

USO DE ROCA CALIZA PARA EL AJUSTE DEL pH DE LAS AGUAS MIELES DEL CAFÉ

Marco Antonio Moreno Alvarado¹

RESUMEN.

Este artículo muestra los resultados de la evaluación de un modelo experimental de lecho de roca caliza, a nivel de laboratorio, como alternativa de tratamiento primario para el ajuste del potencial de hidrógeno (pH) de las aguas mieles producidas en el beneficio de café húmedo tecnificado "Nuevo Sendero" en el periodo de cosecha 2012-2013. Los resultados de la evaluación del modelo experimental de roca caliza demostraron que es posible obtener variaciones de pH en un rango que varían de 0.29 a 2.30 unidades de pH. De esta forma el modelo experimental de lecho de roca caliza permite el ajuste de pH del agua miel del café desde un valor inicial de 4.83 unidades de pH hasta un valor de 7.43 unidades de pH, haciendo variar la altura de medio de roca caliza dentro del lecho y la velocidad ascensional de flujo, también conocida como carga hidráulica disponible. Así mismo se presentan dos ecuaciones experimentales, desarrolladas con los datos obtenidos del modelo evaluado, que relacionan la altura del medio de roca caliza, la velocidad de flujo ascensional y la variación o ajuste de pH del agua miel, con estas ecuaciones es viable diseñar lechos de roca caliza a partir de un valor de pH requerido.

PALABRAS CLAVE: Aguas mieles del café, lecho fijo, tratamiento primario, simulación, roca caliza, carga hidráulica.

ABSTRACT.

This article shows the evaluation results of an experimental model of limestone bedrock, at the laboratory level, as alternative primary therapy for adjusting the hydrogen potential (pH) of the wastewater produced in the wet coffee mill technified "Nuevo Sendero" in the harvest period 2012-2013. The evaluation results of the experimental model showed that limestone is possible to obtain variations in pH in the range varying from 0.29 to 2.30 pH units. Thus experimental model limestone bedrock allows adjustment of pH coffee honey water from an initial value of 4.83 pH units to a value of 7.43 pH units, by varying the average height within limestone bed and upward flow rate, also known as hydraulic head available. Likewise two equations are presented experimental data developed the model evaluated height linking limestone through the upward flow velocity and the change or adjustment of pH honey water with these equations is feasible to design beds limestone from a required pH.

KEY WORDS: Coffee honey water, fixed bed, primary treatment, simulation, limestone, hydraulic.

INTRODUCCIÓN

Este artículo presenta la metodología para la construcción de un lecho de roca caliza, como una alternativa experimental de tratamiento primario para el ajuste del potencial de hidrógeno, así mismo presenta los resultados y el análisis de los datos experimentales obtenidos después de la evaluación de la alternativa experimental propuesta para el ajuste de pH. Con el arreglo de datos de mayor ajuste estadístico, se propone en este artículo dos ecuaciones experimentales para el diseño de lechos de roca caliza a partir de un valor de pH requerido.

Por otra parte, se aclara que la totalidad de los datos presentados en este artículo son experimentales y fueron tomados del estudio "Evaluación de la eficiencia de modelos experimentales de lecho de roca caliza y laguna facultativa, a escala de laboratorio, para el ajuste del potencial de hidrógeno y la remoción de la carga contaminante de las aguas mieles de un beneficio húmedo tecnificado de café", elaborado² por el autor del presente artículo. Así mismo, las muestras de agua miel de café utilizadas en la fase experimental del estudio, en el que se basa el presente artículo, se recolectaron en el periodo de

cosecha 2012-2013 en el beneficio húmedo tecnificado "Nuevo Sendero", ubicado la aldea Chapas, del municipio Nueva Santa Rosa del departamento de Santa Rosa.

METODOLOGÍA

Todos los datos experimentales presentados en este artículo fueron obtenidos a partir de la evaluación de un modelo experimental, a escala de laboratorio, de un lecho de roca caliza de flujo ascendente con el objeto de realizar ajuste en el potencial de hidrógeno del agua miel de un beneficio húmedo tecnificado.

