

Modelo matemático para la generación de gas metano por tratamiento anaeróbico de vinaza en proceso semi continuo

Mathematical model for the generation of methane gas by anaerobic treatment of vinasse in a semi-continuous process

 Víctor M. Terry Calderón  Luis Taramona Ruiz  José Candela Díaz

Universidad Le Cordon Bleu. Lima, Perú.¹

Universidad Nacional Federico Villareal. Lima, Perú.²

Resumen

En el presente trabajo de investigación se planteó realizar un modelo matemático macroscópico en tiempo continuo, para la Biodegradación de la vinaza, así mismo utilizando el principio de la masa se diseña una matriz para el cálculo de la relación $C/N = 30$. En trabajos anteriores se logró consolidar que el proceso de Biodegradación seguía una ecuación cinética de orden uno ($n=1$), lo cual sirvió para determinar el valor de la constante de velocidad de Biodegradación de la DO_5 , cuyo valor promedio se obtuvo en el bioreactor de volumen 3,5 l, trabajando a un pH:7, debidamente tamponado y con inóculo formado por 20 g. de heces de cuy, a una temperatura de 40 °C, lo cual nos dio en promedio un valor de $k= 0,340$ (1/h). Este valor sirvió para aplicar a la ecuación diseñada tomando los mismos parámetros de biodigestor y para una carga $F= 0,7$ l/h, y un tiempo de 20 horas obteniéndose los resultados que se aprecian en la Figura 4. Posteriormente se da inicio a un ensayo en proceso continuo, con los mismos parámetros tratando vinaza neutralizada (18 litros) y obteniendo en 20 horas (14 litros de biogás).

Palabras clave: Vinaza, biodegradación, modelo matemático.

Abstract

In this research work was raised to make a macroscopic mathematical model in continuous time, for the biodegradation of stillage, likewise using the beginning of the mass is designed a matrix for the calculation of the ratio $c/n = 30$. In previous works was achieved to consolidate the process of biodegradation was a kinetic equation of order one ($n = 1$), which served to determine the value of the rate constant of biodegradation of the DO_5 , whose average value was obtained in the properly buffered 3.5 l, a pH:7, working volume bioreactor with inoculum formed by 20 g. Lee of Guinea pig, at a temperature of 40 °C, which gave us on average a value of $k = 0,340$ (1) this value was used to apply the designed equation taking parameters of bio-digester and a load $F = 0.7$ l/h, and 20 hours obtaining results that can be seen in Figure 4. Then starts a test in

Recibido:
Febrero 2020

Aceptado:
Mayo 2020



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

DOI: <https://doi.org/10.46908/rict.v3i1.69>

continuous process, with the same parameters trying vinasse neutralized (18 litres) and getting in 20 hours (14 liters of biogas).

Keywords: Vinasse, biodegradation, mathematical model.

INTRODUCCIÓN

En la primera parte del proyecto realizado en 2012, se consiguió experimentar la generación de gas metano, con la evaluación de algunos parámetros, como fue la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), el valor del pH, el contenido de acidez, la operación de neutralización de la vinaza, y la dilución que este efluente puede tener así como la temperatura de trabajo y empezar con la generación de gas metano en la muestra enviada por la fábrica que produce etanol, a partir del jugo de caña de azúcar fermentada. Terry V et al (2012).

La metanización, o degradación anaerobia de los efluentes, es una tecnología muy eficiente para remover la carga de las vinazas. Permite remover más de 90 % de su DBO, aunque solo unos 70 % de su DQO (Demanda Química de Oxígeno), pues una parte de la DQO está en forma "dura" (no biodegradable); esta fracción es muy baja cuando la materia prima es jugo de caña, muy alta cuando es melaza, e intermedia cuando se utiliza miel A o miel B, (Conil, 2011).

