

Artículo Científico

Evaluación de un reactor anaeróbico con baffles (ABR) para el tratamiento de las aguas residuales de un beneficio húmedo de café.**Ana Gloria Montes Peña**

Ingeniera Química, M. Sc. en Ingeniería Sanitaria, ERIS-USAC, Guatemala.

Dirección para recibir correspondencia: agmontes9@gmail.com

Adán Pocasangre Collazos

Ingeniero Civil, M. Sc. en Ingeniería Sanitaria, ERIS-USAC, Guatemala.

Profesor titular ERIS-USAC, Guatemala

Dirección para recibir correspondencia: adan.pocasangre@crs.org

Recibido: 30.05.2018 Aceptado: 13.05.2018

Resumen

El presente artículo muestra los resultados de la evaluación de un reactor anaeróbico con baffles (ABR) construido a escala laboratorio, para determinar su eficiencia en el tratamiento del agua miel generada en un beneficio húmedo de café ubicado en Santa Rosa Guatemala. Con base a los análisis fisicoquímicos realizados se determinó que el reactor era capaz de aumentar el potencial de hidrógeno en un 23% pasando de 3.5 a 4.3 unidades, la alcalinidad disminuyó de 4,100 a 1,833 mg/L de CaCO₃ obteniendo una eficiencia del 54%, la demanda química de oxígeno disminuyó un 61% modificándose con el tratamiento de 20,816 a 6,700 mg/L y la demanda bioquímica de oxígeno pasó de 16,511 a 5,541 mg/ teniendo una disminución del 37%.

Palabras clave: Aguas residuales, características de aguas residuales, análisis del agua, procesos biológicos, aguas mieles, potencial de hidrógeno.

Abstract

This article shows the results of the evaluation of an anaerobic reactor with baffles (ABR) built on a laboratory scale, to determine its efficiency in the treatment of coffee processing wastewater generated in a coffee milling located in Santa Rosa, Guatemala. Based on the physicochemical analyzes carried out, it was determined that the reactor was capable of increasing the hydrogen potential by 23%, from 3.5 to 4.3 units, the alkalinity decreased from 4,100 to 1,833 mg/L of CaCO₃ obtaining an efficiency of 54%, the chemical oxygen demand decreased by 61%, modifying with the treatment from 20,816 to 6,700 mg/L and the biochemical oxygen demand went from 16,511 to 5,541 mg / having a decrease of 37%.

Keywords: Wastewater, wastewater characteristics, water analysis, biological processes, coffee processing wastewater, hydrogen potential.

Introducción

El agua miel generada en los beneficios húmedos de café se caracteriza por su alta carga orgánica y sus potenciales de hidrógeno bajos, por lo que requiere de tratamiento previo a ser descargada. Usualmente se utiliza hidróxido de calcio para elevar el pH, sin embargo, este no se mantiene constante con el tiempo y representa costos adicionales.

En ese sentido han existido investigaciones sobre métodos alternos de tratamiento, una de ellas consistió en la construcción a escala laboratorio de un reactor anaeróbico con baffles (ABR) de acrílico, que posee un volumen de 43 litros y un tiempo de retención de 7.7 días, trabajando a temperatura ambiente.

Los parámetros fisicoquímicos evaluados fueron el potencial de hidrógeno (pH), la alcalinidad, la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días (DBO₅) del agua miel proveniente del beneficio húmedo de Café Nuevo Sendero ubicado en el departamento de Santa Rosa, Guatemala.

Con base a los análisis realizados se determinó que las muestras del agua miel en la alimentación del reactor poseían un valor promedio de pH de 3.5 y a la salida un valor promedio de 4.3 unidades con una eficiencia en el tratamiento del 23%. Sin embargo, no tuvo la capacidad de llevar el pH a un valor considerado aceptable para descargar a un cuerpo receptor.

Además, se determinó que el reactor ABR tenía una eficiencia para la disminución de la alcalinidad de 54%

pasando de un valor promedio de 4,100 a 1,833 miligramos por litro de carbonatos de calcio.

Respecto a la DQO, las muestras de entrada presentaron un valor promedio de 20,816 mg/L, disminuyendo a 6,700 mg/L a la salida del reactor con un 61% de eficiencia y para la DBO₅ su eficiencia fue del 37%, pasando de 16,511 mg/L a 5,541 mg/L.

