

PRODUCCIÓN DE METANO EN REACTORES MONOFÁSICO Y BIFÁSICO UTILIZANDO AGUA MODELADA DE CAFÉ SOLUBLE

METHANE PRODUCTION IN SINGLE PHASE AND BIPHASE REACTORS USING MODELED SOLUBLE COFFEE WATER

Mabel Leonela Laz Mero^{1,2}, Miguel Alejandro Tuárez Párraga^{1,3}, Dennys Lenin Zambrano Velásquez¹, Rosa Alexandra Córdova Mosquera²

¹Posgrado Agroindustria. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria Manabí. Sitio El limón, Calceta, Manabí – Ecuador

²Universidad Técnica de Manabí, Av. Urbina y Ché Guevara. Portoviejo, Manabí – Ecuador

³La Fabril S.A. Ubicación: Montecristi, Km 5 ½ vía Manta, Manabí - Ecuador

Email: mabel_laz@hotmail.com

Información del artículo

Tipo de artículo:
Artículo original

Recibido:
18/02/2021

Aceptado:
15/12/2021

Licencia:
CC BY-NC-SA 4.0

Revista
ESPAMCIENCIA
12(2):84-94

DOI:
https://doi.org/10.51260/revista_espamciencia.v12i2.243

Resumen

El objetivo de la presente investigación fue establecer la producción de metano en reactores con Sistema Monofásico (SM) y Sistema Bifásico (SB) utilizando como sustrato agua modelada de la industria de café soluble, con una demanda química de oxígeno (DQO) de 7,5 g/L, considerado como un residuo con alta carga orgánica. Las pruebas de laboratorio se realizaron en reactores provistos con filtro anaeróbicos de flujo ascendente (FAFA), evaluando parámetros de: pH, relación entre ácidos grasos volátiles y alcalinidad (FOSTAC), remoción DQO, concentración y rendimiento de metano, aplicando métodos normalizados para el análisis de aguas residuales descrita por APHA y WPCF, 2012. En la variable rendimiento el SM mostró valores promedios de 0,15 dm³ CH₄/gDQO en comparación a los exhibidos por el SB con valores promedios de 0,26 dm³ CH₄/g DQO, los rangos de operación del SB fueron: pH (6,38-8,0), FOSTAC (0,42-0,60), AGV(160-423 mg/l), remoción DQO (61-85%); donde se comprobó estadísticamente que las producciones de metano en los sistemas evaluados difieren significativamente (p<0,05), evidenciando que en el SB se incrementó los valores promedios de producción de metano del 70% en relación al SM.

Palabras clave: Agua modelada, sistemas de reactores, rendimiento de metano

Abstract

The objective of this research was to establish the production of methane in reactors with a Single-Phase System (SM) and a Two-Phase System (SB) using modeled water from the soluble coffee industry as a substrate, with a chemical oxygen demand (COD) of 7,5 g/L, considered as a residue with a high organic load. The laboratory tests were carried out in reactors equipped with an up flow anaerobic filter (FAFA), evaluating parameters of: pH, relationship between volatile fatty acids and alkalinity (FOSTAC), COD removal, concentration and methane performance, applying standardized methods for the wastewater analysis described by APHA and WPCF, 2012. In the performance variable, the SM showed average values of 0.15 dm³ CH₄ / gDQO compared to those exhibited by the SB with average values of 0.26 dm³ CH₄/g COD, the SB operating ranges were: pH (6.38-8.0), FOSTAC (0.42-0.60), AGV (160-423 mg / l), COD removal (61-85%); where it was statistically verified that methane productions in the evaluated systems differ significantly (p <0.05), showing that in the BS the average methane production values increased by 70% in relation to the SM.

Keywords: Modeled water, reactor systems, methane performance.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la bebida de café es un paradigma a nivel mundial, incrementando su consumo en países desarrollados (Murthy y Naidu, 2012); hasta el 50% de su producción desde los años 1990 hasta el 2015. Por tal motivo, países como Brasil, Vietnam, Colombia, Indonesia y Etiopía lideran la producción mundial de este fruto, llegando a cosechar hasta 2 594 100 kilogramos en el año 2015 en Brasil (Lazcano, 2015).

Yáñez (2018) manifiesta que la superficie del Ecuador para el cultivo de café abarca aproximadamente el 30% de su territorio nacional, siendo así que, Ecuador es el cuarto exportador sudamericano más grande de café soluble a Rusia (El Telégrafo, 2017).

Por consiguiente, el café es el segundo producto más vendido en el mundo después del petróleo, por lo cual se genera gran cantidad de desperdicios durante su producción, a esto se suma que existe un tercio de la producción mundial de alimentos que se desperdician (Restrepo *et al.*, 2011), constituyendo una fuente de contaminación hacia las reservas de agua, lo que representa el 9,6% de las emisiones mundiales de CO₂ (Fisgativa *et al.*, 2017).

Producto de aquello, la industria cafetera utiliza grandes cantidades de agua durante su procesamiento, estimando de 40 a 45 L de vertido residual por kilogramo de café procesado (Blinová *et al.*, 2017). Los efluentes contienen alta carga orgánica, obteniendo desechos o subproductos definidos mundialmente como un problema debido a la falta de conocimientos sobre su adecuado tratamiento (Vargas y Pérez, 2018); (Saval, 2012).

Por estas razones, durante los últimos años ha existido un creciente interés en el desarrollo y/o la optimización de tecnologías para el aprovechamiento de los residuos con alta carga orgánica generados por las empresas agroindustriales procesadoras de café, en países industrializados como Brasil y en vías de desarrollo como Colombia.

Inclusive, se oferta una alternativa tecnológica atractiva como la DA, en la cual se obtiene producto como el metano con capacidad energética y lodos con propiedades fertilizantes (Mussatto *et al.*, 2011). Podemos recalcar lo mencionado por Ramírez (2012); Peñaranda *et al.*, (2017) quienes afirman que el aprovechamiento de estos residuos es una alternativa que impulsa el desarrollo de tecnologías, orientadas hacia una transformación sustentable de los recursos naturales (Rosas *et al.*, 2016).