Dentro del bioreactor ocurre la digestión anaerobia de la materia orgánica. Este proceso se realiza por etapas. En la primera etapa se produce la hidrólisis o rompimiento de las cadenas poliméricas en compuestos más sencillos a nivel de monómeros, cuyo tamaño permite el paso a través de la membrana celular. En la segunda etapa, los monómeros productos de la hidrólisis, son entonces reducidos a ácidos grasos volátiles, CO_2 y H_2 mediante un proceso intracelular de oxidación-reducción. Estas reacciones son posibles por la acción catalizadora de un grupo de bacterias llamadas fermentativas o acetogénicas. En una tercera etapa otro grupo de bacterias denominadas acetogénicas transforman los anteriores compuestos en acetato, produciendo también CO_2 y H_2 . Finalmente en la cuarta

etapa, otro grupo de bacterias, las metanogénicas, cumplen la función de transformar el acetato en metano. Además de metano, amoníaco, hidrógeno y ácido sulfhídrico, aunque en concentraciones inferiores. Todos estos gases son los que conforman el biogás. (Bermúdez, 2011).

El objetivo del presente es determinar el modelo matemático de la fermentación metánica, para simular la biodegradación de la vinaza una temperatura de 40°C, considerando como varía la concentración del sustrato, empleando el principio de conservación de la materia en el estado inestable, a nivel macroscópico (Himmelbau D (2000)). Y utilizando el análisis de regresión (Quezada L 2010) obtener los valores de las constantes de biodegradación (k), considerando que estos procesos de biodegradación siguen una reacción de orden uno ($n=1$), Terry V. et al (2013).

MATERIALES Y MÉTODOS

Ámbito temporal y espacial del estudio

La investigación se realizó en el Laboratorio de Tecnología de alimentos de la Facultad de Oceanografía, Pesquería, Ciencias Alimentarias y Acuicultura, de la Universidad Nacional Federico Villarreal, lugar donde se realizarán los ensayos respectivos. La investigación efectuada es cuantitativa, basada en ensayos de experimentación de causa efecto, debiendo demostrarse las relaciones entre las variables: dependiente (variación de la concentración de la DBO5), independiente (tiempo) y intervinientes (temperatura).

Población y muestra

Población

La empresa azucarera, establecida en el Norte del País y que dentro de sus rubros produce azúcar y también etanol enviara

las muestras respectivas de vinaza para el desarrollo del presente proyecto de investigación. El Universo es la cantidad de vinaza que vierte a sus desagües después de haber obtenido el Etanol. La producción de etanol debe llegar a 800 mil litros diarios y considerando una producción anual de 240 000 litros al año, según informe de la Sociedad Nacional de Industrias (SIN).

La muestra

Se recepción en el Laboratorio de Tecnología de Alimentos de la Facultad de Oceanografía, Pesquería, Ciencias Alimentaria y Acuicultura de la Universidad Nacional Federico Villarreal, cuatro envases conteniendo 10 litros de vinaza, enviados de producciones diferentes, lo que constituyen cuatro muestras para el trabajo de investigación. Basándonos en la población y utilizando el modelo aleatorio simple y una población infinita se determina el tamaño de muestra. Siendo la ecuación:

$$n = \frac{z^2 \cdot p \cdot q}{d^2}$$

n: el tamaño de la muestra

z: es el margen de confiabilidad a un nivel de 95 % de confianza $z = 1,96$

d: es el error o diferencia máxima entre la media muestra y poblacional que está dispuesto a aceptar con el nivel de confianza que se ha definido. d. 10%

p: el nivel de confianza con la cual se va a trabajar es del 95 % debido a que todos los parámetros de experimento están controlado por ser a nivel de laboratorio.

q: el margen de error que no ocurra, se considera a 5% por causa imprevista.

$$n = \frac{1,96^2 \times 0,05 \times 0,95}{0,9^2}$$

$$n = 22$$

Se requiere 22 litros de muestra para el desarrollo experimental

La unidad experimental

La unidad experimental estuvo conformada por:

- Vinaza neutralizada hasta un pH 7
- Solución tampón de acetato
- Heces de cuy

Los materiales fueron colocados en un bioreactor (frasco decantador de vidrio pírax con una capacidad de 3,5 litros) el cual está conectado a un gasómetro con lo cual se asegura que el equipo esta hermético y mantiene las condiciones anaeróbicas. El biorreactor fue colocado en un baño de agua caliente, controlado por un termostato, que mantiene la temperatura programada (T: 40 C).