Antecedentes

El agua residual generada en un beneficio húmedo de café se produce en la etapa de despulpado y lavado, en el que el agua arrastra el mucílago fermentado del grano del café. A esta agua se le conoce como agua miel y se caracteriza por tener una alta carga orgánica y un pH bajo.

Usualmente en los beneficios húmedos de café elevan el pH de las aguas mieles mediante la neutralización con hidróxido de calcio.

Si bien la adición de hidróxido de calcio al agua miel aumenta la magnitud de su pH, este parámetro fluctúa a lo largo del tiempo, subiendo de nuevo el pH del agua residual. Debido a ello se han realizado investigaciones que permitan elevar el valor de este parámetro, como la publicada por Jingxia Yang y Stewart Oakley (2014), quienes construyeron un reactor anaeróbico con agitación mecánica capaz de aumentar el pH del agua miel, basándose en que un proceso biológico puede destruir las cadenas de proteínas contenidas en el agua miel, produciendo alcalinidad que podría neutralizar el pH del agua residual del café.

El reactor ABR evaluado toma como base el principio del reactor anaeróbico de Yang y Oakley, con las variantes que no utiliza energía eléctrica para la agitación y aumento de temperatura. En lugar de ello se utilizan baffles que cumplen la función de mezcla y se prueba a temperatura ambiente para que su operación sea más sencilla y económica.

Metodología

La investigación motivo del presente artículo estuvo dividida en la fase de diseño y construcción del reactor ABR a escala laboratorio, su inoculación, puesta en marcha y evaluación del funcionamiento.

El equipo estaba conformado por un sistema de alimentación de la muestra de agua residual por medio de una bomba peristáltica que utilizaba mangueras para el desplazamiento del líquido con válvulas

antirretorno, que aseguraban que el agua no se movería en la dirección contraria al flujo establecido con la bomba.

El reactor tipo ABR fue construido de acrílico que contenía en su interior una serie de baffles verticales para forzar el flujo de aguas residuales por debajo y por encima de ellos a medida que pasa desde la entrada a la salida. Su función principal es que las aguas residuales entren en contacto íntimo con una gran cantidad de biomasa activa proveniente de la inoculación con lodos, mientras que el efluente permanece relativamente libre de sólidos biológicos. Además, el ABR se caracteriza por separar las fases de la digestión anaeróbica a lo largo del reactor.

El agua miel utilizada para la puesta en marcha del reactor fue suministrada por el beneficio húmedo de café Nuevo Sendero, perteneciente a la cosecha de diciembre 2015 a abril 2016, la cual fue recolectada semanalmente y almacenada para poder alimentar al Reactor ABR durante toda la etapa de evaluación.

Debido a que se realizó un proceso biológico dentro de los reactores, se tuvo que contemplar el período de arranque y acondicionamiento de las bacterias al agua miel. Estas bacterias provenían de los lodos de un reactor anaeróbico de flujo ascendente (UASB) que trataba aguas domésticas cuya carga orgánica es mucho menor al del agua miel, por tal motivo se adicionaba gradualmente muestras de agua miel mezcladas con agua residual ordinaria para que las bacterias pudieran adaptarse a las nuevas condiciones. Las aguas residuales de tipo ordinario utilizada provenían de la planta de tratamiento Ingeniero Arturo Pazos y del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala,

La etapa de evaluación se llevó a cabo en el laboratorio Dra. Alba Tabarini, edificio T-5, Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Se midieron cuatro parámetros en el agua de entrada y salida del reactor ABR para evaluar su funcionamiento y eficiencia, estos fueron: pH, Alcalinidad, DQO y DBO₅

a. Descripción del equipo y su operación

El reactor anaeróbico con baffles construido a escala laboratorio es un dispositivo de acrílico con un volumen de 40 litros que posee ocho compartimientos dentro de los cuales se llevan a cabo las diferentes fases de la digestión anaeróbica, las cuales son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis; en cada compartimiento se encuentra un juego de baffles o

deflectores que le dan la dirección al fluido, cuyo espaciado de los mismos tiene una proporción de 2 a 1, en donde el deflector que conduce al agua hacia arriba posee el doble de espaciado que el que conduce el agua hacia abajo para que la velocidad ascendente sea baja.