Por tal motivo, la digestión anaerobia ofrece una oportunidad viable de aprovechamiento de estos residuos

orgánicos mediante un proceso de degradación bioquímica en ausencia de oxígeno (González *et al.*, 2015). Según FAO (2013) y González (2009) argumentan que la bioenergía se obtiene a base de desechos orgánicos agroindustriales; siendo esta, una manera de aprovecharlos mediante procesos biotecnológicos (Chen *et al.*, 2008); proponiendo de esta manera aportes y pertinencias al sector agroindustrial.

El presente estudio tiene como objetivo establecer la producción de metano en reactores con Sistema Monofásico (SM) y Sistema Bifásico (SB) para posteriormente compararlos entre sí; por consiguiente, se realizaron los respectivos análisis de pH, FOSTAC, AGV, remoción DQO, rendimiento y concentración de metano.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en el laboratorio de Operaciones Unitarias y en el Laboratorio de Análisis Químico y Biotecnológico de la Universidad Técnica de Manabí. Para la aplicación de la metodología utilizada en la investigación se tomó como punto de partida: la modelación y caracterización del agua residual de la industria de café instantáneo, preparación del inóculo, las operaciones de carga, arranque de los reactores, métodos analíticos y análisis estadístico con pruebas paramétricas (ADEVA) y no paramétricas (U de Mann-Whitney), mediante el programa estadístico SPSS.

Agua residual modelada

Se modeló agua residual de la industria de café soluble con características similares a la industria. Cabe mencionar que el agua residual se recolectó de una de las industrias de café instantáneo del país, ubicada en la provincia de Manabí. El sustrato inicialmente es una solución concentrada, mediante la adición de 20 g de café tostado y molido (Fernández y Foster 1993), en 1 L de agua destilada sometida a calentamiento hasta ebullición, posteriormente se filtra la solución mediante gasa fina.

Se definió el volumen de agua destilada de acuerdo a la ecuación 1 propuesta por Morales y Vera (2018), para modelar el efecto de dilución en la muestra concentrada a partir de un balance de materia y fijar la carga orgánica expresada como DQO en 7500 mg/L.

$$V_{H2O} = \frac{V_o - DQO_o}{DQO_F} - V_o \quad [1]$$

Donde:

V_{H2O} : Volumen de agua añadida, ml

V_o : Volumen de agua concentrada, ml

DQO_o : Demanda química de oxígeno inicial, mg/L

DQO_F : Demanda química de oxígeno final, mg/L

Preparación del inóculo

El inóculo se recolectó de un reactor anaerobio del tratamiento de residuos de la industria atunera, se almacenó en un envase de 20 L herméticamente sellado y transportado a las instalaciones del laboratorio. Se realizó proceso de desgasificación para evitar el ingreso de oxígeno al sistema durante 30 días, se aclimató alimentando semanalmente con solución de agua residual modelada con una concentración del 25% (p/v) en sacarosa.

Para su caracterización se tomó una muestra representativa para realizar sólidos suspendido volátiles (SSV); según la norma alemana VDI 4630 (2006) la cual indica que la cantidad de sólidos volátiles debe ser $\geq 50\%$ para ser inoculado en los reactores, caso contrario se continúa alimentando hasta alcanzar dicho valor.

Descripción de reactores

Los reactores de los SM y SB son de tipo Fafa, está construido de acero inoxidable de 2 mm de espesor. Poseen una altura de 35 cm y un diámetro de 14 cm, a su vez está recubierto de un cilindro de 23 cm de diámetro y 24,5 cm de alto; este último actúa como un sistema de calentamiento mediante una resistencia; como medio de empaque se utilizó tubería corrugada PVC de 2,5 cm de alto, 15 mm de diámetro exterior, 11 mm de diámetro interior y 0,55 g de peso. El volumen de reacción calculado fue de 3,956 L.

En el SM se desarrolló las cuatro fases del proceso de DA simultáneamente en un único reactor (Hid, Aci, Ace y Met), como se muestra en la figura 1.

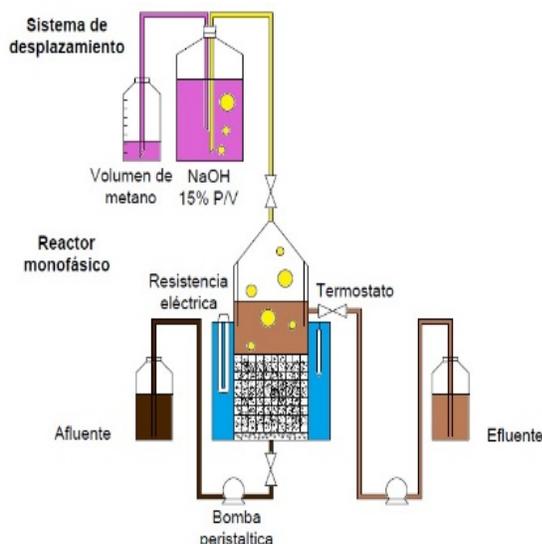


Figura 1. Reactor sistema monofásico

Mientras que en el SB se separan las fases de la siguiente manera: proceso en el primer reactor (Hid-Aci), proceso

en el segundo reactor (Ace-Met), como se muestra en la figura 2.

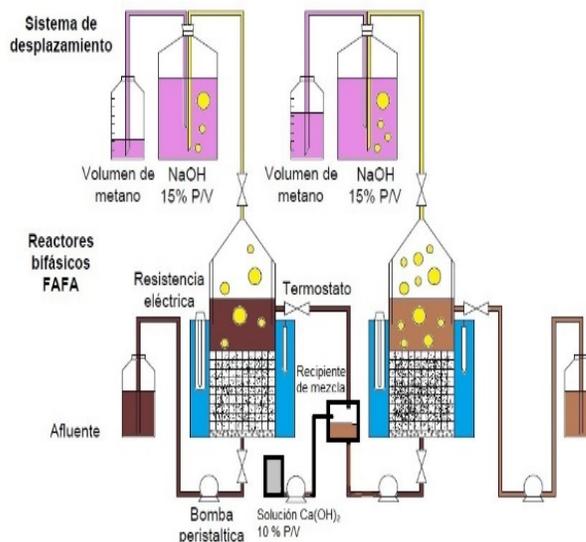


Figura 2. Reactores sistemas bifásicos

Arranque del SM

Para el arranque del reactor se formuló una mezcla del 40% inóculo y 60% agua modelada en relación al volumen de reacción, sellando herméticamente el reactor, se estableció la temperatura de 35°C y se recirculó la mezcla mediante una bomba peristáltica Jebao DP-4 durante un periodo de 15 días para asegurar que la biomasa activa se adhiera al empaque.