El proceso de ajuste del potencial de hidrógeno del agua miel de un beneficio húmedo tecnificado consiste, en términos generales, en hacer pasar el fluido por un lecho de roca caliza, procurando una velocidad de flujo ascensional o carga hidráulica tal que, el contacto del líquido ácido con la superficie de la roca caliza reaccione y que del producto de esta reacción se modifique el pH obtenido un líquido de menor acidez, neutro o alcalino. Para lograr poner en marcha este proceso se diseñaron y se ejecutaron las siguientes actividades:

¹ En coautoría compartida con M.Sc. Inga. Bianca Alas.

- a) Consultas bibliográficas.
- b) Construcción y montaje de un modelo experimental de lecho de roca caliza.
- c) Determinación del pH del agua miel previo al inicio del proceso de neutralización.
- d) Fijar la altura de roca caliza dentro del lecho.
- e) Hacer pasar el agua miel por el lecho de roca caliza y realizar aforo para determinar la carga hidráulica disponible.
- f) Correr el modelo y efectuar la toma de muestras de agua del efluente del modelo experimental.
- g) Medición del potencial de hidrogeno del agua efluente (muestras recolectadas).
- h) Reemplazo de la roca caliza, previo al inicio de una nueva corrida del modelo experimental a diferente altura de roca caliza.
- i) Construcción del gráfico que relaciona la carga hidráulica disponible versus el potencial de hidrogeno del agua miel efluente del lecho de roca caliza.
- j) Replicar la metodología de los numerales desde d hasta i.

A continuación se detallan y amplían las principales acciones en la metodología de obtención de los datos mostrados en este artículo.

1. Construcción y montaje del modelo experimental de roca caliza

El modelo experimental se construyó a partir de los siguientes elementos:

- Recipiente dispensador: es un elemento que posee un volumen de 5 galones, al cual se le adaptó una llave de paso para regular la salida del fluido.
- Lecho de contacto: éste dispositivo consiste en:
 - Un cilindro plástico transparente de 2.0m de altura, 150mm de diámetro interno y provisto de un dispositivo de salida en la parte inferior para la purga de flujos, a la cual, de manera opcional, se le puede adaptar una manguera transparente para hacer verificaciones de altura hidráulica en el modelo. En la parte superior del cilindro se ubica un dispositivo por donde fluye el agua miel después del contacto con la roca caliza.
 - Una tubería de PVC, de ½" de diámetro, ubicada en el centro del lecho. La función de esta tubería es alimentar al lecho con líquido desde el recipiente dispensador.

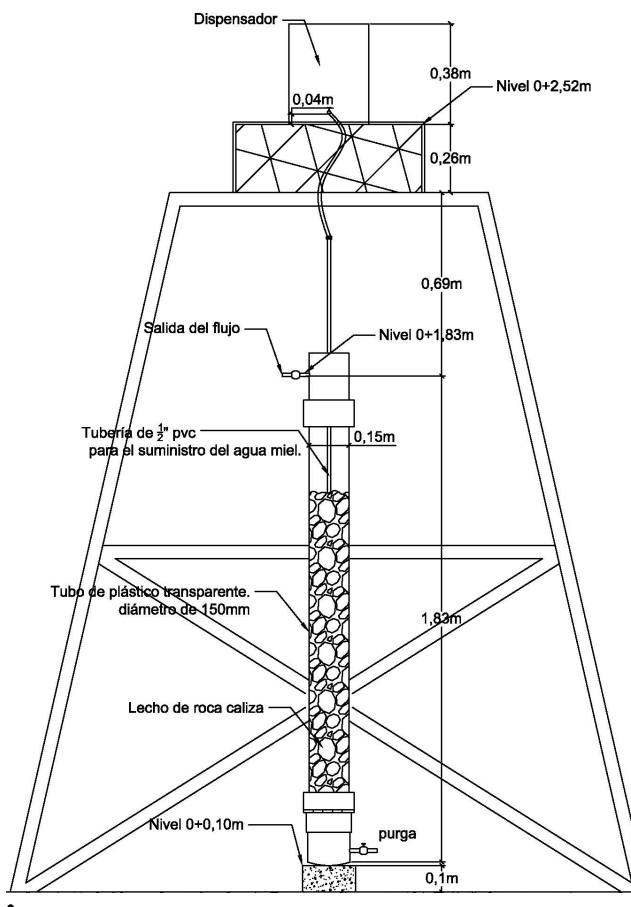


Figura 1 esquema de lecho de roca

Roca caliza: el lecho formado por un volumen de roca caliza de una (1) pulgada de diámetro, dispuesto de tal forma que permitió que entre sus espacios fluyera de forma ascendente el agua miel y de esta forma se genere el contacto de ésta con la superficie de la roca caliza.

