

DIGESTIÓN ANEROBIA DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DEL TOMATE EN MODO CONTINUO Y SEMICONTINUO

Francisco Cuadros Blazquez

Almudena Gonzalez Gonzalez

Maria Jesus Roldan Ruiz

Fernando Rubiales Rubio

Antonio Ruiz Celma

Ana Vizcaino Galán

Fernando Lopez Rodriguez

Abstract

The tomato industry gives rise to large volumes of highly polluting wastes, which need to be appropriately managed before discharge into the environment. Anaerobic digestion is a technical process devoted to the degradation of such organic waste material. This technique allows reduce the pollutant load of wastes and also generate biogas with a methane content of around 75%, therefore it can be used to generate energy by combustion in engines, turbines or boilers

Anaerobic digestion experiments have been made in CSTR and semi-continuous reactors with the aim of: (i) determining the optimum flow in order to achieve the highest rates of biogas production and waste degradation, (ii) evaluating its influence on the experimental process involved.

The results show that the operating mode drastically affects biogas production, but slightly substrate degradation. This is mainly due to technical difficulties to keep the optimal configuration when operating the experimental setup in continuous regime.

Keywords: *Anaerobic digestion; tomato industry wastes, CSTR reactor; semi-continuous reactor*

Resumen

La industria de procesado de tomate genera grandes cantidades de residuos altamente contaminantes que necesitan ser gestionados de manera adecuada antes de ser vertidos al medio ambiente. Una de las técnicas utilizadas para degradar estos residuos orgánicos es la digestión anaerobia. Esta técnica no solo permite disminuir la carga contaminante del residuo sino que también genera biogás con un contenido en metano en torno al 75%, el cual puede utilizarse para generar energía mediante su combustión en motores, en turbinas o en calderas.

Las experiencias de digestión anaerobia se han realizado en modo continuo y semicontinuo, con el objetivo de determinar el caudal óptimo de este residuo para lograr las mayores producciones de biogás y la mayor degradación de los mismos, así como evaluar la influencia en el proceso del dispositivo experimental utilizado.

Los resultados obtenidos muestran que el modo de operación influye significativamente sobre todo en la producción de biogás y apenas en la degradación del sustrato, debido principalmente a las dificultades de mantener las condiciones óptimas de operación en el dispositivo que opera en régimen continuo.

Palabras clave: *Digestión anaerobia; residuos de la industria del tomate; reactor CSTR; reactor semicontinuo.*

1. Introducción.

La industria agroalimentaria abarca un conjunto de actividades industriales dirigidas al tratamiento, transformación, preparación, conservación y envasado de productos alimenticios. En general, las materias primas utilizadas son de origen vegetal o animal y se producen en explotaciones agrarias, ganaderas y pesqueras. La economía de la Comunidad Autónoma de Extremadura está fuertemente ligada al sector agroalimentario, ya que la tanto la agricultura como la ganadería proporcionan la base para un sector industrial cimentado en la transformación de estos productos, siendo la industria de conserva de frutas y hortalizas la que ocupa el segundo lugar dentro del sector alimentario extremeño.

En cuanto a la industria de procesado del tomate, no sólo es notable su desarrollo dentro de la región extremeña, sino que para hacerse una idea de su importancia es necesario comparar con los datos a escala nacional. En el año 2009, se generaron en España 4.604 miles de toneladas de tomate, de las cuales 2.507 se transformaron en tomate para conserva, mientras que en Extremadura, en el mismo año, se generaron 1.902 miles de toneladas de tomate y se procesaron 1.875 miles de toneladas. Si comparamos los datos nacionales y extremeños, en Extremadura se produjo el 41,30 % del tomate total y el 74,80% del tomate destinado a conserva, esta diferencia en los porcentajes se debe a que en Extremadura la mayor parte del tomate cosechado se transforma en otros productos, concretamente el 98,58% (marn, ASPA, 2010).

Además de la importancia económica que tiene la industria de procesado de tomate en Extremadura también es responsable de la generación de gran cantidad de residuos sólidos, los cuales están formados por pieles y semillas, además del fango procedente de la depuración del agua utilizada en el proceso productivo. Según datos proporcionados por el Centro Tecnológico Agroalimentario de Extremadura (CTAEX) una industria transformadora de tomate tipo genera por cada tonelada de tomate procesado 0,016 toneladas de fango y 0,04 toneladas de pieles y semillas, lo que supone que el fango y las pieles y semillas representan un 1,6% y un 4% respectivamente del peso de materia prima de entrada y lo que es lo mismo, por cada kilogramo de fango generado se producen 2,5 kilogramos de pieles y semillas. Por otra parte, esta industria consume grandes cantidades de agua, este agua una vez utilizada es depurada en la propia planta y reutilizada, sin embargo, sólo el 66% del agua depurada se recircula, y un 34% del agua que entra en la depuradora se vierte de nuevo al medio. Esta agua no puede considerarse un residuo como tal puesto que ya ha sufrido un proceso de depuración, pero si es un recurso que puede ser aprovechable de algún modo.