El reactor ABR posee una tapadera móvil para poder ingresar los lodos que inoculan el sistema, además en la tapadera se encuentra una salida de gas por cada compartimiento debido que dentro del ABR ocurren reacciones que producen biogás.

Cuando el agua miel es impulsada por la bomba peristáltica e ingresa al reactor, se van llenando uno a uno los compartimientos con movimientos descendentes y ascendentes. El agua miel cuando pasa por la parte inferior del reactor entra en contacto con el lecho de lodos con alto contenido de microorganismos, degradando la materia orgánica del agua residual durante el recorrido de cada compartimiento y se crea un movimiento constante similar a una agitación por el efecto de los baffles. Además, por ser un proceso biológico, puede destruir las cadenas de proteínas del agua miel, produciendo alcalinidad que neutraliza en cierto grado el pH del agua residual del café.

b. Diseño del reactor ABR escala laboratorio

Para el diseño y dimensionamiento del reactor ABR a escala laboratorio, se partió de los parámetros de tiempo de retención hidráulica. En este caso se utilizó un caudal de 0.9 L/h resultantes de la calibración de la bomba peristáltica y 44 horas de retención hidráulica, según datos encontrados en la literatura para este tipo de reactor, esto da como resultado un volumen de tratamiento de 40 litros.

En cuanto a lo que respecta a las dimensiones del reactor y su relación entre largo, alto y ancho se estableció que el alto del reactor es 1.4 veces el ancho y su largo equivale a 3 veces su ancho, basado en el reporte de la comisión de investigación del agua: "The evaluation of the anaerobic baffled reactor for sanitation in dense peri-urban settlements" realizada por el grupo de investigadores de contaminación de la Universidad de KwaZulu-Natal en Durban y el Centro de Investigación de Agua y Agua Residual del Instituto de Tecnología de Durban, en el que se construyó un

reactor a escala planta piloto que tiene como base el reactor a nivel laboratorio realizado por la Universidad de Natal que establece 8 compartimientos como el número óptimo para que se realicen todas las fases involucradas en la digestión anaeróbica.

La parte interior del reactor ABR está conformada por ocho compartimientos, cada uno de ellos posee un juego de baffles; primero uno que conduce el agua hacia abajo y luego otro que conduce el agua hacia arriba. Para determinar el espaciado óptimo entre ellos se tomó en consideración que permitiera un flujo uniforme y sin puntos muertos. Para ello, las velocidades del flujo ascendente deben ser bajas para que no exista arrastre de sólidos que se encuentran en el fondo del reactor, lo que hace necesario aumentar el área del compartimiento de subida, siendo este el doble que del compartimiento de bajada; sin embargo, esto crea el inconveniente de un mayor volumen de espacio muerto, pero se solventó utilizando baffles que terminan con un ángulo de inclinación de 45°.