2. Determinación del potencial de hidrógeno del agua miel previo al proceso de ajuste

Se tomó una muestra representativa homogenizada de agua miel y se midió el pH. Este valor representó el potencial de hidrógeno del agua previo al contacto de la misma con el lecho de roca caliza.

3. Fijar la altura del medio de roca caliza y determinar la carga hidráulica disponible.

Se fijó una altura de medio de roca caliza, con la cual se realizaron diferentes pruebas de carga hidráulica. La carga hidráulica se calculó al dividir el caudal del efluente del lecho entre el área transversal. Para tal efecto se realizaron aforos para establecer la carga que corresponde a cada caudal efluente del lecho. La ecuación para el cálculo de la carga hidráulica disponible o "C.H.D" por sus siglas, es la siguiente:

$$C.H.D. = \frac{CALC}{ATLC}; \text{ Ecuación 1}$$

Donde:

CALC: Caudal efluente del lecho de roca caliza

ATLC: área transversal del lecho de roca caliza

El área transversal y la altura del medio de roca caliza se mantienen constantes para cada ensayo a diferentes cargas hidráulicas.

4. Operación del modelo de ajuste de potencial de hidrógeno y muestreo del efluente

Luego de fijar la altura del lecho y establecer una carga hidráulica, se dio inicio a la operación del modelo haciendo fluir de forma ascendente el agua miel a través del lecho y colectando muestras para determinar el pH.

Las muestras colectadas fueron analizadas a fin de determinar las variaciones de pH inmediatamente después de su contacto con la roca caliza. A una misma altura de lecho de roca caliza se varió la carga hidráulica a fin de determinar los efectos de esta variable en los cambios del pH del agua miel. Al finalizar todas las pruebas de carga hidráulica a una misma altura de lecho, se procedió al cambio del medio de roca caliza.

5. Parámetros de control

Se estableció como único parámetro de control el pH, con el que se buscó determinar la eficiencia del lecho de roca caliza. El monitoreo del pH se realizó a partir de la toma de muestra del efluente del modelo de contacto. Todas las mediciones de pH se realizaron utilizando un potenciómetro.

6. Elaboración del gráfico carga hidráulica disponible versus potencial de hidrógeno

A cada altura de medio le correspondió un rango de cargas ensayadas y los valores de pH resultantes. Con los datos disponibles se construyó un gráfico que relaciona la carga hidráulica con el pH para cada altura de medio.

7. Análisis de resultados

Haciendo uso de las herramientas estadísticas del Microsoft Excel, se realizó un arreglo de los datos obtenidos, se determinó la tendencia con mayor coeficiente de ajuste y la ecuación de tendencia de datos de variación de pH versus carga hidráulica disponible, para cada altura de lecho ensayada.

RESULTADOS

A cada prueba de ajuste de pH le corresponde una carga hidráulica en función de la altura de medio. En la Tabla 1 se muestra el resultado del cálculo de la carga hidráulica a partir de aforos volumétricos. El diámetro del lecho de la roca caliza fue de 0.0762m y el área del lecho de 0.0046m², los que fueron constantes en todas las pruebas del modelo.

Tabla 1 alturas de medio y cargas hidráulicas

Tiempo (s)	Volumen (ml)	Caudal (ml/d)	Carga hidráulica, Q/A (m/d)	Altura del medio (m)
3.56	200.0	733,446.5	160.83	0.50
66.0	200.0	261,818.2	57.41	1.00
231.6	288.0	107,440.4	23.56	1.50
106.1	34.00	27,687.1	6.07	1.50
157.9	900.0	492,245.4	107.94	1.00
90.4	198.0	189,343.7	41.52	1.00
120.0	120.0	86,400.0	18.95	1.00
34.2	192.0	484,485.9	106.24	1.00
149.6	50.0	28,877.0	6.33	1.50
489.1	50.0	8,832.6	1.94	1.50
101.5	50.0	42,561.6	9.33	1.83
123.3	50.0	35,036.5	7.68	1.83