Análisis de la vinazas

Los instrumentos de medición son los métodos de análisis químico certificado y que debidamente acreditado por la autoridad competente del sector del medio ambiente del Perú, los cuales son derivados de la *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Fifteen Edition. APHA. AWWA. WPCF. pp. 90 - 9, 1981. William Horwitz, Editor Associat*, comprende los siguientes análisis:

Demanda Bioquímica de Oxígeno: La **demanda 'bioquímica' de oxígeno** (DBO), es un parámetro que mide la cantidad de materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene la vinaza. Se utiliza para medir el grado de contaminación, normalmente se mide transcurridos cinco días de reacción (DBO₅). Es un instrumento utilizado en el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales.

Determinación del pH: El **pH** es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución, para nuestro caso se requiere que el proceso de biodegradación anaeróbica se mantenga en un rango de 6,5 a 7.

Determinación de sólidos totales: se define como toda la materia que queda como residuo de evaporación a 105° C. Es un parámetro de medida de tratamiento de aguas residuales y evalúa la cantidad de material que fue degradado.

Determinación del contenido de acidez: medida volumétrica con NaOH 0,1 N, cuyos resultados se expresan en % de acidez para el caso como ácido acético.

Estos valores se determinaron antes del inicio del ensayo, y al terminar el proceso de digestión anaeróbica, observándose la reducción de la

DBO5 conocimiento del pH, es vital en una operación de digestión anaeróbica, ya que esta solo sucede en un rango cercano a un pH: 7,00; para un pH menor el proceso se detiene, así como para un pH mayor a 7, la operación se suspende.

Las respuestas a las variables dependientes implican lo siguiente:

- Contenido de la DBO5 (mg/l), en función del tiempo, determinado a la temperatura T: 40 °C.

El proceso de biodegradación se muestra en el siguiente diagrama de flujo, lo cual sirvió para la determinación de las constantes de velocidad de biodegradación, k (1/hora).