Durante 7 días se alimentó de manera semicontinuo cada 24 h un caudal de 105,5 ml/d correspondiente a una carga orgánica volumétrica inicial (Bv) de 0,2 g L⁻¹ d⁻¹, culminado los 15 días se aumentó la Bv, de acuerdo a la estabilidad del proceso de DA. Adicionalmente el sistema de desplazamiento Boyle-Mariotte se conectó a la campana del reactor mediante una manguera de ¼ in donde circula biogás y entra en contacto directo con la solución del NaOH al 15% P/V.

Arranque de los reactores en el SB

Para mayor apreciación se llamó al reactor A donde se desarrolló la Hid-Aci y al reactor B donde se desarrolló la Ace-Met. Ambos reactores A y B son inoculados mediante la mezcla 40% inóculo y 60% agua modelada en relación al volumen de reacción. El reactor A se sometió a un tratamiento térmico (choque térmico) que consistió en aumentar la temperatura a 100 ± 2°C durante un periodo de 2 h (Valdez y Poggi, 2009); para contribuir al enriquecimiento de bacterias celulolíticas formadoras de esporas; posteriormente se estableció la temperatura de 35°C y se recirculó la mezcla mediante una bomba peristáltica Jebao DP-4 durante un periodo de 15 días

para asegurar que la biomasa activa se adhiera el empaque.

Transcurrido 7 días se alimentó de manera semicontinua cada 24 h un caudal de 105,5 mL.d-1 correspondiente a una carga orgánica volumétrica inicial (Bv) de 0,2 g L-1 d-1, el efluente del reactor A alimenta al reactor B; culminado los 15 días se aumentó la Bv con base en la estabilidad que brinde el proceso en cuanto a sus variables de control. Ambos reactores poseen su propio sistema de desplazamiento Boyle-Mariotte, bajo el mismo principio de desplazamiento descrito en el SM.

Cálculo del caudal volumétrico (Qv) y el tiempo de retención hidráulica (TRH)

Una vez estabilizados los reactores y el inóculo aclimatado, se incrementó periódicamente la carga orgánica volumétrica (Bv), en función de los resultados observados de las variables de control, para determinar el rendimiento de metano. Para establecer el caudal volumétrico y tiempo de retención hidráulico se utilizó las Ecuaciones 2; 3 y 4 propuestas por Diaz (2018).

$$Q_m = B_v * V_r \quad [2]$$

Donde:

Q_m : Caudal másico, g d⁻¹

B_v : Carga orgánica volumétrico, g L⁻¹ d⁻¹.

V_r : Volumen de reacción, L

El caudal volumétrico se define por la siguiente expresión:

$$Q_v = \frac{Q_m}{CO_{DQO}} \quad [3]$$

Donde:

Q_m : Caudal másico, g d⁻¹

Q_v : Caudal volumétrico, L d⁻¹

CO_{DQO} : Carga orgánica, g L⁻¹

El tiempo de retención hidráulica (TRH) se define como:

$$TRH = \frac{V_r}{Q_v} \quad [4]$$

Donde:

TRH : Tiempo de retención hidráulica, d

Q_v : Caudal volumétrico, L d⁻¹

V_r : Volumen de reacción, L

Método de evaluación

Los ensayos analíticos empleados en la investigación se realizaron según los métodos normalizados para el análisis de aguas residuales (APHA y WPCF, 2012) especificados en el cuadro 1.

Cuadro 1. Métodos aplicados según las variables en estudio

Parámetro	Método	Equipo
Potencial de hidrógeno	Potenciométrico	Fisher Scientific Accumet AB150
DQO	Espectrofotómetro UV-Vis	Thermo Scientific – Evolution 60S
DBO ₅	Respirométrico	DBO hach - bod trak II
ST, SF y SV	Gravimétrico	Memmert D-91126
Relación AGV/Alc	Potenciométrico/ valoración	Fisher Scientific Accumet AB150
Composición del biogás	Medidor de gases	Multitec @545

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se evaluaron los resultados obtenidos durante la producción de metano en los SM y SB, utilizando agua modelada de la industria de café soluble, iniciando con la caracterización del agua residual y del inóculo, los cuales son las entradas fundamentales para implementar el arranque y posterior seguimiento de una forma continua a los reactores durante 13 semanas, validando el comportamiento de parámetros fisicoquímicos tales como: pH, FOSTAC, AGV, remoción DQO, rendimiento y concentración de metano, comparando los sistemas con pruebas paramétricas y no paramétricas, mediante el programa estadístico SPSS.

Caracterización del agua residual.

En la presente investigación se modeló agua residual de la industria de café soluble, con base en lo sugerido por García *et al.* (1995) y por Fernández y Forster (1993) quienes evalúan un extracto muy similar al proceso de producción de café instantáneo, con lo cual se obtuvo los siguientes resultados que se muestran en el cuadro 2.

En la caracterización del agua modelada se puede evidenciar un pH ácido 5,4, un DQO de 7500 mg/L y un índice de biodegradabilidad 0,55 producto de la relación entre DBO₅/DQO, lo que indica que es un sustrato con capacidad para degradación biológica, de acuerdo a lo reportado por Crites y Tchobanoglous (2000).