Los resultados de la carga hidráulica y el correspondiente ajuste de pH, en términos de Δ pH se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 carga hidráulica y el ajuste de pH

Altura del medio (m)	Carga hidráulica, Q/A (m/d)	pH inicial	pH final	Δ pH
0.87	No registrado	4.83	7.13	2.30
0.87	No registrado	4.83	7.43	2.60
0.50	160.83	4.93	5.88	0.95
1.00	57.41	4.93	6.25	1.32
1.50	No registrado	4.93	6.18	1.25
1.50	23.56	5.47	5.86	0.39
1.50	6.07	5.47	6.00	0.53
1.00	107.94	5.47	5.76	0.29
1.00	41.52	5.47	6.12	0.65
1.00	18.95	5.47	6.11	0.64
1.00	106.24	4.96	5.86	0.90
1.50	6.33	4.96	6.26	1.30
1.50	1.94	4.96	6.23	1.27
1.83	9.33	4.96	6.05	1.09
1.83	7.68	4.96	6.03	1.07
promedio	45.65	5.13	6.14	1.02

Las alturas de lecho de contacto de 1.0m y 1.5m poseen los mejores coeficientes de correlación “R”, como se muestra en la gráfica 1 y en la gráfica 2.

Se integraron las dos curvas en un solo gráfico tal como se muestra en el Gráfica 3.

Tabla 3 carga hidráulica vs. pH, altura medio 1.0m

Altura del medio	Carga hidráulica, Q/A (m/d)	pH inicial	pH final	Δ pH
1.00	57.41	4.93	6.25	1.32
1.00	107.94	5.47	5.76	0.29
1.00	41.52	5.47	6.12	0.65
1.00	18.95	5.47	6.11	0.64
1.00	106.24	4.96	5.86	0.90

Gráfica 1 carga hidráulica vs. pH, altura 1.0m

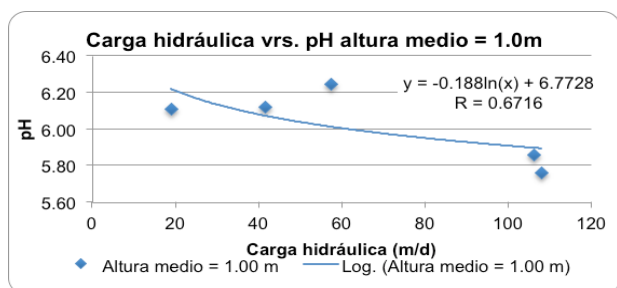
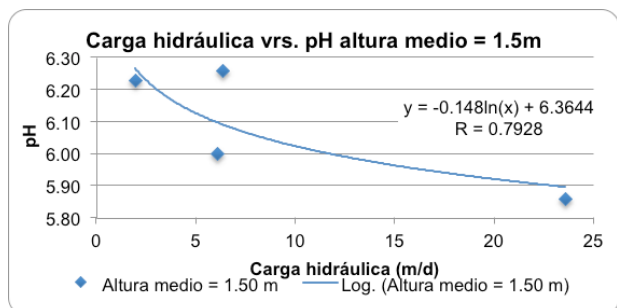


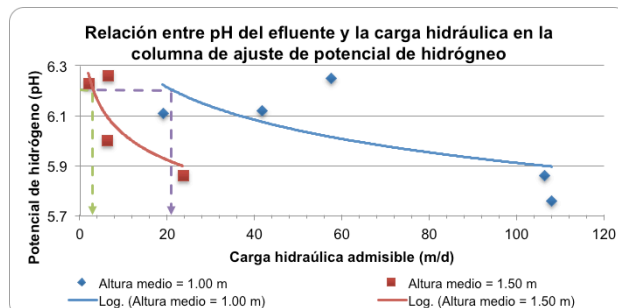
Tabla 4 carga hidráulica vs. pH, altura medio 1.5m

Altura del medio	Carga hidráulica, Q/A (m/d)	pH inicial	pH final	Δ pH
1.50	23.56	5.47	5.86	0.39
1.50	6.07	5.47	6.00	0.53
1.50	6.33	4.96	6.26	1.30
1.50	1.94	4.96	6.23	1.27