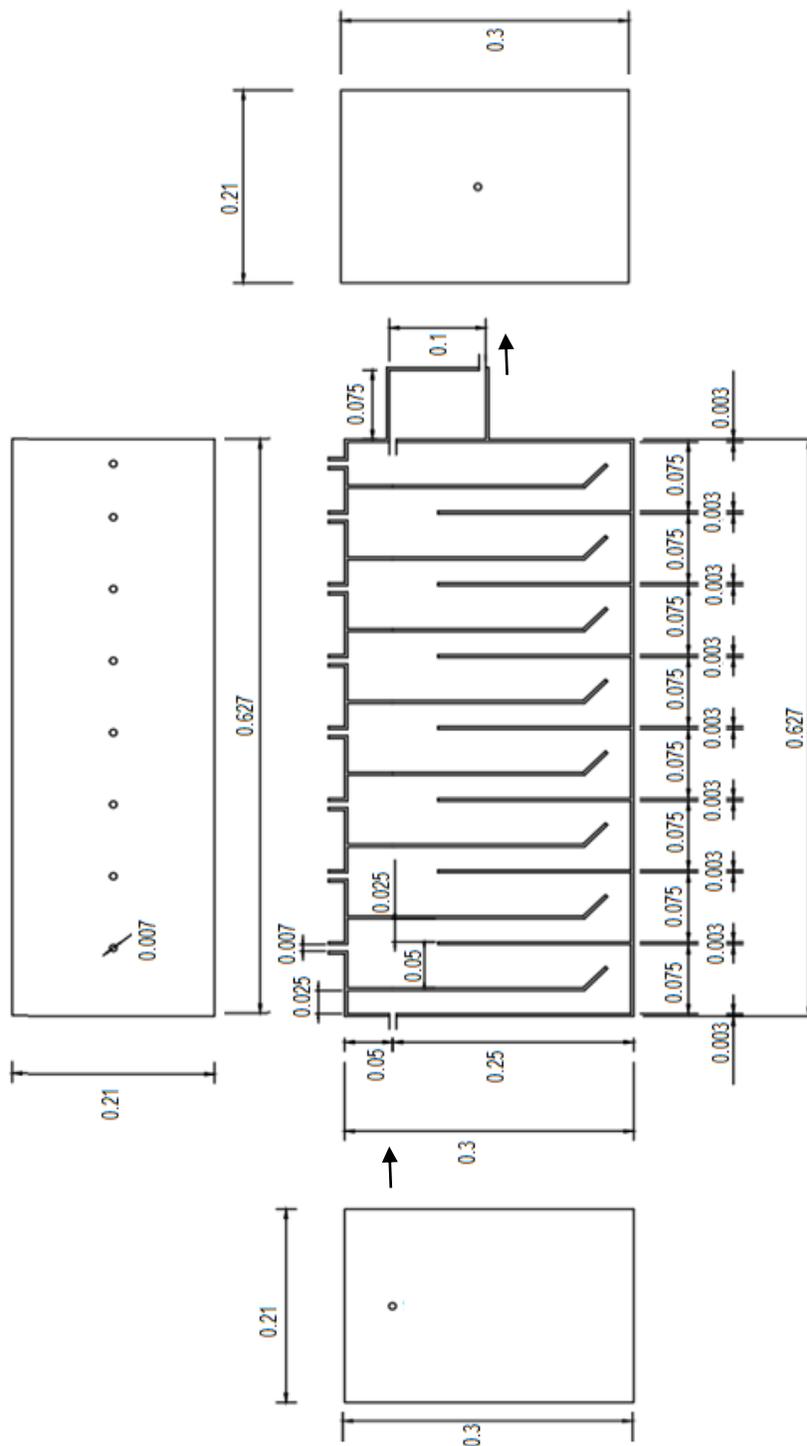
En la Tabla 1, se muestra el resumen de las dimensiones del reactor ABR, y se representan mediante un esquema en la Figura 1.

Tabla 1. Dimensionamiento del reactor ABR

Componente	Dimensión
Ancho	0.21 m
Longitud	0.63 m
Número de compartimientos	8
Tipo de deflector	Ángulo de inclinación de 45°
Espacio entre deflector para flujo descendente	0.025 m
Espacio entre deflector para flujo ascendente	0.05 m
Diámetro de orificio de entrada y salida de agua	0.01 m
Altura de orificio de entrada	0.25 m
Altura de orificio de salida	0.25 m
Diámetro de orificios de salida de biogás	0.007 m

Fuente: Herrera, A. y Montes, A. Diseño, construcción y evaluación de un reactor anaeróbico para el tratamiento de las aguas mieles de un beneficio húmedo de café

Figura 1. Esquema del reactor ABR



Fuente: Herrera, A. y Montes, A. Diseño, construcción y evaluación de un reactor anaeróbico para el tratamiento de las aguas mieles de un beneficio húmedo de café.

Para el diseño del reactor se realizó la calibración de la bomba peristáltica con el fin de obtener el caudal mínimo que la bomba era capaz de alimentar, para que el volumen del reactor fuera lo más pequeño posible con el tiempo de retención establecido en 44 horas; sin embargo, en ese momento aún no se tenía disponibilidad del agua miel para hacer la calibración por lo cual se utilizó agua potable.