Si consideramos la cantidad de tomate procesado en Extremadura en el año 2009 así como los porcentajes de residuos que se generan por cada tonelada de tomate procesado, es posible estimar la cantidad de residuos sólidos generados por la industria de procesado de tomate en Extremadura en dicho año, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Estimación de los residuos generados por la industria de procesado de tomate en Extremadura en 2009

1.875.000 toneladas de tomate para conserva procesadas en Extremadura en el año 2009

Residuos generados en el procesado del tomate

0,04 toneladas de pieles y semillas/tonelada de materia prima

0,016 toneladas de fango/tonelada de materia prima

Residuos generados en el procesado del tomate en 2009

Pieles y semillas: 75.000 t Fango: 30.000 t

105.000 toneladas de residuos sólidos totales generados en el procesado del tomate en 2009

Para cuantificar la contaminación generada por la industria de procesado del tomate necesitamos hacer uso de algún parámetro que nos permita valorar el alcance del poder contaminante de sus residuos. La Unión Europea, en su Directiva 91/272/CEE de 21 de Mayo de 1991 sobre tratamiento de aguas residuales urbanas, recomienda el uso de un parámetro denominado habitante equivalente (HE), definido como la carga orgánica biodegradable con una DBO₅ de 60 gramos por día. Los residuos sólidos y líquidos generados en el procesado del tomate presentan una DBO₅ de 6.750 mg/l y se generaron 1.050.000 toneladas de los mismos en Extremadura en 2009(10% residuo sólido y 90% de agua), por tanto, se puede estimar que la contaminación producida por esta industria es equivalente a la generada por una ciudad de 323.630 habitantes.

Estos residuos además de ser altamente contaminantes se caracterizan por presentar elevados contenidos en materia orgánica y en humedad. El crecimiento industrial y la concentración de la población en grandes ciudades hace que la generación de biomasa residual sea tan abundante y tan localizada, que la capacidad de autodegradación del medio resulta insuficiente y se hace necesario aplicar distintas técnicas de tratamiento a estos residuos antes de su vertido al medio natural, ya que en caso contrario, generarían múltiples problemas ambientales, principalmente en el agua en la que provocarían eutrofización y en la atmósfera debido a la emisión de gases de efecto invernadero (metano y dióxido de carbono) como consecuencia de su descomposición en condiciones no controladas.

Debido a las características físico-químicas de los residuos en estudio consideramos que la mejor técnica disponible para su tratamiento es la digestión anaerobia (DA), ya que presenta conexión con los dos grandes caballos de batalla de las sociedades modernas, estos son, la búsqueda de nuevas fuentes de energía y la reducción del potencial contaminante de la actividad industrial.

La DA o biodigestión es una tecnología de degradación biológica de la materia orgánica en un medio anóxico, mediante la acción de un grupo de bacterias específicas (hidrolíticas, acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas) en cuatro fases consecutivas. Esta técnica presenta dos grandes ventajas, por una parte produce biogás, un producto gaseoso formado por una mezcla de metano (entre el 50-75% dependiendo del sustrato), y dióxido de carbono (entre el 50-25% aproximadamente) susceptible de un aprovechamiento energético mediante su combustión en motores, en turbinas o en calderas, bien sólo o mezclado con otro combustible y además, se genera un lodo efluente libre de olores y rico en nutrientes que puede ser aprovechable como enmienda orgánica.

Esta técnica permite degradar casi cualquier tipo de residuo orgánico, vegetal o animal, que presente un elevado contenido en humedad, lo cual se demuestra en los numerosos artículos científicos que se han publicado sobre el tema, en los que se han evaluado residuos de frutas y verduras (Bouallagui et al, 2004), (Bouallagui et al, 2005), residuos de la molienda de aceitunas (Ergüder et al, 2000),(Borja et al., 2002), tabaco (Meher et al., 1995), residuos de tomate (Sarada and Joseph, 1994), subproductos de matadero (Rosenwinke and Meyer, 1999),(Masse et al., 2003), (Hejnflét and Angelidake, 2009) (Cuadros et al.,

2011), y no sólo se han tratado residuos aislados, sino que también existe extensa bibliografía sobre codigestión anaerobia, es decir, el tratamiento conjunto de residuos orgánicos diferentes con el objetivo de aprovechar la sinergia de las mezclas, compensando las carencias de cada uno de los substratos por separado, así se han probado mezclas de residuos de algas y de papel (Yen and Brune, 2007), pulpa de mandioca y estiércol de cerdo (Panichnumsin et al, 2010), residuos sólidos de matadero, estiércol y residuos de frutas y verduras (Álvarez and Lidén, 2008) o lodos de aguas residuales y estiércol de cerdo (Murto et al, 2004).

Aunque ya se ha publicado bibliografía sobre la DA de residuos de tomate, esta no es muy abundante y en ningún caso se han realizado experiencias utilizando como sustrato el conjunto de residuos sólidos y líquidos que se generan en estas industrias, ni se ha tenido en cuenta en las investigaciones anteriores las proporciones reales en las que estos desechos se generan, de ahí la importancia de este trabajo.

2. Objetivos

Los principales objetivos que se plantearon al realizar las experiencias de digestión anaerobia fueron:

- Demostrar que la tecnología de digestión anaerobia es adecuada para el tratamiento y degradación de los residuos de la industria del tomate
- Determinar el potencial de dichos residuos para generar biogás.
- Estudiar la influencia de las condiciones de operación de los dos dispositivos experimentales utilizados en los resultados obtenidos.