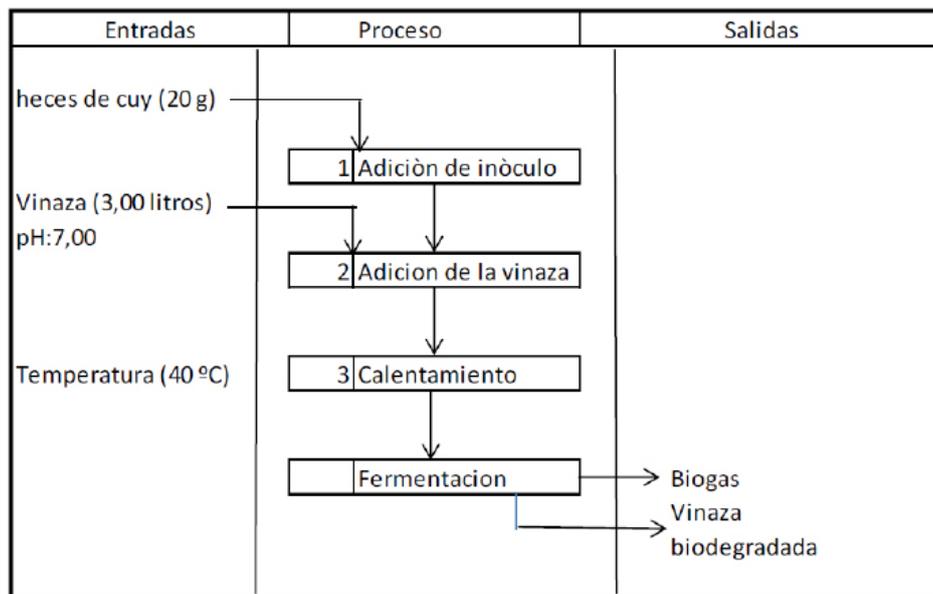


Figura 1. Diagrama de flujo para establecer las operaciones de trabajo

Tabla 1. Descripción de las operaciones de biodegradación de la vinaza

Nº	Operación	Descripción
1	Adicionar el inóculo	20 g de heces de cuy
2	Acondicionar la temperatura del equipo	Temperatura 40 °C
3	Adicionar la vinaza	3,0 litros de vinaza
4	Fermentación	Operación en función del tiempo

Planteamiento del modelo

Se desarrolló un modelo matemático basado en el primer principio de la conservación de la materia lo que nos permite realizar predicciones del comportamiento de la vinaza

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} - \text{Consumo} = \text{Acumulación}$$

Lo cual nos lleva a deducir el modelo, para la bioconversión de la vinaza por degradación anaeróbica, aplicando los dos primeros términos de la serie de Taylor, Himmelbau D (2000)

Partiendo del modelo físico se plantea la ecuación diferencial

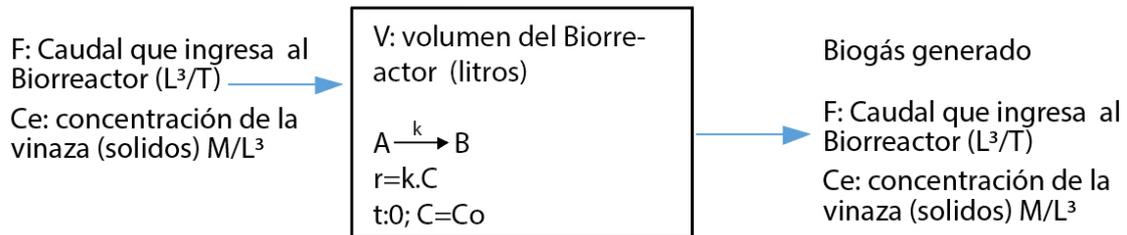


Figura 2. Modelo físico que interpreta el proceso de Biodegradación

- F: es el caudal de la vinaza que ingresa al Biorreactor
- C_e: concentración de la vinaza el al ingresar al Biorreactor
- C_s: concentración de la vinaza al salir del Biorreactor después de un tiempo de residencia
- V: el volumen del Biorreactor
- k: la constante de biodegradación
- r: ratio de la biodegradación del sustrato contenido en la vinaza para una ecuación de primer orden dentro de la cinética química

Tabla 2. Aplicando los criterios de la serie de Taylor

Entrada (E)	t	$t+\Delta t$
Flujo masico	$F.C_e$	$F.C_e + \frac{d(F.C_e)}{dt} \Delta t$
Salida (S)	t	$t+\Delta t$
Flujo masico	$F.C$	$F.C + \frac{d(F.C)}{dt} \Delta t$
Acumulado (A)	t	$t+\Delta t$
Masa	$V.C$	$V.C + \frac{d(V.C)}{dt} \Delta t$
Consumo (C)	t	$t+\Delta t$
Ratio de consumo	$k.VC$	$k.VC + \frac{d(k.VC)}{dt} \Delta t$

$$C = \frac{C_e}{\frac{F}{V} + k} \left[\frac{F}{V} + k.e^{-\left(\frac{F}{V} + k\right)t} \right]$$