Cuadro 2. Métodos aplicados según las variables en estudio

Parámetro	Agua residual de la industria	Agua residual modelada
pH	5,25±1,25	5,40±0,8
DBO ₅ (mg/L)	3 397,8 ± 1 090	4129,2±118
DQO (mg/L)	6 124,8 ± 2608	7 496,73±80
Índice de biodegradabilidad	0,5 ± 0,09	0,55±0,03

n=3

Promedio ± desviación estándar

Caracterización del inóculo

Durante el período de adaptación de los reactores se caracterizó el inóculo obteniendo los valores reportados en el cuadro 3. De acuerdo a lo establecido por la VDI 4630 (2006) este inóculo cumple con los requisitos para el adecuado inicio de la DA, debido a que su contenido de los SV en base seca fue mayor al 50%.

Cuadro 3. Caracterización del inóculo

Parámetro	Unidad	Valores
sólidos totales (ST)	gST/L	0,0502±0,0032
volátiles (SV)	gSV/L	0,0309±0,0035
suspendidos volátiles (SSV)	gSSV/L	0,0230±0,0033
disueltos volátiles (SDV)	gSDV/L	0,0079±0,0025

n=3

Promedio ± desviación estándar

Evaluación de variables con seguimiento diario

Como se evidencia en el cuadro 4, según prueba de normalidad de Kolmogorov - Smirnov, las variables de seguimiento diario (rendimiento de metano, pH, AGV y FOSTAC) no siguen una distribución normal, por tanto, se realiza una prueba no paramétrica de U de Mann-Whitney.

Cuadro 4. Pruebas de normalidad para variables con seguimiento diario

	Kolmogorov –Smirnov		
	Estadístico	gl	Sig.
Rendimiento de Metano	1,882	180	0,002
pH	1,737	180	0,005
AGV	1,818	180	0,003
FOSTAC	1,956	180	0,001

No son significativamente diferentes (p>0.05)

En el cuadro 5, de resumen de los ADEVA explican que uno de los sistemas (SM o SB) provocan cambios altamente significativos en las variables respuestas estudiadas.

Cuadro 5. Pruebas de U de Mann-Whitney de muestras independientes para variables con seguimiento diario

Resumen de prueba de hipótesis		
	Hipótesis nula	Sig.
1	La distribución de $dm^3CH_4/gDQO$ es la misma entre las categorías de sistema.	,000
2	La distribución de pH es la misma entre las categorías de sistema.	,000
3	La distribución de mg/L es la misma entre las categorías de sistema.	,000
4	La distribución de FOSTAC es la misma entre las categorías de sistema.	,000

No son significativamente diferentes (p>0,05)

Rendimiento de metano

Como se aprecia en el gráfico 1, se representan los sistemas evaluados en el eje “X” y al rendimiento de metano en el eje “Y”, el cual es expresado en $dm^3 CH_4/gDQO$, los resultados obtenidos mediante la prueba de U de Mann-Whitney para el rendimiento de CH_4 son menor a 0,05, es decir se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, con lo que se determina estadísticamente diferencias significativas entre ambos sistemas. Lo que concuerda con Chinchilla (2013) reportando que valores de producción de metano en el SB es mayor al SM, debido a que el SB reúne las condiciones óptimas para la DA.

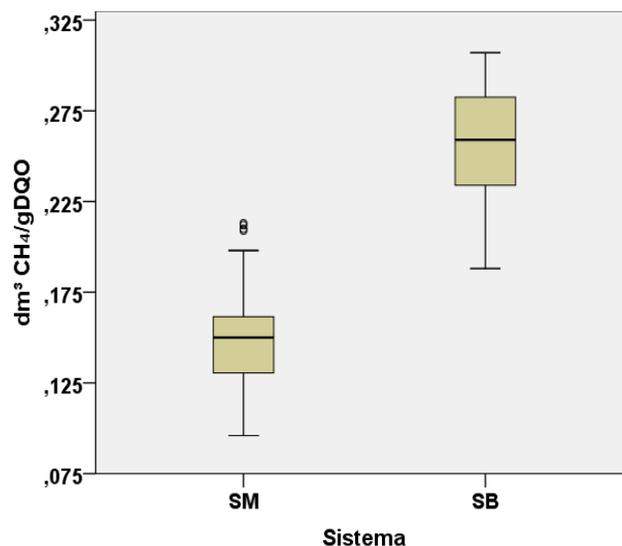


Gráfico 1. Comparación de gráficas de caja para rendimiento de metano entre los SM y SB

Existe datos atípicos que se evidencian en el gráfico 1, por lo que se procede a realizar la prueba de Moses para constatar la significancia de dichos valores, en el cuadro 6 se evidencia estadísticamente que los valores atípicos del SM son altamente significativos como se muestra en el gráfico 2.

Cuadro 6. Pruebas de Moses de reacción extrema de muestras independientes para rendimiento de CH_4

Resumen de prueba de hipótesis		
	Hipótesis nula	Sig.
1	El intervalo de Rendimiento. CH_4 es el mismo entre las categorías de sistema.	1,207E-34 ¹

¹Se muestra la significancia exacta para esta prueba.

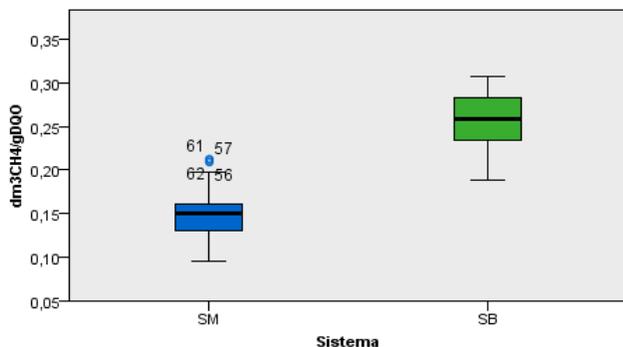


Gráfico 2. Comparación de gráficas en prueba de Moses para rendimiento de metano entre los SM y SB

pH

Como se aprecia en el gráfico 3, los valores de pH obtenidos mediante la prueba de U de Mann-Whitney para el pH presentaron diferencias significativas ($p \geq 0,05$).

El SB presentó mayor estabilidad de los resultados de pH en comparación a los del SM, debido a que durante la separación de fases del SB en el reactor acidogénico los compuestos orgánicos solubles son convertidos en ácidos orgánicos lo que facilita la DA en la siguiente etapa del reactor metanogénico, por lo cual es más fácil controlar un pH en donde la mayoría de su población de microorganismos se encuentra en ambiente neutro-alcalino, lo que concuerda con Göblös *et al.* (2008).