3. Metodología

3.1. Métodos analíticos.

Periódicamente se tomaron muestras del digestor y se analizó la Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Biológica de Oxígeno a los 5 días (DBO₅), Ácidos Grasos Volátiles (AGV), Alcalinidad, pH, sólidos totales (ST), sólidos en suspensión minerales y volátiles (SSM, SSV), sólidos disueltos minerales y volátiles (SDM, SDV), níquel, carbono y nitrógeno orgánico total. La DBO₅, AGV, alcalinidad, pH, ST, SSM, SSV, SDM, SDV se analizaron utilizando métodos standard (APHA, 1992), mientras que para determinar DQO, níquel, carbono y nitrógeno orgánico total se utilizaron kits Nanocolor® de Macherey-Nagel y un espectrofotómetro portátil PF-12 de la misma casa comercial.

3.2. Preparación del sustrato y puesta en marcha del proceso de digestión anaerobia.

Los residuos de la industria del tomate se someten previamente a un tratamiento mecánico para disminuir el tamaño de partícula, ya que según muestra la bibliografía este es uno de los parámetros de mayor importancia en el proceso de DA (Izumi et al, 2010), ya que al disminuir el tamaño de partícula aumenta el rendimiento del proceso al aumentar la superficie sobre la que las bacterias pueden actuar.

En la preparación del sustrato se ha tenido en cuenta las proporciones de cada residuo que se generan en condiciones reales de operación en una industria tipo, con el objetivo de que los resultados obtenidos puedan ser utilizados para realizar proyectos a escala real.

Los residuos de la industria del tomate, pieles y semillas además del fango procedente de la depuración de las aguas residuales generadas, fueron tomados de una empresa de procesado de tomate situada en las cercanías de Badajoz y almacenados a -4 °C para evitar

su degradación. El ratio en que estos residuos se generan en una industria tipo es de 2,5 kg de pieles y semillas por cada kg de fango. Para preparar el alimento a introducir en el reactor se ha respetado dicha proporción, añadiendo parte del agua depurada que se vierte a la red tras ser utilizada en el proceso productivo, hasta conseguir un contenido en humedad adecuado para llevar a cabo el proceso de DA, esto es 90% agua y 10 % sólidos, de los cuales un 7,14% corresponde a las pieles y semillas y un 2,86% al fango.

Los residuos sólidos se trituran con una pequeña cantidad de agua utilizando una dilaceradora y una licuadora hasta reducir el tamaño de partícula lo máximo posible, una vez homogeneizado el residuo sólido se mezcla con agua en las proporciones comentadas anteriormente. Una vez preparado se envasa en botellas de 2 L y se congela para evitar su degradación hasta el momento de uso.

Antes de comenzar las experiencias de biodigestión es necesario realizar un análisis físico-químico del residuo en estudio, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Caracterización físico-química de los residuos de la industria del tomate.

Parámetro	Unidades	Valor
pH		4,55
DQO _{total}	mgO ₂ /l	22.320
DBO ₅	mgO ₂ /l	6.750
SSV	g/l	11,36
SDV	g/l	2,34
AGV	g CH ₃ COOH/l	0,33
Alcalinidad	g CaCO ₃ /l	0,1
Nitrógeno Total	g/l	0,7
Carbono Orgánico Total	g/l	11,4
Relación C/N		16,28

El residuo de tomate presenta un valor de pH muy bajo, situándose por debajo de 5, lo que en principio puede resultar un inconveniente en el buen funcionamiento del proceso debido a una posible acidificación de la biorreacción. Es sabido que la degradación anaerobia es óptima para valores de pH comprendidos entre 6,5 y 8, valores próximos al neutro (Lay et al, 1997).

Otro parámetro relevante es el poder contaminante que tiene la mezcla de los residuos, superando el valor de 22 g de DQO por cada litro. La acidez volátil no es excesivamente alta, 0,33 g/L, aunque si es significativo el valor tan bajo que posee la alcalinidad, 0,1 g/L, incluso por debajo del valor de la acidez volátil, lo que nos da una idea de la acidez del propio alimento y su escaso poder tampón.

Los residuos de la industria del tomate carecen de microorganismos adecuados para realizar la biodigestión, por lo que se impone la necesidad de contar con un inóculo aclimatado. El lodo utilizado como inóculo para iniciar el proceso de digestión fue tomado de un reactor anaerobio situado en la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de Badajoz.

Tabla 3: Caracterización físico-química del inóculo.

Parámetro	Unidades	Valor
-----------	----------	-------

pH		7,84
DQO soluble	mgO ₂ /l	2.415
DQO total	mgO ₂ /l	24.262
SSV	g/l	17,90
SDV	g/l	1,68
AGV	g CH ₃ COOH/l	0,07
Alcalinidad	g CaCO ₃ /l	2,50
Nitrógeno Total	g/l	1,85
Carbono Orgánico Total	g/l	4,37
Relación C/N		2,73
NO₃⁻	g/l	0,34

Este inóculo presenta las características físico-químicas óptimas para llevar a cabo el proceso de DA debido a que presenta un pH cercano a 8, que es el óptimo para el desarrollo de las bacterias metanogénicas, un valor de DQO elevado así como una alta alcalinidad y baja concentración de ácidos grasos volátiles, lo cual indica que el lodo presenta una gran capacidad tampón.