Activa
Ve a cor

La ecuación permite simular como varia la DBO en un proceso continuo

Algoritmo para el para establecer las ecuaciones

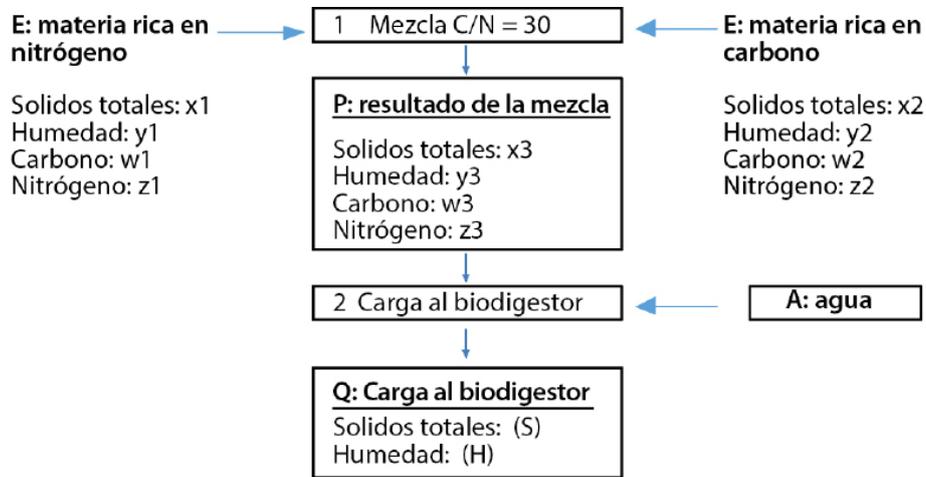


Figura 3. Algoritmo para establecer la ecuación para el cálculo de Carbono y nitrógeno de los componentes (C/N=30)

Modelo que nos permite obtener la matriz para poder obtener los valores de la carga y el inóculo para un C/N=30

$$\begin{bmatrix} x1 & x2 & 0 \\ (w1 - 30.z1) & (w2 - 30.z2) & 0 \\ y1 & y2 & 0.97.Q \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0,03Q \\ 0 \\ 0,97.Q \end{pmatrix}$$

RESULTADOS

La vinaza decepcionada en 4 envíos desde la fuente de origen, presentan los análisis que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Caracterización de la vinaza

Código	pH(20 °C)	%acidez	% solidos	% agua	DBO5 mg/l	Carbono %C *
M-1	3,44	0,35	4,59	95,41	26 050	1,683
M-2	3,50	0,72	4,27	95,73	27 0850	1,565
M-3	3,60	1,52	4,51	95,49	29 450	1,653
M-4	4,42	2,32	4,29	95,71	17 600	1.573

*El contenido promedio de carbono en las heces de cuy son del orden del 22% sobre una bases de 60% de sólidos, cuyo equivalente (22/60) según

La composición de las heces de cuy en valores de nitrógeno, fosforo y potasio (NPK) está en la tabla 4.

Tabla 4. Análisis de las heces de cuy sobre base seca (NPK)

Componente	Nitrógeno (% N)	Fosforo (%P2O5)	Potasio (% K2O)
valores	1,70	1,50	4,00

Calculo de la relación de carbono y nitrógeno para las heces del cuy

Tabla 5. Relación carbono / nitrógeno para las heces de cuy

Componente	Carbono (%C)	Nitrógeno (%N)	Humedad (% Hd)	Solidos (%solidos)	Relación (C/N)
valores	35,4	1,86	17,4	82,54	19

Se proyectó 4 ensayos de biodegradación con cada uno de los lotes enviados desde la fuente de producción, siguiendo los parámetros encontrados en investigaciones anteriores. Para determinar cómo varía la DBO5 en función del

tiempo, para cada una de las muestras, como se muestra en la tabla 6

Volumen de bioreactor : 3,5 litros

pH : 7

Temperatura : 40 °C

Tabla 6. Resultados del proceso de bioconversión

tiempo (hora)	Muestra DBO ₅ mg/l			
	M-1	M-2	M-3	M-4
0	26050	27850	29450	17600
3	12300	13780	15231	9328
5	5210	4177,5	5301	2992

Con los resultados se realizó un análisis de regresión utilizando el modelo cinético de orden uno (n=1), evaluándose los valores de las constantes de velocidad de bioconversión (k, 1/h).