Al momento de la operación, el caudal de ingreso disminuyó significativamente por la cantidad de sólidos que el agua miel poseía e hizo que aumentara el tiempo de retención hidráulica, lo que insidió en los resultados de la investigación. El caudal y tiempo de retención operacionales se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Caudales y tiempos de retención hidráulica

	V (m3)	Q (L/h)	TRH (h)	TRH (días)
Diseño	0.04	0.91	44	1.83
Operación	0.04	0.21	186.72	7.78

Fuente: Herrera, A. y Montes, A. Diseño, construcción y evaluación de un reactor anaeróbico para el tratamiento de las aguas mieles de un beneficio húmedo de café.

C. Evaluación del Reactor ABR

Al evaluar el funcionamiento del reactor se utilizaron 6 muestras de agua miel, suministradas cada semana, entre los meses de febrero a abril del año 2016, que permitieron conocer la calidad de la misma durante casi todo el período de cosecha de café.

La determinación del número de muestras se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha}}{2}\right)^2 \left(\frac{S}{E}\right)^2 \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde n es el tamaño de la muestra, $Z_{\alpha/2}$ es el área bajo la curva normal, S es desviación estándar y E es el error por estimación. Con esta ecuación se determinó que 6 muestras son suficientes para la evaluación del reactor, con un nivel de confianza del 95%. Además, se consideró la limitación del espacio físico para el almacenamiento del agua miel debido a que parte de la evaluación del reactor fue posterior al tiempo de cosecha del café.

Para determinar si el tratamiento con el reactor ABR realmente afectó en la magnitud de los parámetros fisicoquímicos evaluados, se utilizó la prueba de hipótesis para la razón de dos variables que compara la varianza entre los valores de entrada con los de salida del tratamiento y se utilizó como estadístico de prueba o comparador la F de Fischer. El nivel de confianza fue de 95% ya que se consideró que este porcentaje representa una baja probabilidad de error y un alto grado de credibilidad de los resultados.

Resultados

Los parámetros analizados en la entrada y salida del reactor fueron: pH, alcalinidad, DQO y DBO₅, cuyos resultados de las 6 muestras evaluadas se muestran a continuación:

Figura 2. Cambio del pH del agua miel tratada en el reactor ABR

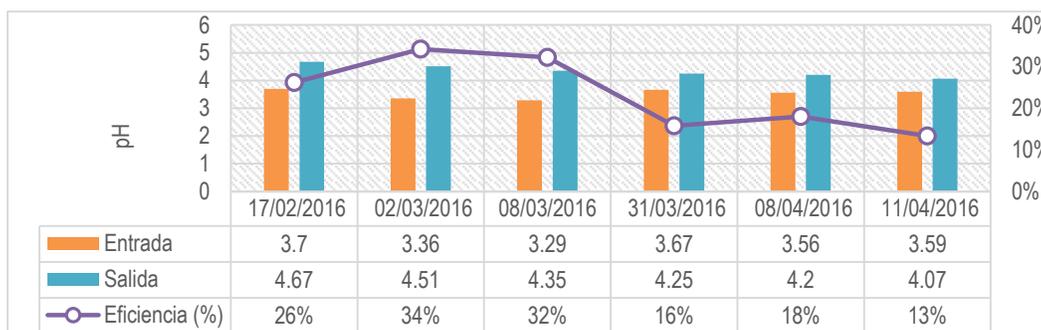


Figura 3. Cambio en la alcalinidad de las muestras tratadas con el reactor ABR

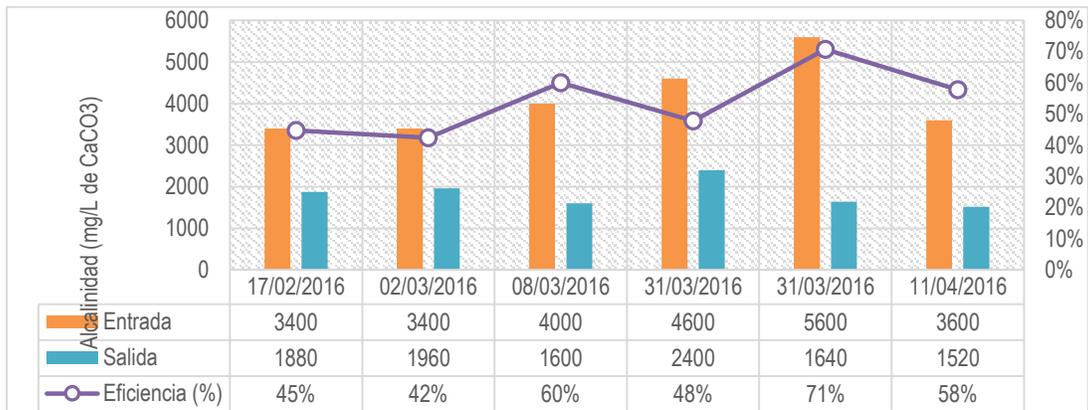


Figura 4. Cambio en la DQO de las muestras tratadas con el reactor ABR

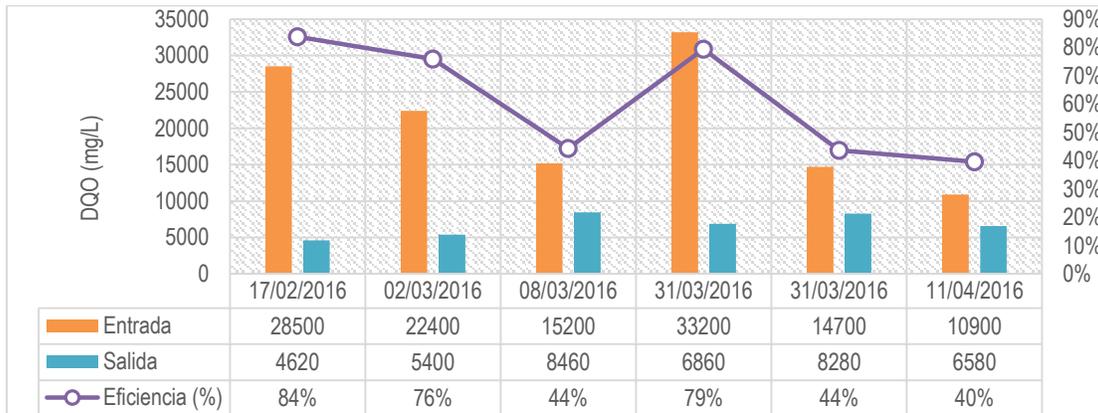
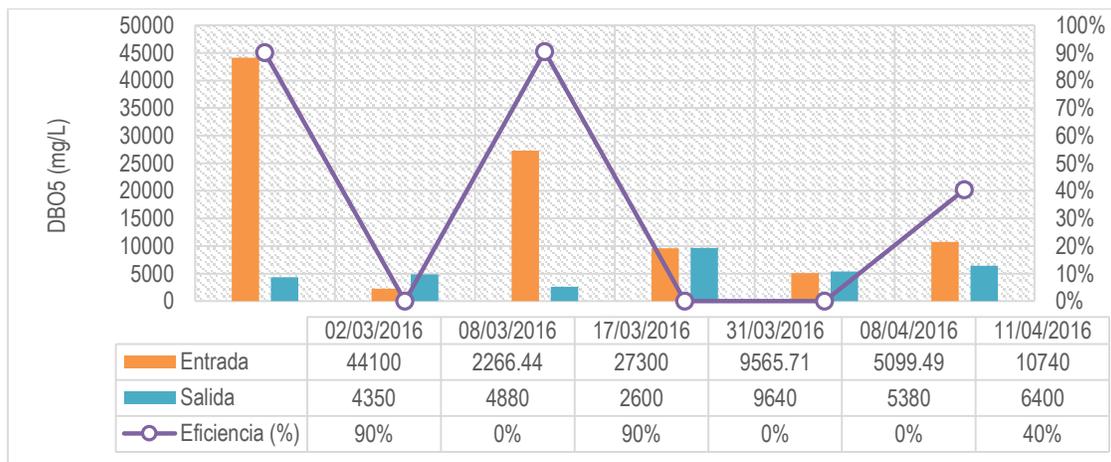


Figura 5. Cambio en la DBO5 de las muestras tratadas con el reactor ABR



Análisis de resultados

Los parámetros analizados en la entrada y salida del reactor ABR permitieron conocer su comportamiento para el tratamiento del agua miel y determinar si la eficiencia obtenida es significativa para utilizar este reactor en la industria cafetalera. A continuación, se interpretan los resultados obtenidos.

a. pH

El comportamiento del pH en las muestras de agua miel evaluadas de febrero a abril 2016 se muestra en la Figura 2.