3.3. Dispositivos experimentales. Digestor anaerobio continuo y semicontinuo.

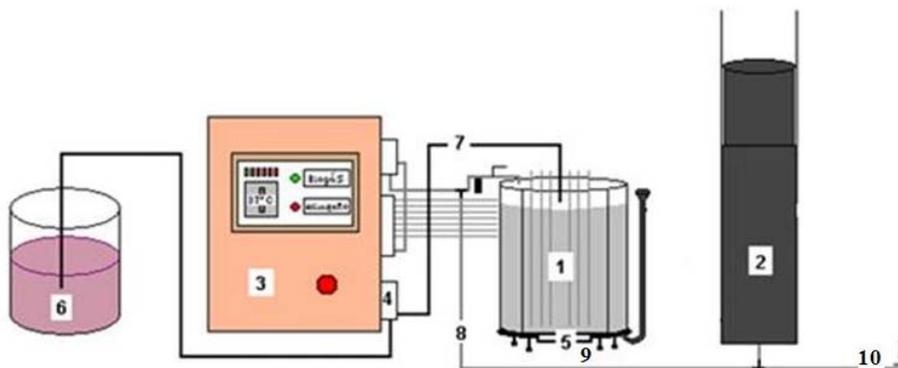
Las experiencias se han realizado utilizando dos tipos de digestores anaerobios a escala de laboratorio. Uno de ellos está diseñado para trabajar en modo semicontinuo, es decir, una vez al día se introduce manualmente un cierto volumen de alimento a la vez que se extrae el mismo volumen de lodo digerido con el objetivo de mantener el volumen del reactor constante, mientras que el otro digestor, continuo, es alimentado de forma progresiva (gota a gota a lo largo del día) mediante una bomba peristáltica y al mismo tiempo se va extrayendo el mismo volumen de sustrato.

El reactor continuo es del tipo CSTR (Continuous-flow stirred-tank reactor), es decir, un reactor continuo de mezcla perfecta, con un volumen de trabajo de unos 6 litros. El funcionamiento del reactor está regulado por un autómata, el cual controla el sistema de alimentación del sustrato, la temperatura y la agitación en el interior del reactor.

Las experiencias se realizaron en régimen mesófilo, a 38 °C, manteniendo la temperatura mediante resistencias cerámicas instaladas en la parte inferior del digestor. La alimentación se realiza utilizando una bomba dosificadora peristáltica que aspira el sustrato almacenado en un recipiente de cristal provisto de un agitador magnético con un diablillo, para mantener la mezcla homogénea antes de ser introducida en el digestor. El contenido del reactor se agita gracias a la recirculación de parte del biogás producido mediante otra bomba peristáltica. El biogás generado se almacena en un gasómetro, que no es más que una cámara rígida móvil que proporciona una lectura visual del biogás acumulado y permite almacenarlo de forma segura, evitando riesgos de incendio, malos olores, etc.

El volumen de biomasa en el digestor se controla mediante un rebosadero, de tal manera que el efluente digerido pasa a un embudo de decantación para su recogida. Por último, la toma de muestras del digestor se realiza mediante unos grifos situados en la parte inferior del mismo.

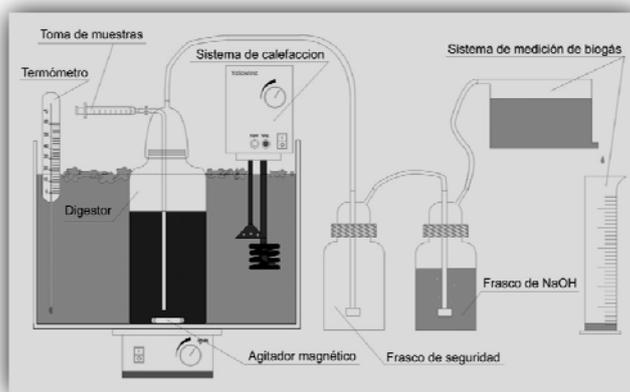
Figura 1. Esquema de digestor anaerobio de mezcla perfecta (CSTR).



(1) Digestor. (2) Gasómetro. (3) Sistema de control. (4) Válvula de alimento. (5) Sistema de placas calefactoras. (6) Tanque de alimentación. (7) Entrada de alimento. (8) Recirculación de biogás. (9) Toma de muestras. (10) Antorcha quemadora.

El dispositivo experimental en el que se llevó a cabo el proceso de digestión anaerobia en modo semicontinuo se esquematiza en la Figura 2. Básicamente, dicho dispositivo está constituido por un matraz de vidrio de 2 litros de capacidad, en cuya boca se acopla una pieza que dispone de un tubo central que se sumerge en el medio de reacción y de dos salidas, una de ellas se utiliza para introducir el sustrato en el interior del reactor, y, la otra, para evacuar el gas producido. Esta unidad de digestión está sumergida en un baño de agua que se mantiene a 38 °C mediante un termostato provisto de una resistencia eléctrica. El contenido del reactor se mantiene homogéneo mediante el uso de un diablillo y un agitador magnético. Cabe llamar la atención en el sentido que este biodigestor mantiene una temperatura homogénea en todo su volumen debido a su inmersión en un baño térmico y una agitación homogénea del sustrato a digerir, por lo que sus condiciones de operación son óptimas. Para la determinación del volumen de metano producido durante el proceso, se utiliza un depósito de 5 litros de capacidad, acoplado al digestor. Entre el digestor y el depósito de gas se intercala un frasco lavador, perfectamente cerrado, que contiene una solución de hidróxido sódico al 20 % en peso, cuyo objetivo es retener el dióxido de carbono producido durante la digestión. El metano originado desplaza al agua del depósito, que cae en una probeta graduada. El volumen de agua así medido nos permite determinar el volumen de metano producido en cada experimento.

Figura 2. Digestor anaerobio semicontinuo.



4. Resultados

y discusión

Se realizaron experiencias de digestión anaerobia con residuos de la industria del tomate en modo continuo y en semicontinuo, con el objetivo de poder determinar el caudal óptimo para este sustrato, así como la influencia del dispositivo experimental en la producción de biogás y en el nivel de degradación alcanzado.