De similar manera Quintero y Rondón (2012) señalan que es muy importante mantener los valores de pH estable porque los cambios en este parámetro pueden afectar la población metanogénica que están presente en los lodos. Por tanto, Aristizábal (2015) plantea que se debe conocer la cantidad aproximada de base (NaOH) que debe ser agregada para neutralizar el sustrato. Adicionalmente, existen datos atípicos que se evidencian en el gráfico 3, por lo que se procede a realizar la prueba de Moses para contrastar la significancia de dichos valores mostrado en el gráfico 4.

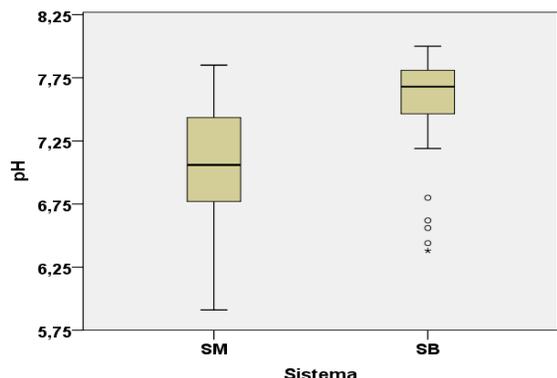


Gráfico 3. Comparación de gráficas de caja para pH entre los SM y SB.

De acuerdo a la prueba de Moses del cuadro 7, los valores atípicos del sistema SB son altamente significativos. Los cuales son evidenciados en el gráfico 4.

Cuadro 7. Pruebas de Moses de reacción extrema de muestras independientes para pH

Resumen de prueba de hipótesis		
	Hipótesis nula	Sig.
1	El intervalo de pH es el mismo entre las categorías de Sistema.	6,632E-4 ¹
¹ Se muestra la significancia exacta para esta prueba.		

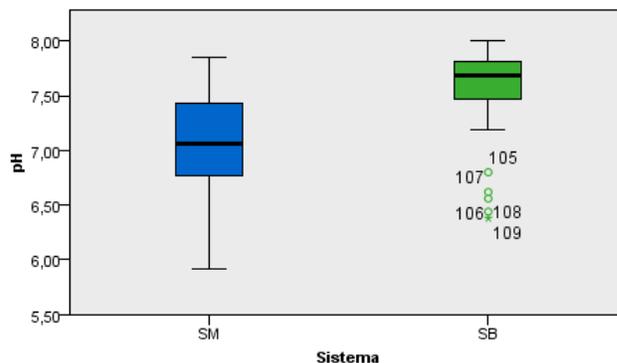


Gráfico 4. Comparación de gráficas en prueba de Moses para pH entre los SM y SB

AGV

Como se aprecia en el gráfico 5, se representan los sistemas evaluados en el eje “X” y los valores de AGV en el eje “Y”, los resultados obtenidos mediante la prueba de U de Mann-Whitney son menor a 0,05; es decir se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, con lo que se determina estadísticamente diferencias significativas entre ambos SD, evidenciando el SB produce ligeramente mayores niveles de ácidos grasos volátiles (mg/L) con mayor estabilidad que en el SM, lo que concuerda con lo reportado por Ashley y Hurst (1981); Speece y Parking (1983) que establecen que la concentración de AGV no debe exceder de los 500 mg/L para el desarrollo óptimo del proceso metanogénico. De similar manera los valores mínimos del SB de la presente investigación son análogos a los reportados por Guardia (2012) en su estudio de DA en SB. Por otra parte, Bolte, Hill, y Wood (1986); Braun, Huber y Meyrath (1981) realizaron estudios con desechos de cerdos donde reportan valores menores de 10 y hasta 527mg/L.

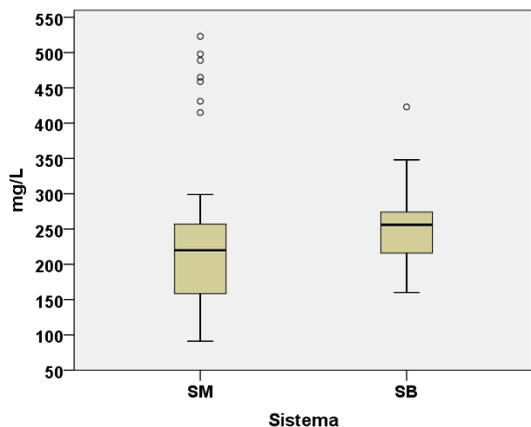


Gráfico 5. Comparación de gráficas de caja para AGV entre los SM y SB

De acuerdo a la prueba de Moses del cuadro 8, los valores atípicos del sistema no son significativos, los cuales se pueden visualizar en el gráfico 6.

Cuadro 8. Pruebas de Moses de reacción extrema de muestras independientes para AGV

Resumen de prueba de hipótesis		
	Hipótesis nula	Sig.
1	El intervalo de AGV es el mismo entre las categorías de sistema.	1,000 ¹
¹ Se muestra la significancia exacta para esta prueba.		

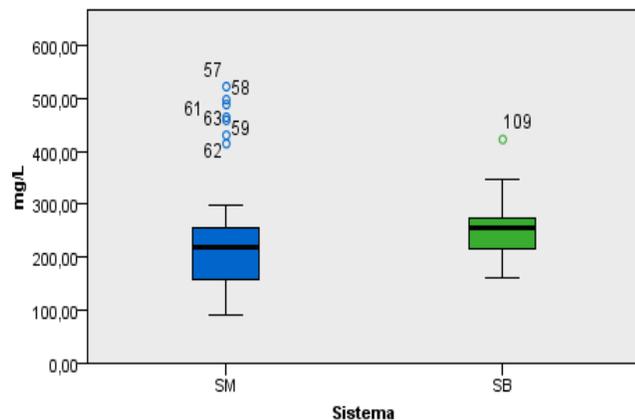


Gráfico 6. Comparación de gráficas en prueba de Moses para AGV entre los SM y SB.