como los respectivos resultados del análisis de regresión para el modelo exponencial:

$$DBO_5 = Co.e^{-k.(t)}$$

En la figura 3, se muestran las respectivas curvas de Biodegradación de las 4 muestras, así

DBO5: valor de la demanda bioquímica de oxígeno en mg/l

Co: concentración inicial del sustrato en términos de la DBO5 mg/l

k: constante de velocidad de deterioro 1/h
t: tiempo de fermentación

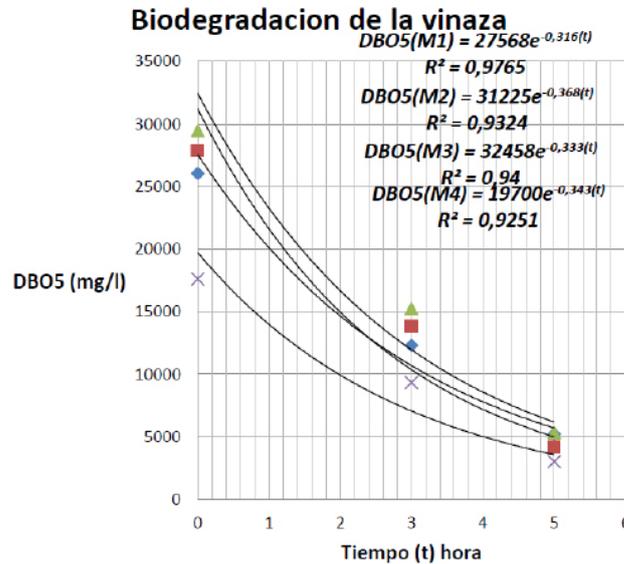


Figura 4. Las curvas de biodegradación de las vinazas

En la tabla 7, se muestran los valores obtenidos de las constantes de velocidad (k) Para cada una de las muestras.

Tabla 7. Resultados del análisis de regresión para cada muestra obteniéndose el valor de la constante de biodegradación (k)

Muestra	Valor k (1/h)
M1	0,316
M2	0,368
M3	0,333
M4	0,343

En la tabla 8, se encuentra valor de la constante (k) promedio con un coeficiente de va-

riabilidad CV: 6,39 %, que nos indica un valor muy bueno, para ser utilizado.

Tabla 8. Valores promedio del valor de la constante de velocidad de biodegradación (k)

Promedio (k) 1/h	0,340
Desviación estándar	0,02174
Coefficiente de variabilidad (C.V)	6,39 %

Por lo cual se trabajó con un valor $k= 0,340$ 1/h (promedio) reemplazando en la ecuación diseñada .

Considerando que tiempo de residencia observando en los trabajos anteriores fueron de 5 horas, la carga F será (3,5 l/5 horas) dando un valor de 0,7 (l/h)

Aplicando el modelo deducido de variación de la concentración de la vinaza en función del tiempo en un modelo continuo.

$$C = \frac{Co}{\left[\frac{F}{V} + k\right]} \left[\frac{F}{V} + k \cdot e^{-\left(\frac{F}{V} + k\right)t} \right]$$

- Co: Concentración inicial de DBO5 : 26 000 mg/l
- F: Carga al bioreactor : 0,7 (l/h)
- V: Volumen del bioreactor : 3,50 l
- k: constante de la velocidad de de biodegradación : 0,340 (1/h)
- t: tiempo de proceso : 20 h

Proceso de simulación utilizando la ecuación diseñada

tiempo(t) h	C (DBO5) mg/l
0	26000,0
1	23032,6
2	20603,0
3	18613,9
4	16985,3
5	15652,0
6	14560,3
7	13666,5
8	12934,8
9	12335,6
10	11845,1
11	11443,5
12	11114,7
13	10845,5
14	10625,1
15	10444,7
16	10296,9
17	10176,0
18	10076,9
19	9995,8
20	9929,5