Como se puede observar en la gráfica, el pH del agua miel aumentó luego de pasar por el ABR. El valor de este parámetro creció en un promedio de 0.8 unidades, el agua de ingreso poseía un pH promedio de 3.5 unidades y a la salida un valor promedio de 4.3 unidades lo que implica que el tratamiento tuvo una eficiencia del 23%.

Este valor fue analizado estadísticamente por medio de la prueba de comparación de medias apareadas para determinar si existe diferencia significativa entre el valor promedio del pH del agua de entrada con el promedio del pH del agua de salida del reactor ABR, se utilizó un nivel de confianza del 95% cuyo resultado determinó que el potencial de hidrógeno del agua miel sí fue modificado por el tratamiento; sin embargo, la magnitud de este parámetro no se elevó hasta alcanzar una magnitud considerada neutra y aceptable para descargar a un cuerpo receptor según normativa guatemalteca.

Alcalinidad

En la figura 3, se puede observar el comportamiento en la disminución de alcalinidad al pasar por el reactor. Las muestras tratadas con el reactor ABR tuvieron una disminución promedio de la alcalinidad de 2,266 mg/L de CaCO_3 , equivalente a 54%. Lo que significa que las muestras de agua miel de ingreso presentaban un valor medio de 4,100 mg/L de CaCO_3 y al pasar por el tratamiento con el reactor ABR salieron con un valor promedio de 1,833 mg/L.

El análisis estadístico realizado, con un nivel de confianza del 95% mostró que el ABR, sí modificó significativamente la magnitud de la alcalinidad de las muestras de agua, reduciendo su concentración; sin

embargo, se buscaba que esta aumentara, basándose en el hecho que se produce alcalinidad cuando se destruyen las cadenas de proteínas contenidas en el agua miel al estar sometidas a un proceso biológico por la formación de moléculas de carbonato.

b. DQO

El cambio de la DQO de las muestras de entrada y salida del agua miel en el reactor ABR muestra que el equipo tuvo una eficiencia promedio de 61% para la remoción de este parámetro cuyo comportamiento se muestra en la figura 4.

La gráfica 4 muestra que, en las 6 muestras evaluadas, la magnitud de la DQO disminuyó luego de pasar por el tratamiento. El cambio promedio en la magnitud de reducción de la DQO fue de 14,116 mg/L, pasando de 20,816 mg/L a 6,700 mg/L.

En este caso, el análisis de comparación de medias apareadas, realizado con un 95% de confianza, demuestra también que existe una diferencia significativa entre el valor de la DQO del agua miel antes y después de ser tratada en el reactor tipo ABR, haciendo que esta disminuya.

La disminución en el valor de la DQO se debió al contacto del agua miel con el lecho de lodos que se encontraba al fondo del reactor, cuyos microorganismos fueron capaces de degradar la materia orgánica a lo largo de cada uno de sus 8 compartimientos.

c. DBO_5

Al observar la capacidad de reducción de la DQO del agua miel, se espera que la DBO_5 tenga un comportamiento similar, ya que en el agua miel tienen predominancia los compuestos orgánicos y no tanto los compuestos químicos oxidables; por tratarse de un tratamiento biológico, cuyo fin es degradar la mayor cantidad de materia orgánica; sin embargo, los resultados obtenidos no muestran este comportamiento, para lo cual se presenta la gráfica de la figura 5.

Al evaluar la DBO_5 de las muestras que eran tratadas en el ABR se observó que en tres de ellas el valor de este parámetro disminuía, lo cual se podría atribuir al tipo de agitación que sufría el agua dentro del reactor, debido a los baffles instalados dentro de él, lo cual mejoraba el tipo de contacto entre el agua miel y los lodos del reactor. Pero, en dos muestras el valor de la

DBO₅ aumentó, posiblemente debido al alto tiempo de retención del reactor.