FOSTAC

Como se aprecia en la gráfico 7, se representan los sistemas evaluados en el eje “X” y los valores de FOSTAC en el eje “Y”, los resultados obtenidos mediante la prueba de U de Mann-Whitney son menor a 0,05; es decir se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, con lo que se determina estadísticamente diferencias significativas entre ambos

SD, sin embargo los mejores valores de la relación de FOSTAC fueron efectuadas en el SB situándose entre 0,42 a 0,60 lo que concuerda con Lossie y Pütz (2011); Failla y Restuccia (2014) en donde mencionan que los rangos de FOSTAC es considerado estable cuando se encuentra entre 0,4 a 0,6 debido a que permite detectar a tiempo los problemas del proceso, hasta el inminente vuelco de la fase biológica del digestor, con lo que pueden tomarse contramedidas inmediatamente.

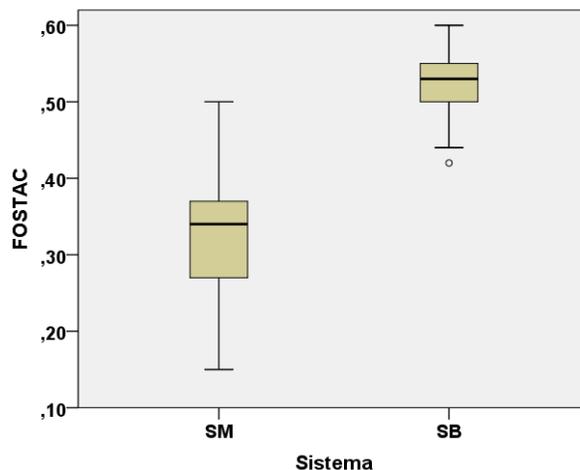


Gráfico 7. Comparación de pruebas U de Mann-Whitney para FOSTAC entre los SM y SB.

De acuerdo a la prueba de Moses del cuadro 9, los valores atípicos del sistema no son significativos, lo cual se aprecia en el gráfico 8.

Cuadro 9. Pruebas de Moses de reacción extrema de muestras independientes para FOSTAC

Resumen de prueba de hipótesis		
	Hipótesis nula	Sig.
1	El intervalo de FOSTAC es el mismo entre las categorías de sistema.	1,604E-33 ¹
¹ Se muestra la significancia exacta para esta prueba.		

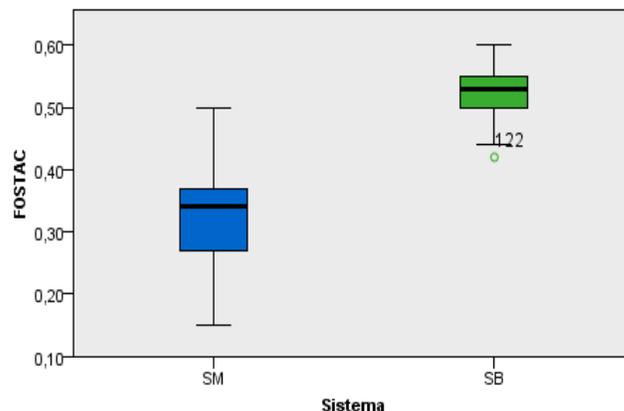


Gráfico 8. Comparación de gráficas en prueba de Moses para FOSTAC entre los SM y SB

Evaluación de variables con seguimiento semanal

Como se evidencia en el cuadro 10, según la prueba de normalidad de Shapiro Wills, la remoción de DQO únicamente sigue una distribución normal en el SM a diferencia que en concentración de metano se presenta una distribución normal en ambos SD.

Cuadro 10. Pruebas de normalidad para variables con seguimiento semanal

	Sistema	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	G1	Sig.
Remoción DQO	SM	0,936	13	0,406
	SB	0,851	13	0,029
Concentración de metano	SM	0,960	13	0,756
	SB	0,870	13	0,053

*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de la significación de Lilliefors

No son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Como se evidencia en el cuadro 11, según la prueba de homogeneidad de varianza, resultó significativa para la remoción de DQO, a diferencia de la concentración de metano que no presentó diferencia significativa.

Cuadro 11. Prueba de homogeneidad de varianza para variables con seguimiento semanal

	Estadístico	Levene		Sig.
		g1	g2	
Remoción DQO	7,658	1	24	0,011
Concentración de metano	0,829	1	24	0,371

No son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Nota. Fuente: Autores de la investigación

La remoción de DQO no cumple con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza por lo cual se utiliza una prueba no paramétrica, la prueba U de Mann-Whitney, en cambio la concentración de metano cumple con ambos supuestos, por tal antecedente se utiliza una prueba paramétrica de ADEVA.

En el cuadro 12 de resumen de los ADEVA se detalla que uno de los sistemas (SM o SB) provocan cambios altamente significativos en la remoción de DQO

Cuadro 12. Prueba de U de Mann-Whitney de muestras independientes para remoción de DQO

Resumen de prueba de hipótesis		
	Hipótesis nula	Sig.
1	La distribución de Remoción.DQO es la misma entre las categorías de Sistema.	,002 ¹

¹Se muestra la significancia exacta para esta prueba.

No son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Remoción de DQO

Como se aprecia en el gráfico 9, se representan los sistemas evaluados en el eje "X" y los valores de remoción de DQO en el eje "Y", los resultados obtenidos mediante la prueba de U de Mann-Whitney

son menor a 0,05; es decir se rechaza la hipótesis nula y se acepta la minúscula

hipótesis alternativa, con lo que se determina estadísticamente diferencias significativas entre ambos SD, por lo tanto, se evidencia que existe mayor remoción de DQO en el SB lo que concuerda con Guardia (2012) resaltando que un SB es más eficiente que un SM.