Las Tablas 4 y 5 muestran los resultados obtenidos en todas las experiencias realizadas. Para cada una de ellas, se presentan los valores medios y las desviaciones de cada uno de los parámetros de interés. A partir del análisis de estos parámetros se determinará el caudal óptimo de residuos de tomate para cada dispositivo experimental.

Comenzaremos analizando los resultados experimentales obtenidos al degradar anaeróbicamente los residuos de la industria del tomate en modo continuo, los cuales se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Resultados experimentales en régimen continuo.

EXPERIMENTO 1. TOMATE CAUDAL 500 ml/día. TRH 12 días			
PARÁMETRO	UNIDADES	MEDIA	DESVIACIÓN
pH		7,02	0,17
AGV	g CH ₃ COOH/l	No datos	No hay datos
Alcalinidad	g CaCO ₃ /l	1,35	0,37
SDV	g/l	1,29	0,27
SSV	g/l	7,42	3,78
DQO total	mg O ₂ /l	9.460,0	1.668,8
Reducción DQO sustrato	%	57,62	7,48
Biogás	m ³ biogás/m ³ sustrato día	6,10	0,95
Metano	m ³ biogás/m ³ sustrato día	4,57	0,71
EXPERIMENTO 2. TOMATE CAUDAL 600 ml/día. TRH 10 días			
PARÁMETRO	UNIDADES	MEDIA	DESVIACIÓN
pH		7,06	0,15
AGV	g CH ₃ COOH/l	0,58	0,06
Alcalinidad	g CaCO ₃ /l	1,43	0,37
SDV	g/l	1,02	0,20
SSV	g/l	5,59	1,67
DQO total	mg O ₂ /l	9.335,9	1.348,6
Reducción DQO sustrato	%	58,17	6,04
Biogás	m ³ biogás/m ³ sustrato día	5,45	0,83
Metano	m ³ biogás/m ³ sustrato día	4,11	0,62
EXPERIMENTO 3. TOMATE CAUDAL 700 mL/día. TRH 8,6 días			
PARÁMETRO	UNIDADES	MEDIA	DESVIACIÓN
pH		7,08	0,14
AGV	g CH ₃ COOH/l	0,60	0,39

Tabla 4 continuación: Resultados experimentales en régimen continuo.

EXPERIMENTO 3 continuación. TOMATE CAUDAL 700 mL/día. TRH 8,6 días			
PARÁMETRO	PARÁMETRO	PARÁMETRO	PARÁMETRO
Alcalinidad	g CaCO ₃ /l	1,28	0,13

SDV	g/l	1,10	0,38
SSV	g/l	4,54	3,43
DQO total	mg O ₂ /l	12.190,0	5.266,4
Reducción DQO sustrato	%	45,39	23,60
Biogás	m ³ biogás/m ³ sustrato día	5,31	0,99
Metano	m ³ biogás/m ³ sustrato día	3,98	0,74

EXPERIMENTO 4. TOMATE CAUDAL 750 mL/día. TRH 8 días

PARÁMETRO	UNIDADES	MEDIA	DESVIACIÓN
pH		6,99	0,18
AGV	g CH ₃ COOH/l	0,75	0,81
Alcalinidad	g CaCO ₃ /l	1,21	0,21
SDV	g/l	0,77	0,33
SSV	g/l	2,91	0,81
DQO total	mg O ₂ /l	10.160,0	1.149,4
Reducción DQO sustrato	%	54,48	5,15
Biogás	m ³ biogás/m ³ sustrato día	4,00	1,55
Metano	m ³ biogás/m ³ sustrato día	3,00	1,16

El pH se mantiene constante, en valores normales para el tomate en las tres primeras experiencias, para disminuir al introducir un caudal de 750 ml/día. La concentración de AGV se mantiene constante al ir aumentando el caudal de sustrato, mientras que la alcalinidad sufre un incremento al pasar de 500 a 600 ml/día para después disminuir paulatinamente hasta alcanzar el valor mínimo al alimentar 750 ml/día. El comportamiento de estos dos parámetros se traduce en un aumento progresivo de la relación AGV/alcalinidad, lo cual indica que la reacción es más inestable a medida que aumentamos el caudal de sustrato. Esta afirmación se corrobora al observar el descenso en la concentración tanto de SDV como de SSV al aumentar el caudal de entrada.

El nivel de degradación del sustrato aumenta al pasar de 500 ml/día a 600 ml/día, pero a partir de este caudal se observa un descenso en la reducción de la DQO del sustrato.

La producción de metano es similar en los caudales de 500 y 600 ml/día pero a partir de este se produce un ligero descenso en la producción, este comportamiento es debido a que la relación AGV/alcalinidad es mayor a la óptima para los caudales de 700 y 750 ml/día.

Debido a la evolución de estos dos parámetros, consideramos que el caudal óptimo para el sustrato de tomate en régimen continuo es de 600 mL/día, ya que permite conseguir la máxima degradación del sustrato, alcanzando una reducción de la DQO inicial de un 58,17±6,04%, así como una mayor estabilidad de la bioreacción con una producción de 4,11±0,62 m³ metano/m³ sustrato día, en un TRH de 10 días.

En modo semicontinuo se realizaron dos experiencias con residuos de la industria del tomate, alimentando caudales de 250 ml/día y de 270 ml/día. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Resultados experimentales en régimen semicontinuo.