Gráfica 2 carga hidráulica vs. pH altura 1.5m



Gráfica 3 pH del efluente del lecho y carga hidráulica, tendencias de datos integrados



Las ecuaciones que describen el comportamiento del pH a diferentes cargas hidráulicas y a las alturas de 1.00m y 1.50m se muestran en la Tabla 5. El valor de carga hidráulica admisible mostrado en la Tabla 5 se calculó utilizando las ecuaciones logarítmicas de tendencia de datos de pH y carga hidráulica disponible del modelo, considerando un pH requerido hipotético de 6.2 unidades de pH.

Tabla 5 Ecuación logarítmica de tendencia de datos

Altura de medio	Ecuación logarítmica de tendencia de datos	pH	Carga hidráulica admisible (m/día)
1.00 m	$y = -0.188\ln(x) + 6.7728$	6.20	21.050
1.50 m	$y = -0.148\ln(x) + 6.3644$	6.20	3.037

Ecuaciones experimentales:

$y = -0.188\ln(x) + 6.773$; Ecuación experimental 1

$y = -0.148\ln(x) + 6.364$; Ecuación experimental 2

Donde:

X: es la carga hidráulica disponible (m/día).

Y :es el valor de pH ajustado (unidades de pH).

DISEÑO DEL LECHO DE CONTACTO DE ROCA CALIZA DE UN BENEFICIO HÚMEDO TECNIFICADO

A partir de datos experimentales, se presenta una aplicación de las ecuaciones experimentales del modelo, para tal efecto se considera un caso hipotético en el que es necesario ajustar el potencial de hidrógeno hasta 6.2 unidades del agua miel, efluente del beneficio húmedo tecnificado “Nuevo Sendero”.

Solución:

Utilizando la “**ecuación experimental 2**” de ajuste de datos de carga hidráulica- altura de medio, se determinó que el valor de carga hidráulica correspondiente a la obtención de un potencial de hidrógeno de **6.2** para una altura de lecho de roca caliza es igual a **3.037 m/día**.

Se considera una capacidad del equipo de bombeo igual a **3 litro/segundo (0.003 m³/s, 259.60 m³/día, 0.18 m³/minuto)** y un volumen de agua diario máximo durante el 90% del tiempo de producción igual a **30.00 m³**. Con los datos anteriores se obtiene el tiempo de bombeo requerido, según la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Tiempo de bombeo} &= \frac{\text{Volumen}}{\text{Caudal de bombeo}} \\ &= \frac{0.003 \text{ m}^3/\text{s}}{30.00 \text{ m}^3} = \\ &= 10,000 \text{ segundo} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tiempo de bombeo} &= 166.67 \text{ minuto} = \\ &= 2.78 \text{ hora} \end{aligned}$$

El área total del lecho de roca caliza es la siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Área del lecho} &= \frac{\text{Capacidad de la bomba}}{\text{Carga hidráulica}} = \\ &= \frac{259.69 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{3.037 \frac{\text{m}}{\text{día}}} = \\ &= 85.35 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Si se consideran dos módulos de igual área se obtienen las siguientes dimensiones:

$$\begin{aligned} \text{Área de cada módulo} &= \frac{\text{Área del lecho}}{2} = \\ &= \frac{85.35 \text{ m}^2}{2} = \\ &= 42.67 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Área de módulo} &= a \times b; \quad \text{donde } b = 2a \\ \therefore \text{Área de modulo} &= 2a^2 \end{aligned}$$

Donde:

$$\begin{aligned} a &= \text{Ancho del lecho} \\ b &= \text{Largo del lecho} \end{aligned}$$

Por lo tanto, las dimensiones de cada uno de los módulos son las siguientes:

$$\begin{aligned} \text{Ancho del lecho (a)} &= \sqrt{\frac{\text{Área de modulo}}{2}} = \\ &= \sqrt{\frac{42.67 \text{ m}^2}{2}} = 4.62 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Largo del lecho (b)} &= 2 \times \text{Ancho del lecho} = 2 \times 4.62 \text{ m} \\ &= 9.24 \text{ m} \end{aligned}$$