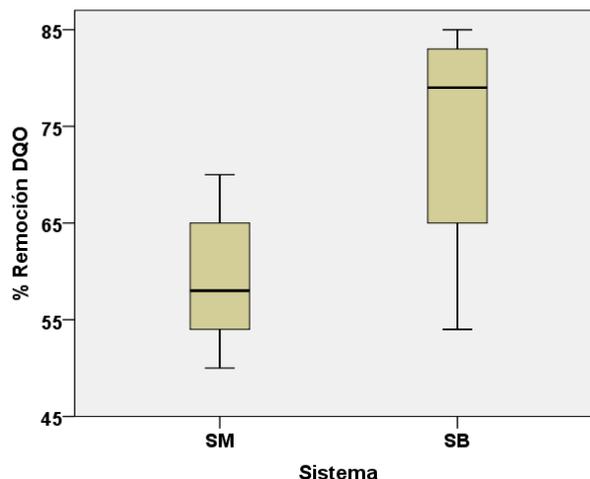


Gráfico 9. Comparación de gráficas de caja para remoción de DQO entre los SM y SB

En el cuadro 13, de resumen de ADEVA se evidencia que uno de los sistemas (SM o SB) provocan cambios altamente significativos en la concentración de metano.

Cuadro 13. Prueba de ADEVA para concentración de metano.

Fuente de Variación	Resumen de prueba de hipótesis				Sig.
	Suma de cuadrados	G1	Media cuadrática	F	
Tratamientos	193,885	1	193,885	16,50	0,0
Error	282,000	24	11,750		
Total	475,885	25			

Se muestran las significancias asintóticas. El nivel de significancia es 0,05

Concentración de metano

Como se aprecia en la gráfico 10, se representan los sistemas evaluados en el eje "X" y los valores de concentración de metano en el eje "Y", los resultados obtenidos mediante la prueba de ADEVA son menor a 0,05; es decir se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, con lo que se determina estadísticamente diferencias significativas entre ambos SD, evidenciando que el SM produce ligeramente mayor concentraciones de metano que en el SB, sin embargo, el rendimiento de metano es superior en el SB y los resultados concuerdan con valores similares reportados por Dinsdale *et al.* (1997); Scano *et al.* (2014) entre 45 a 60%, siendo así que ambos sistemas son considerados

combustibles según Varnero (2011), el cual indica que valores por encima de 45% de concentración de metano son inflamables.

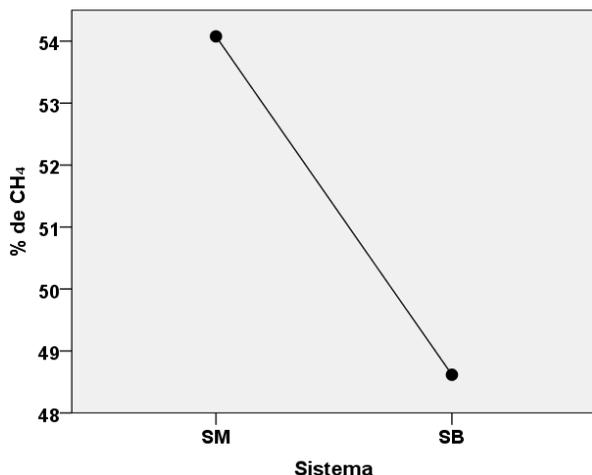


Gráfico 10. Comparación de medidas para concentración de metano entre los SM y SB

Adicionalmente, Guardia *et al.* (2014) en su estudio relacionado con digestión anaerobia de aguas residuales de café, obtuvo 61% de metano, encontrando concentraciones por encima de la presente investigación.

CONCLUSIONES

Se logró modelar las principales características fisicoquímicas del agua residual de la industrial de café instantáneo con una similitud del 86% con respecto al agua residual de este tipo de industria de café soluble.

El SB tuvo un incremento de producción de metano del 70% en relación al SM.

Se identificó que las mejores condiciones de operación se desarrollaron en el SB con pH (6,38-8,0), FOSTAC (0,42-0,60), AGV (160-423mg/l), remoción DQO (61-85%).

LITERATURA CITADA

APHA, AWWA, WEF. 2012. Standard Methods for examination of water and wastewater. (22nd ed.), Washington: American Public Health Association, 1360. doi:ISBN 978-087553-013-0.

Aristizábal, C. 2015. Caracterización físico-química de una vinaza resultante de la producción de alcohol de una industria licorera, a partir del aprovechamiento de la caña de azúcar. Ingenierías USBMed, 6(2): 36-41.

Ashley, N., y Hurst, T. 1981. Acid and alkaline phosphatase activity in anaerobic digested sludge: a biochemical predictor of digester failure. *Water Res*, 15: 633-638.

Blinová, L., Sirotiak, M., Bartošová, A., y Soldán, M. 2017. Utilization of waste from coffee production. *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*, 25(40): 91-101.

Bolte, J., Hill, D., y Wood, T. 1986. Anaerobic Digestion of Screened Swine Waste Liquids in Suspended Particle-Attached Growth Reactors. *Transactions of the ASAE*, 29(2):543-549.

Braun, R., Huber, P., y Meyrath, J. 1981. Ammonia toxicity in liquid piggery manure digestion. *Biotechnology Letters*, 3(4): 159-164.

Chen, Y., Cheng, J., y Creamer, K. 2008. Inhibition of anaerobic digestion process: a review. *Bioresource technology*, 99:4044-4064. doi:10.1016/j.biortech.2007.01.057.

Chinchilla, J. 2013. Evaluación de la producción de metano en el tratamiento de los residuos del café mediante la digestión anaerobia en dos fases. (Tesis pregrado). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. Recuperado el 9 de junio de 2020, de <http://hdl.handle.net/11036/1764>.

Crites, R., y Tchobanoglous, G. 2000. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. McGraw-Hill. doi:ISBN: 9789584100429.

Diaz, J. 2018. Ecuaciones y cálculos para el tratamiento de aguas. Madrid, España: Ediciones Paraninfo, SA. doi:ISBN: 978-84-283-4152-3.

Dinsdale, R., Hawkes, F., y Hawkes, D. 1997. Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion with thermophilic pre-acidification of instant-coffee-production wastewater. *Water research*, 31(8): 1931-1938. doi:10.1016/S0043-1354(97)00041-9.

El Telégrafo. 2017. Cafeteros de Ecuador se reunieron con empresarios rusos para fortalecer exportaciones. Recuperado el 25 de mayo de 2019, de <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/economia/1/cafeteros-de-ecuador-se-reunieron-con-empresarios-rusos-para-fortalecer-exportaciones>.