EXPERIMENTO 5. TOMATE. CAUDAL 250 ml/día. TRH 8 días

PARÁMETRO	UNIDADES	MEDIA	DESVIACIÓN
pH		7,59	0,22
AGV	g CH ₃ COOH/l	0,45	0,02
Alcalinidad	g CaCO ₃ /l	1,93	0,15
SDV	g/l	1,27	0,04
SSV	g/l	7,96	0,34
DQO total	mg O ₂ /l	10.025,0	1.658,1
Reducción DQO sustrato	%	55,09	7,43
Biogás	m ³ biogás/m ³ sustrato día	12,91	2,79
Metano	m ³ metano/m ³ sustrato día	9,68	2,10

EXPERIMENTO 6. TOMATE. CAUDAL 270 ml/día. TRH 7,4 días

PARÁMETRO	UNIDADES	MEDIA	DESVIACIÓN
pH		7,15	0,25
AGV	g CH ₃ COOH/l	0,72	0,45
Alcalinidad	g CaCO ₃ /l	1,55	0,40
SDV	g/l	1,59	0,56
SSV	g/l	12,58	2,60
DQO total	mg O ₂ /l	10.605,0	2.534,7
Reducción DQO sustrato	%	52,49	11,36
Biogás	m ³ biogás/m ³ sustrato día	8,40	1,32
Metano	m ³ metano/m ³ sustrato día	6,30	0,99

Al digerir residuos de tomate en modo semicontinuo, no es posible introducir más de 270 ml/día sin que aparezcan signos de inhibición, es decir, sin que la reacción biológica se desestabilice, hasta llegar a ser incontrolable.

Si examinamos la Tabla 5, se observa como al aumentar el volumen de 250 ml/día hasta 270 ml/día, disminuye el pH de 7,59 hasta 7,15, que es un valor no recomendable para el residuo de matadero, pero que en el caso del tomate se demuestra que es un pH adecuado, ya que una vez alcanzado se mantiene constante. De hecho, otros autores como (Sarada y Joseph, 1996) han realizado experiencias de digestión anaerobia de tomate con valores de pH entre 6,9 y 7,2.

Al incrementarse el caudal alimentado también se observa un aumento en la concentración de ácidos grasos volátiles así como un descenso en la alcalinidad, pero sin llegar a niveles que puedan afectar a la biorreacción. Por otro lado, cabe destacar el aumento en los sólidos en suspensión volátiles, lo cual se debe no a un aumento en la población bacteriana sino a la presencia de una mayor cantidad de pepitas de tomate en el medio de reacción debido a su menor degradación.

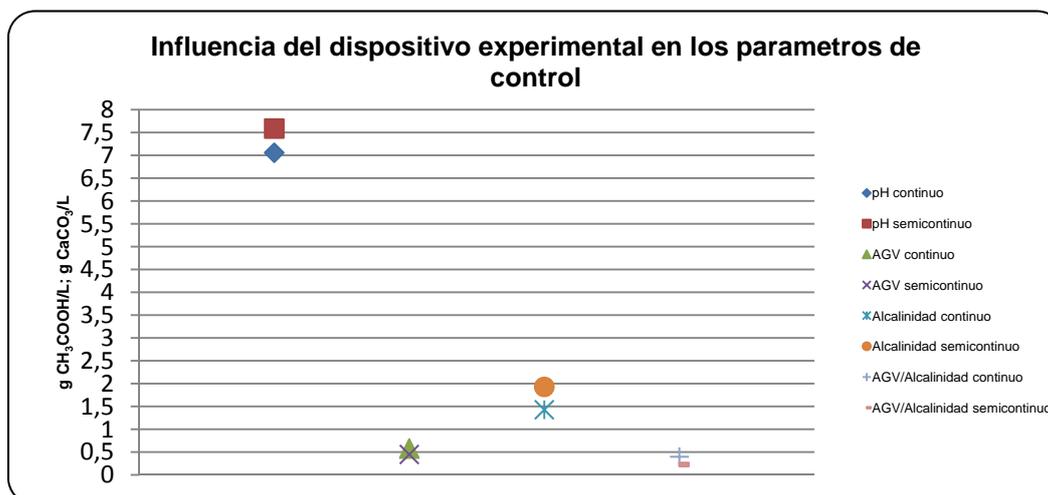
Por último, para determinar el volumen óptimo de alimentación desde el punto de vista económico y energético, examinaremos las producciones de biogás y los niveles de degradación alcanzados. Al incrementarse en 20 ml/día el caudal de sustrato se produce una disminución de un 35% en la producción de metano, así como una disminución de la reducción de DQO en el sustrato de casi un 5%. Estos datos unidos a sólo una disminución de 0,6 días en el TRH, nos lleva a pensar que es preferible degradar 250 ml/día, ya que

supone generar 9,68 m³ de metano/m³ substrato día y alcanzar un 55,09% de degradación del substrato con un TRH de 8 días.

Para determinar la influencia del dispositivo experimental en el proceso de digestión anaerobia de residuos de la industria del tomate, se compararán los valores óptimos obtenidos para cada parámetro en estudio al operar en régimen continuo y semicontinuo. De este modo será posible determinar si existen diferencias significativas entre ellos y evaluar cual de los dos dispositivos experimentales permite obtener unos mejores resultados desde el punto de vista medioambiental y energético.

