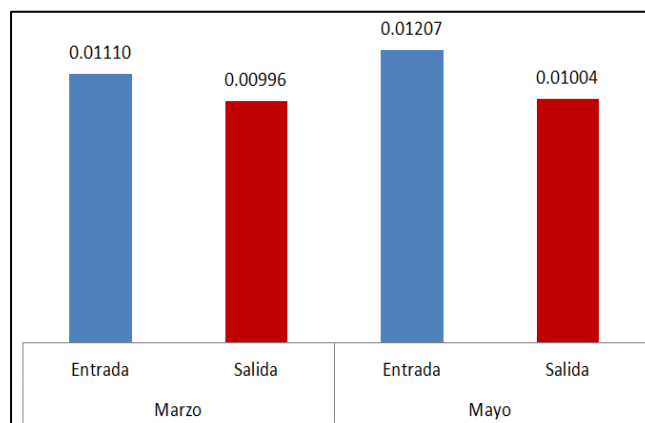


Figura 11: Pruebas de filtrabilidad

La centrifugación es un método por el cual se pueden separar sólidos de líquidos de diferente densidad mediante una centrifugadora, la cual imprime a la mezcla un movimiento rotatorio con una fuerza de mayor intensidad que la gravedad, provocando la sedimentación del sólido o de las partículas de mayor densidad.

En la figura 12 se muestra los resultados de la centrifugabilidad la cual en ambos meses los valores obtenidos tanto en la alimentación como a la salida son muy similares para el % de recuperación de la torta y la concentración de sólidos en la torta, mientras que en mayo del % de masa separada como líquido es mayor que en marzo probablemente por que el lodo contenía más agua.

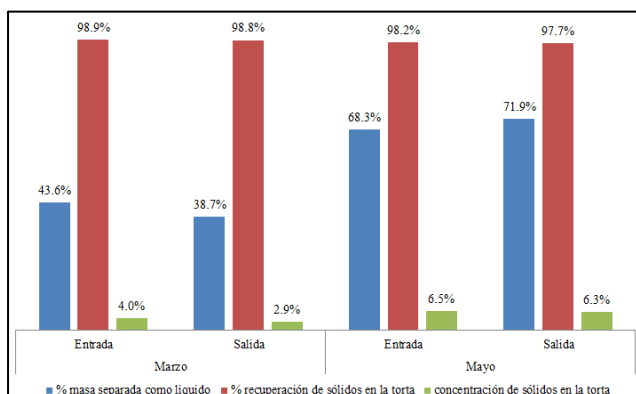


Figura 12: Pruebas de centrifugabilidad

La viscosidad se define como la medida de la fricción interna de un fluido. Esta fricción se hace evidente cuando se hace mover una capa de un fluido en relación con otra. Cuanto mayor sea la fricción, mayor será la fuerza necesaria para causar dicho movimiento.

En la figura 13 se muestra los resultados de viscosidad que se le sometió a la entrada como a la salida del tratamiento del lodo, describiendo un descenso de la viscosidad después del tratamiento. De la gráfica se puede comentar que la viscosidad no es afectada significativamente por la disminución del TRH teórico de 7.5 a 5.6 días para ambos meses.

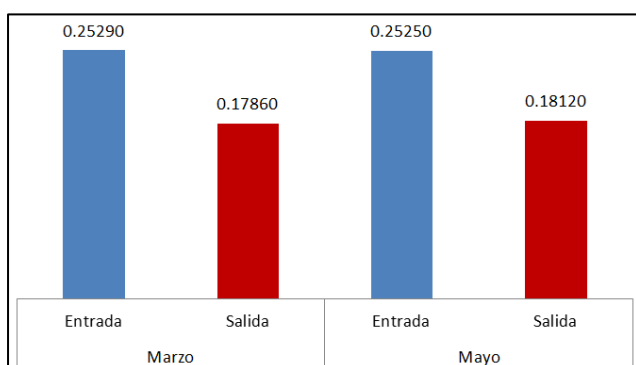


Figura 13: Pruebas de viscosidad

A la vista de estos resultados parece extraerse la indicación de que el CST no es suficientemente indicativo por lo que muestra una diferencia significativa al comparar la alimentación con la

salida en los dos meses que no se ponen en manifiesto en la prueba de filtrabilidad y centrifugabilidad (por ser pruebas objetivas).

Conclusiones

En el intento de transformar un reactor termófilo metanogénico en acidogénico, fue sometido al incremento de la carga másica, reduciendo el tiempo de retención hidráulico.

A pesar del bajo $THR < 5d$ y elevada velocidad de carga orgánica $> 3 g SV/l \cdot d$ aplicados, el reactor continuo siendo metanogénico, con una productividad promedio $19.05 l/d$ (composición promedio de 62.9% de metano y un $\%$ eliminación de SV de 37%).

A lo largo de la investigación el reactor demostró ser muy estable, asimilando fácilmente los cambios en la composición de la alimentación. A pesar de las variaciones en la composición de la alimentación, la características del fango digerido fueron sensible mente constantes.

La digestión termófila no varía significativamente las condiciones de filtrabilidad y centrifugabilidad del fango, además según lo observado en la prueba de centrifugabilidad y filtrabilidad podemos concluir que el método de CST es poco confiable por no reflejar la realidad.

Durante todo el tratamiento los valores de AGVs no superaron los $2500 mg AcOH/l$, por lo que no se detectaron problemas por inhibición de ácidos grasos.

Referencias bibliográficas

- Benito J (2011), Variación de las condiciones operacionales habituales de los digestores anaerobios de lodos: Digestión Anaerobia Termófila, Trabajo de Fin de Master, Valladolid -España.
- Decisión 2000/532/CE (2000), Lista de residuos apartado a) del artículo 1 de la Directiva 75/442/CEE sobre residuos y con el apartado 4 del artículo 1 de la Directiva 91/689/CEE sobre residuos peligrosos. Comisión de Comunidades Europeas.

- Directiva 86/278/CEE (1986), Protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura, Comunidad Económica Europea.
- Han-Qing Yu, Herbert H.P. Fang, Guo-Wei Gu (2002), Comparative performance of mesophilic and thermophilic acidogenic upflow reactors, *Process Biochemistry* 38 (2002) 447/454.
- Lahera V (2010), *Infraestructura Sustentable: Las plantas de tratamiento de aguas residuales*, Universidad Autónoma ISSN: 1405-8626, Madrid – España.
- Lauwers J, Appels L, Thompson IP et al (2013) Mathematical modelling of anaerobic digestion of biomass and waste: Power and limitations. *Prog Energy Combust Sci* 39:383-402. doi:10.1016/j.peccs.2013.03.003
- Ley 22/2011 (2011) de Residuos y Suelos Contaminados, España.
- M. C. Gagliano & C. M. Braguglia & A. Gallipoli & A. Gianico & S. Rossetti (2014), Microbial diversity in innovative mesophilic/thermophilic temperature-phased anaerobic digestion of sludge. DOI 10.1007/s11356-014-3061-y.
- McCarty P, Rittmann B (2001), *Biología del Medio Ambiente*, Editorial Mc Graw Hill.
- Real Decreto 1310/1990 (1990), Utilización de lodos de depuración en el sector agrario, España.
- Standard Methods (APHA, 2005). Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association. 22nd ed. Washington, DC, EEUU.
- Woong Kim et al (2012), Performance of methanogenic reactors in temperature phased two-stage anaerobic digestion of swine wastewater, VOL. 114 No. 6, 635e639, 2012.