Failla, S., y Restuccia, A. 2014. Methane potentials from grape marc by a laboratory scale plant. *Applied Mathematical Sciences*, 8(132): 6665-6678.

- FAO (Food and agriculture organization of the United Nations). 2013. La bioenergía y los biocombustibles. Vías de la sostenibilidad. Recuperado el 30 de mayo de 2019, de <http://www.fao.org/3/a-ar589s.pdf>.
- Fernandez, N., y Forster, C. 1993. A study of the operation of mesophilic and thermophilic anaerobic filters treating a synthetic coffee waste. *Bioresource technology*, 45(3): 223-227.
- Fisgativa, H., Tremier, A., Le Roux, S., Bureau, C., y Dabert, P. 2017. Understanding the anaerobic biodegradability of food waste: Relationship between the typological, biochemical and microbial characteristics. *Environmental Management*, 188: 95-107.
- García, S., Herrera, M., Behling, E., Gutiérrez, E., Chacín, E., y Fernández, N. 1995. Inhibidor natural de las aguas residuales de procesamiento de café en el tratamiento anaerobio. *Ciencia*, 3(3).
- Göblös, S., Portörő, P., Bordás, D., Kálmán, M., y Kiss, I. 2008. Comparison of the effectiveness of two-phase and single-phase anaerobic sequencing batch reactors during dairy wastewater treatment. *Renewable Energy*, 33(5): 960-965.
- González, M., Pérez, S., Wong, A., Bello, R., y Yanez, G. 2015. Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista Argentina de microbiología*, 47(3): 229-235.
- González, M. 2009. Producción de bioenergía en el norte de México: Tan lejos y tan cerca. *Frontera Norte*, 21(41): 177-183.
- Guardia, Y., Rodríguez, S., Jiménez, J., y Sánchez, V. 2014. Performance of a UASB reactor treating coffee wet wastewater. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(2):50-56.
- Guardia, Y. 2012. Estudio de la digestión anaerobia en dos fases para el tratamiento de las aguas residuales de despulpe del beneficiado húmedo del café. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. Recuperado el 1 de junio de 2019, de <http://oa.upm.es/14684/>.
- Lazcano, T. 2015. Evolución anual de la producción mundial de café: La producción mundial de café ha crecido más del 50% en los últimos 25 años.
- Lossie, U., y Pütz, P. 2011. Control orientado de plantas de biogás con la ayuda de FOS/TAC. *Analítica de Laboratorio valoración FOS/TAC*, 1-4. Alemania.
- Recuperado el 22 de junio de 2020, de https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos/s_y_documentos/87050/FOSTAC.pdf.
- Morales, C., y Vera, J. 2018. Producción de metano a partir de las aguas residuales generadas en la Industria del café instantáneo en régimen Termofílico continuo con presencia de taninos. Segunda Convención científica Internacional de la UTM 2018. Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo. Recuperado el 10 de febrero de 2020.
- Murthy, P., y Naidu, M. 2012. Sustainable management of coffee industry by-products and value addition— A review. *Resources, Conservation and recycling*, 66: 45-58.
- Mussatto, S., Machado, E., Martins, S., y Teixeira, J. 2011. Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. *Food and Bioprocess Technology*, 4(5): 661-672.
- Peñaranda, L., Montenegro, S., y Giraldo, P. 2017. Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *Investigación Agraria y Ambiental*, 8(2):141-150.
- Quintero, M., y Rondón, Y. 2012. Estudio preliminar de la producción de biogás a partir de la Digestión anaerobia del mucílago de café utilizando lodo estiércol del cerdo como inóculo (Doctoral dissertation). (Tesis pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. Recuperado el 31 de agosto de 2019, de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2012/145234.pdf>.
- Ramírez, S. 2012. Aprovechamiento de residuos agroindustriales, cascarilla de arroz (oriza sativa) y residuos de papa (solanum tuberosum) para la producción de trichoderma spp. (Tesis pregrado). Universidad Técnica de Ambato, Ambato. Recuperado el 31 de agosto de 2019, de <http://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/3063/1/SBQ.29.pdf>.
- Restrepo, A., Rodríguez, E., y Manjarrés, K. 2011. Cortezas de naranja comestibles: una aproximación al desarrollo de productos con valor agregado a partir de residuos agroindustriales. *Produccion + Limpia*, 6(2): 47-57.
- Rosas, D., Ortiz, H., Herrera, J., y Leyva, O. 2016. Revalorización de algunos residuos agroindustriales y su potencia de aplicación a suelos agrícolas. *Agro Productividad*, 9(8):18-23.

- Saval, S. 2012. Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales: Pasado, Presente y Futuro. *BioTecnología*, 16(2):14-46.
- Scano, E., Asquer, C., Pistis, A., Ortu, L., Demontis, V., y Cocco, D. 2014. Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant. *Energy Conversion and Management*, 7:22-30.
- Speece, R., y Parking, G. 1983. The response of methane bacteria to toxicity. *Proceedings 3rd International Symposium on Anaerobic Digestion*, (págs. 23-35). Boston.
- Valdez, I., y Poggi, H. 2009. Hydrogen production by fermentative consortia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5): 1000–1013.
- Vargas, Y., y Pérez, L. 2018. Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Facultad de Ciencias Básicas*, 14(1): 59-72.
- Varnero, M. 2011. Manual de biogás. FAO. (Food and agriculture organization of the United Nations), Chile. Recuperado el 31 de mayo de 2019, de <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI 4630). 2006. Fermentation of organic materials, characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. Berlin. Recuperado el 20 de febrero de 2020, de https://www.vdi.de/fileadmin/pages/vdi_de/redakteur/richtlinien/inhaltsverzeichnisse/2385990.pdf.
- Yáñez, J. 2018. Estudio de la película plateada del café para su reutilización en panadería. Ecuador. (Tesis pregrado). Universidad Regional Autónoma de los Andes, Ambato. Recuperado el 23 de mayo de 2019, de <http://dspace.uniandes.edu.ec/handle/123456789/8016>.