Esto se vio reflejado en el análisis estadístico que mostró que no existe una diferencia significativa entre la magnitud de la DBO₅ del agua a la entrada y a la salida del reactor ABR; por lo que, pasar de 16,511 mg/L a 5,541 mg/L en promedio, con eficiencia del 37% no es suficiente, como único tratamiento, para reducir la DBO₅ del agua miel.

También es necesario tomar en cuenta que su tiempo de retención, 7.7 días, fue demasiado elevado debido a la variación de caudal que existió al momento de la operación por la alta cantidad de sólidos presentes en el agua miel; por lo que se recomienda realizar la calibración de la bomba con muestras de agua miel para que el volumen del reactor sea conforme al tiempo de retención de diseño y almacenar el agua miel la menor cantidad de tiempo posible ya que esto modifica sus características.

Conclusiones

Al evaluar la eficiencia del reactor ABR a escala laboratorio, para el tratamiento de las aguas mieles, por medio de los parámetros de pH, alcalinidad, DQO y DBO₅, se determinó que reduce en gran medida la magnitud de los mismos y se puede replicar a una escala mayor, modificando su tiempo de retención hidráulica.

El reactor ABR es capaz de aumentar la magnitud del potencial de hidrógeno del agua miel en un 23%, pasando de un valor promedio de 3.53 a 4.34 unidades; sin embargo, no es capaz de llevar el valor de este parámetro hasta un valor que pueda ser descargado a un cuerpo receptor, según límites máximos permisibles establecidos en la normativa guatemalteca.

El agua miel tratada en el ABR disminuyó su alcalinidad en un promedio de 2,266 mg/L de CaCO₃, es decir que el tratamiento redujo este parámetro de 4,100 a 1,833 mg/L de CaCO₃ con una eficiencia del 54%.

La demanda química de oxígeno del agua tratada en el ABR cambió en un promedio de 14,116 mg/L, lo que significa que las muestras evaluadas disminuyeron de 20,816 mg/L a 6,700 mg/L mostrando una eficiencia promedio de 61%.

El reactor ABR no fue capaz de modificar significativamente la demanda bioquímica de oxígeno de las muestras de agua miel tratadas. Su eficiencia

fue de 37%, en donde el agua de ingreso presentaba un valor promedio de 16,511 mg/L y disminuyó a 5,541 mg/L luego de pasar por el reactor.

Agradecimientos

Se agradece a la Asociación Nacional del Café, a la Dirección General de Investigación de la USAC, personal del Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria y al Dr. Stewart Oakley por su valioso apoyo en la presente investigación.

Referencias

- Asociación Nacional del Café (2017). Manual de Beneficiado Húmedo del Café, Guatemala. Recuperado de https://www.anacafe.org/glifos/index.php/Caficultura_BeneficiadoHumed. Consultado el 4 de mayo 2018.
- Foxon, Buckley, Brouckaert, Dama, Mtembu, Rodda, Smith, Pillay, Arjun, Lalbahadur y Bux, (2006). The evaluation of the anaerobic baffled reactor for sanitation in dense peri-urban settlements. Reporte de la comisión de investigación del agua. Universidad de KwaZulu-Natal, Durban e Instituto de Tecnología de Durban. WRC (ISBN No: 1-77005-371-9).
- Herrera, A. y Montes, A, (2017). Diseño, construcción y evaluación de un reactor anaeróbico para el tratamiento de las aguamieles de un beneficio húmedo de café. Tesis de maestría. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Jingxia, Y., Stewart, M. & Xiaoliang, D., (2014). "Cog" anaerobic process for the treatment and valorization of coffee processing wastewater. Ponencia presentada en la quinta conferencia de Ingeniería de desechos y valorización de la biomasa, Rio de Janeiro, Brasil.
- Romero, J. (Ed.). (2004). Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y principios de diseño. Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Información del autor

Ana Gloria Montes Peña, Ingeniera Química graduada de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala en el año 2015 y M.Sc. en Ingeniería Sanitaria de la Escuela Regional de

Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC) en el año 2018.

Experiencia en revisión de estudios de evaluación de impacto ambiental, asesoría en temas ambientales, agua y saneamiento, conocimiento en legislación ambiental, auditorías ambientales, muestreo de aguas residuales y agua potable, elaboración de indicadores ambientales y cálculo de inventario de gases de efecto invernadero en el área industrial.