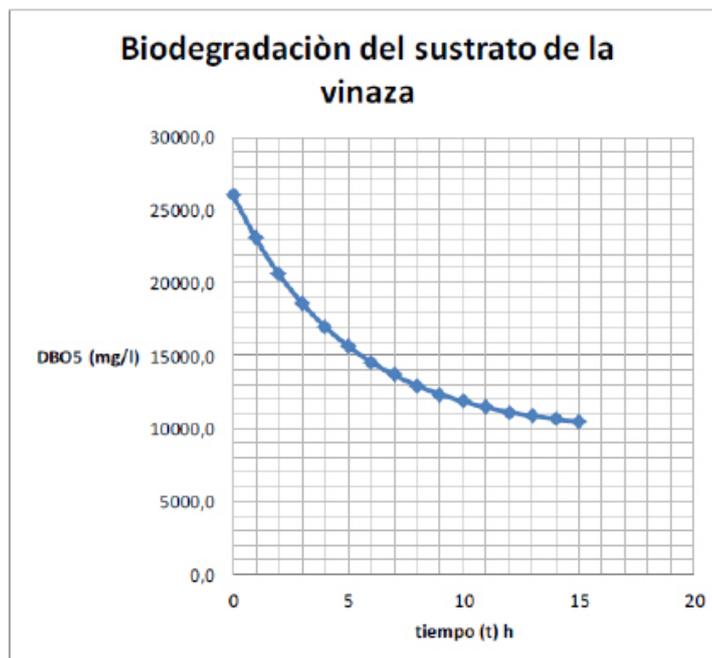


Figura 5. Proceso de simulación utilizando la ecuación de diseño

Ensayo para un proceso continuo

El algoritmo del procedimiento se muestra en la siguiente figura 5, donde se observa los procedimientos utilizados para el tratamiento de la vinaza en continuo.

Adicionando 0,7 l/h, y al cabo de 5 horas de operación cumplió con el tiempo de retención inicial, la operación duro 20 horas.

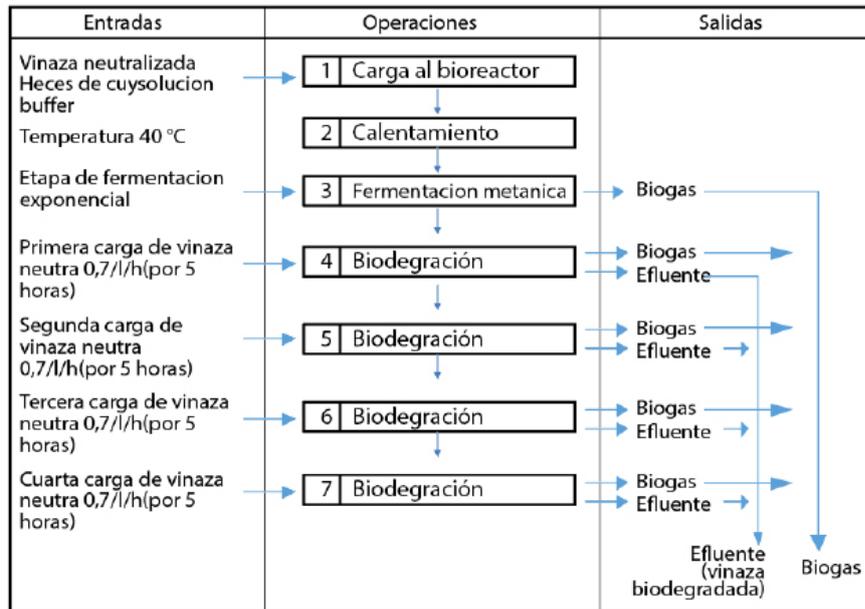


Figura 6. Proceso de biodegradación de la vinaza continuo

Se organizó dos gasómetros conectados al biorreactor donde se almacena el biogás generado, el biorreactor se colocó en el sistema de calentamiento a una tempe-

ratura $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$, la carga se va adicionando en cuando el sistema entra en una fermentación Volumen del Biorreactor: 3,5 l C/N: 30