La influencia del dispositivo experimental en los parámetros de control, se muestra en la Figura 3. Se puede observar como el pH del medio es mayor en el reactor semicontinuo, alcanzándose valores de 7,59 mientras que al operar en modo continuo el pH es de 7,06; por tanto existe una diferencia de 0,53. Aunque en las dos experiencias el pH se mantiene dentro del intervalo adecuado para llevar a cabo la digestión anaerobia, un pH mayor beneficia el desarrollo de las bacterias metanogénicas, por tanto, la metanogénesis se ve favorecida al trabajar con el dispositivo experimental semicontinuo.

Figura 3. Influencia del dispositivo experimental en los parámetros de control.



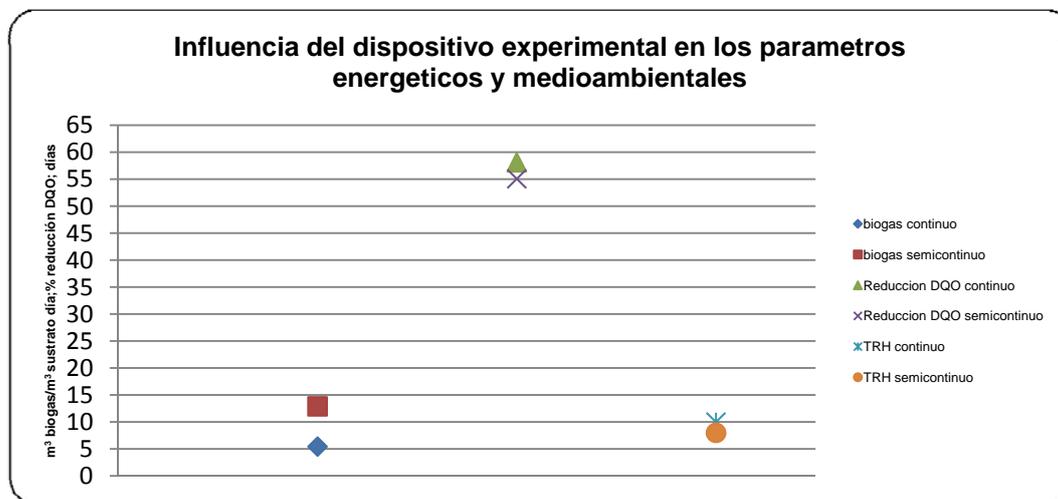
La concentración de ácidos grasos volátiles es ligeramente superior al operar en modo continuo (0,58 g CH₃COOH/l) que en semicontinuo (0,45 g CH₃COOH/l), pero no se puede considerar que exista una diferencia significativa. Mientras que la concentración de carbonato cálcico es mayor en modo semicontinuo, alcanzándose casi 2 g de CaCO₃/l frente a los 1,43 g CaCO₃/l en modo continuo. Esto hace que la relación entre estos parámetros alcance un valor de 0,4 en modo continuo y de 0,23 al operar en semicontinuo, por lo que esta diferencia ya si es significativa. Aunque ninguna de las relaciones es inhibitoria, la mayor relación existente en el medio al operar en modo continuo puede indicar una menor estabilidad del proceso, ya que al presentar una menor alcalinidad a la vez que una mayor concentración de AGV el medio presenta una menor capacidad tampón, por lo que si se produce un aumento significativo de la concentración de ácidos, el medio en modo continuo no presentará capacidad suficiente para evitar el descenso del pH y con él la inhibición de la bioreacción.

Una vez evaluados los parámetros de control, pasaremos a analizar la influencia del dispositivo experimental en los parámetros energéticos y medioambientales.

Como puede observarse en la Figura 4, operar en modo semicontinuo permite duplicar la producción de biogás, y disminuir el TRH en dos días; sin embargo, el nivel de degradación

del sustrato es menor que en modo continuo, alcanzando un 3% menos de reducción de la DQO inicial del residuo.

Figura 4. Influencia del dispositivo experimental en los parámetros energéticos y medioambientales.



Por tanto, se puede afirmar que la degradación de la DQO es mayor al operar en modo continuo, mientras que al trabajar con el dispositivo semicontinuo es posible obtener una mayor producción de biogás.

La mayor degradación del sustrato obtenida con el dispositivo continuo puede deberse a que en este modo de operación las condiciones de reacción son ligeramente más favorables para las bacterias hidrolíticas y acidogénicas (menor pH) y también puede deberse a la forma de introducir el sustrato en el reactor. En modo semicontinuo se alimenta el caudal óptimo una vez al día, todo al mismo tiempo; mientras que en modo continuo el alimento se introduce poco a poco a lo largo del día, lo que permite a las bacterias asimilar con mayor facilidad el sustrato.

Las mayores producciones de biogás obtenidas al operar en modo semicontinuo se deben a que los parámetros de control son más favorables para el desarrollo de las bacterias metanogénicas que en modo continuo, así el pH es ligeramente superior y la relación AGV/alcalinidad menor. Por otra parte, hay que tener en cuenta que las condiciones de operación (temperatura, agitación) se mantienen constantes con mayor facilidad que en el dispositivo continuo. Así, en modo semicontinuo la temperatura es homogénea en todo el reactor debido a que este se encuentra introducido en un baño termostático, mientras que el dispositivo continuo presenta un calentamiento mediante resistencias eléctricas instaladas en la parte inferior del reactor, lo que hace que inevitablemente exista un gradiente de temperatura en su interior. Además, hay que tener en cuenta que al estar más automatizado que el dispositivo semicontinuo existe una mayor probabilidad de que se produzcan fallos en los dispositivos que controla el autómat, así por ejemplo, se pueden producir atascos en las gomas de inyección de alimento, es posible que se rompa alguna goma que permite la difusión del biogás para agitación etc.