Considerando una profundidad de medio de roca caliza igual a 1.50 m, se obtiene un volumen de lecho total igual a:

$$\begin{aligned} \text{Volumen del lecho} &= \text{Área} \times \text{Profundidad} \\ &= 85.35 \text{ m}^2 \times 1.50 \text{ m} = \\ &= 64.01 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Para una carga hidráulica volumétrica igual a:

$$\begin{aligned} \text{Carga volumétrica} &= \frac{\text{Caudal máximo}}{\text{Volumen del lecho}} = \\ &= \frac{30.00 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{64.01 \text{ m}^3} = \\ &= 0.4687 \text{ día} \end{aligned}$$

ANÁLISIS DE RESULTADOS

- El máximo diferencial de potencial de hidrógeno obtenido de forma instantánea fue de 1.32 unidades de pH y correspondió a una altura de medio igual a 1.00 m y a una carga hidráulica admisible de 57.41 m/día, mientras que, el mínimo diferencial de potencial de hidrógeno obtenido de forma instantánea fue igual a 0.29 unidades de pH y correspondió a una altura de medio igual a 1.00 m y a una carga hidráulica admisible de 107.94 m/día.
- Se observó que el valor promedio del potencial de hidrógeno obtenido fue igual a 6.14 unidades de pH, reportándose un pH de 7.43 como valor máximo y un pH de 5.76 como valor mínimo.
- Se determinó que, para una altura de lecho igual a 1.50 metros se obtiene un coeficiente de correlación [R] de 0.7928, mientras que, para una altura de lecho igual a 1.00 metro, se obtiene un coeficiente de correlación [R] de 0.6716.
- Adicionalmente se observó que, para todas las alturas de lecho de roca caliza, el incremento de la carga hidráulica ocasionó una disminución en el diferencial de ajuste instantáneo del potencial de hidrógeno obtenido.

CONCLUSIONES.

- Fue posible ajustar el potencial de hidrógeno de las aguas mieles del café de un beneficio húmedo tecnificado desde un valor inicial de 4.83 unidades de pH hasta un valor máximo de 7.43 unidades de pH.
- Un aumento en la carga hidráulica en el lecho de roca caliza implica una disminución en la eficiencia de ajuste del potencial de hidrógeno, tal como se observa en la tendencia de los datos para cada altura de medio de roca caliza en la gráfica 1.
- El máximo diferencial de potencial de hidrógeno obtenido de forma instantánea fue de 1.32 unidades de pH y correspondió a una altura de medio igual a 1.00 m y a una carga hidráulica admisible de 57.41 m/día.

- Para una altura de lecho igual a 1.50 metros se obtiene un coeficiente de correlación [R] de 0.7928, entre los datos de ajuste de pH versus carga hidráulica disponible, mientras que para una altura de lecho igual a 1.00 metro, se obtiene un coeficiente de correlación [R] de 0.6716, correspondiente al mismo arreglo de datos.
- En base a los datos experimentales presentados en este artículo, se concluye que es favorable la implementación de lechos de roca caliza como unidad de tratamiento primario para el ajuste inmediato del potencial de hidrógeno de las aguas mieles generadas en un beneficio húmedo tecnificado.

BIBLIOGRAFÍA

- METCALF & EDDY, INC. *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Tomo I.* 1ª ed. en español. México, D.F.: McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A. de C.V., 1996. 752 p. ISBN: 970-10-1005-1
- ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y principios de diseño.* 3ª ed. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010. 1248 p. ISBN: 958-8060-13-3.
- SAWYER, CLAIR N., McCARTY, PERRY L., PARKIN, GENE F. *Química para Ingeniería Ambiental.* 4ª ed. Bogotá: McGraw Hill, 2001. 713 p. ISBN: 958-41-0164-1.
- OAKLEY, STEWART M., Dr. *Lagunas de estabilización en Honduras. Manual de diseño, construcción, operación y mantenimiento, monitoreo y sostenibilidad.* 2005. 247 p.
- ASOCIACION NACIONAL DEL CAFÉ (ANACAFE). Departamento desarrollo y medio ambiente. Coordinatura de medio ambiente y técnicos de postcosecha. *Avances en el tratamiento físico químico de aguas residuales del beneficiado húmedo del café por medios de plantas depuradoras en Guatemala.* 2004.