- Carga al biorreactor : 0,7 l/h
- Tiempo de trabajo : 20 h
- Descarga de la vinaza agotada : 0,7 l/h
- Concentración de la vinaza (con buffer) : 4,5 %
- pH : 7,00
- EL Consumo de vinaza en 20 horas fue 14 litros .El biogas acumulado: 18 litros



Figura 7. Sistema integrado de fermentación continúa

El proceso de fermentación mecánica donde se adicionaba la carga 0,7/h



Figura 8. El bioreactor en fermentación exponencial



Figura 9. Bioreactor en fermentación exponencial



Figura 10. El sistema recepcionado el biogás generado

El proceso de acopio de biogás en un proceso continuo



Figura 11. Biogás colectado después de 20 horas

DISCUSIÓN

De acuerdo a Himmelbau D. (2000) y considerando los modelos estadísticos de regresión (Quezada L. 2010), se planteó los modelos matemáticos para simular en continuo la biodegradación de la vinaza y para el cálculo de la relación que existe entre $C/N=30$. Los cuales fueron utilizados para los respectivos cálculos que se observa en la figura 4, previamente se determinaron experimentalmente los valores de la constante de biodegradación del sustrato, en términos de DBO_5 , obteniéndose los resultados presentados en la tabla 7 y tabla 8. Los cuales se reemplazaron en la ecuación del modelo obteniéndose el resultado que se observa en la figura 4.

Con estos resultados se plantea un modelo físico en continuo de acuerdo al algoritmo presentado en la figura 5, donde se trabajó a razón de 0,7 l/h, para un tiempo de residencia de 5 horas. En las figuras 6,7,8,9, y 10 se registra el procedimiento utilizado de acuerdo al algoritmo planteado. Con lo cual el modelo macroscópico planteado sobre las bases de un procedimiento continuo, toman validez para el proceso de biodegradación de la vinaza, que se comprueba en la prueba continua.

CONCLUSIONES

En un biorreactor a nivel de laboratorio se consiguió la acumulación de biogás mediante una alimentación semicontinuo.

Basado en modelo cinéticos de primer orden se pudo diseñar un modelo que permita interpretar la cinética de biodegradación de la vinaza en un biorreactor semicontinuo, lo cual fue también demostrado mediante los ensayos de laboratorio. Este modelo permite simular la biodegradación de la vinaza en función del tiempo.

Se estableció un modelo para determinar la proporción entre Carbono / Nitrógeno que requiere la biodegradación de la vinaza.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bermúdez at al., (2011), *Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de Residuales para la obtención de Biogás*, Centro de Estudios de Biotecnología Industrial, Universidad de Oriente, disponible en: <http://www.uo.edu.cu/ojs/index.php/tq/article/viewFile/2070/1617>

Conil P(2010), *Manejo de Vinazas: Metanización y Compostaje, Aplicaciones Industriales*,

disponible en:

www.ciat.cgiar.org/.../061122_Tratamiento_de_Vinazas-N_Marriaga.pdf

Himmelbau D (2000) *Analisis y Simulacion de Procesos*. Editorial Reverte, S.A. España *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Fifteen Edition. APHA. AWWA. WPCF. pp. 90-9, 1981. William Horwitz, Editor Associat Pedro Lezcano y Luís M. Mora Plezcano @ica.co.cu y lmora@co.cu Instituto de Ciencia Animal, apdo.24. San José de las Lajas, La Habana, Cuba.

Quezada L (2010) **Estadística para Ingenieros**, Empresa editor Macro, Perú.

Terry V at al (2013) *Estructura del modelo Matemático generación de gas metano por tratamiento anaerobico de vinaza*, informe de investigación UNFV Focpa.

Terry V at al (2012). *Tratamiento anaeróbico de las vinazas derivadas de la industria del destilado de azúcar fermentada a nivel de laboratorio* Informe de Investigación UNFV Fopca.

CORRESPONDENCIA:

Dr. Victor Terry Calderón
victor.terry@ulcb.edu.pe