Finalmente, si evaluamos todos los parámetros en conjunto, se puede afirmar que el dispositivo experimental semicontinuo permite llevar a cabo de forma más estable la reacción biológica, permitiendo así una mayor producción de biogás.

5. Conclusiones

A continuación se enumeran las principales conclusiones obtenidas de este trabajo.

- 1.- Los residuos de la industria del tomate son aptos desde el punto de vista medioambiental y energético para ser tratados mediante digestión anaerobia.
- 2.- El pH del medio es mayor en las experiencias realizadas en el dispositivo semicontinuo que en el continuo.
- 3.- El nivel de degradación de DQO es mayor al operar con el dispositivo experimental continuo, mientras que la producción de biogás es mayor al operar con el dispositivo semicontinuo.
- 4.- La mayor degradación del sustrato obtenida con el dispositivo continuo puede deberse a la inyección del mismo de forma progresiva a lo largo del día, lo cual permite a las bacterias asimilar con mayor facilidad el sustrato y evitar acumulaciones de compuestos intermedios.
- 5.- En modo semicontinuo se obtienen mayores producciones de biogás debido a la mayor facilidad que presenta este dispositivo experimental para mantener constantes las condiciones de operación que en modo continuo.
- 6.- Se demuestra la importancia de los parámetros temperatura y velocidad de agitación en la producción de biogás.

Agradecimientos: Los autores agradecen al Ministerio de Educación y Ciencia (Fondos FEDER) la ayuda recibida para la realización de este trabajo a través del proyecto PSE-060000-2009-6. A. González-González agradece al Ministerio de Educación y Ciencia la concesión de la beca FPU. Referencia AP2008-02546.

6. Bibliografía

- Alvarez R, Lidén G. (2008). Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure, and fruit and vegetable waste. *Renewable Energy*. 33, 726-734.
- APHA, AWWA, WPCF. (1992). "Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales" Díaz de Santos S.A. Madrid.
- Borja R, Rincón B, Raposo F, Alba J, Martín A. (2002). A study of anaerobic digestivity of two-phases olive mill solid waste (OMSW) at mesophilic temperature. *Process Biochemistry*. 38 (5), 733-742.
- Bouallagui H, Haouari O, Touhami Y, Ben Cheikh R, Marouani L, Handi M (2004). Effect of temperature on the performance of an anaerobic tubular reactor treating fruit and vegetable waste. *Process Biochemistry*. 39 (12), 2143-2148.
- Bouallagui H, Touhami Y, Ben Cheikh R, Handi M.(2005). Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. *Process Biochemistry*. 40 (3-4), 989-995.
- Cuadros F, López-Rodríguez F, Ruiz-Celma A, Rubiales F and González-González A. (2011). Recycling, reuse and energetic valuation of meat industry wastes in Extremadura (Spain) *Resources, Conservation and Recycling* 55 (4), 393-399.

Ergüder TH, Güven E, Demirer GN. (2000). Anaerobic treatment of olive mix wastes in batch reactor process. *Process Biochemistry*. 36 (3), 243-248.

Hejnflét A, Angelidaki I. (2009). Anaerobic digestion of slaughterhouse by products. *Biomass and Bioenergy*. 33, 1046-1054.

Izumi, K., Okishio, Y., Nagao, N., Niwa, C., Yamamoto, S., Toda, T. (2010). Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 64, 601-608.

Lay JJ, Li YY, Noike T. (1997). Influence of pH and moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion. *Water Research*. 31 (10), 1518-1524.

Masse L, Masse DI, Kennedy. (2003), Effect of hydrolysis pretreatment on fat degradation during anaerobic digestion of slaughterhouse wastewater. *Process Biochemistry*. 38 (9), 1365-1372.

Meher KK, Panchwagh AM, Rangrass S, Gollakota KG. (1995). Biomethanation of tobacco waste. *Environmental Pollution*. 90 (2), 199-202.

Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (2010, Octubre). *Avances de superficies y producciones agrícolas*. Obtenido Marzo 03, 2011, from: http://www.mapa.es/estadistica/pags/superficie/Avances_Cultivos_2010-10.pdf

Murto M, Björnsson L, Mattiasson B. (2004). Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure. *Journal of Environmental Management*. 70, 101-107.

Panichnumsin P, Nopharatana A, Ahring B, Chaiprasert P. (2010). Production of methane by co-digestion of cassava pulp with various concentrations of pig manure. *Biomass and Bioenergy*. 34, 1117-1124.

Rosenwinkel KH, Meyer H. (1999), Anaerobic treatment of slaughterhouse residues in municipal digesters. *Water Science and Technology*. 40 (1), 101-111.

Sarada R, Joseph R. (1994). Studies on factors influencing methane production from tomato-processing waste. *Bioresource Technology*. 47, 55-57.

Sarada R, Joseph R. (1996). A comparative study of single and two stage processes for methane production from tomato processing waste. *Process Biochemistry*. 31, 337-340.

Yen HW, Brune DE. (2007). Anaerobic co-digestion of algal sludge and waste paper to produce methane. *Bioresource Technology*. 98, 130-134.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Almudena González González. Becaria FPU Departamento Física Aplicada. Facultad de Ciencias. Universidad de Extremadura.

Phone: +685764503

E-mail: almudenagg@unex.es