

# **Evaluación de la presencia de Al, Fe y Mn en el Sistema de Agua Potable de Zamorano**

**Lesly Gisela Enríquez Balcázar**

**Zamorano, Honduras**

Noviembre, 2012

ZAMORANO  
DEPARTAMENTO DE AMBIENTE Y DESARROLLO

# **Evaluación de la presencia de Al, Fe y Mn en el Sistema de Agua Potable de Zamorano**

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar  
al título de Ingeniera en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente en el  
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por:

**Lesly Gisela Enríquez Balcázar**

**Zamorano, Honduras**

Noviembre, 2012

# **Evaluación de la presencia de Al, Fe y Mn en el Sistema de Agua Potable de Zamorano**

Presentado por:

Lesly Gisela Enríquez Balcázar

Aprobado:

---

Erika Tenorio, M.Sc.  
Asesora principal

---

Arie Sanders, M.Sc.  
Director  
Departamento de Ambiente y Desarrollo

---

Victoria Cortés, M.Sc.  
Asesora

---

Raúl Zelaya, Ph.D.  
Decano Académico

## RESUMEN

Enríquez Balcázar, L.G. 2012. Evaluación de presencia de Al, Fe y Mn en el Sistema de Agua Potable Zamorano. Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. 30 p.

Las fuentes abastecedoras del sistema de agua potable de Zamorano tienen pH bajos y concentraciones elevadas de aluminio. Fuentes con pH ácidos ocasionan corrosión en las tuberías del sistema y favorecen la solubilidad de otros metales como el hierro (Fe) y el Manganeso (Mn). Los últimos cinco años Zamorano ha utilizado la alcalinización como mecanismo para regular el pH y reducir la solubilidad de los metales en el sistema. Se evaluó la presencia de Al, Fe, Mn y otros metales mediante métodos colorimétricos, absorción atómica y espectrofotometría de masas; se cuantificó la acidez, la alcalinidad y el pH en agua cruda y tratada. Se realizaron ensayos de dosificación con carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) en agua cruda para determinar las dosis óptimas que eleven el pH a valores aceptados por la normativa internacional. Mediante pruebas estadísticas de registros (2007-2012) se compararon indicadores de calidad en las fuentes del sistema (Agua Amarilla y El Benque). Se evaluó la eficiencia del tratamiento actual en la regulación del pH y el control de los metales. Agua Amarilla presentó concentraciones más elevadas de metales y pH más bajo. Pese a que en el agua tratada se reportaron incrementos de pH y reducciones significativas en Al, las concentraciones aún sobrepasan los valores máximos permitidos por la legislación vigente. El Fe incrementó en la red de distribución significativamente ( $P=0.044$ ) y el Mn fue constante ( $P=0.271$ ). Las dosis de alcalinizante recomendadas para incrementar el pH son de hasta 46.75 mg/L (165 lb de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ /día) por lo que se recomendó buscar otras alternativas de tratamiento para la remoción de metales o la inclusión de fuentes alternas de agua para el campus.

**Palabras clave:** Alcalinización, carbonato de sodio, metales, pH, potabilización.

## CONTENIDO

Portadilla .....	i
Página de firmas .....	ii
Resumen .....	iii
Contenido .....	iv
Índice de cuadros, figuras y anexos.....	v
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2 MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>3</b>
<b>3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>7</b>
<b>4 CONCLUSIONES .....</b>	<b>20</b>
<b>5 RECOMENDACIONES .....</b>	<b>21</b>
<b>6 LITERATURA CITADA.....</b>	<b>22</b>
<b>7 ANEXOS .....</b>	<b>24</b>

## ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros		Página
1.	Alcalinidad y acidez en el agua de la fuente de abastecimiento El Benque de la Reserva Biológica El Uyuca, Honduras. 2012. ....	7
2.	Alcalinidad y acidez en el agua de la fuente de abastecimiento Agua Amarilla de la Reserva Biológica El Uyuca, Honduras. 2012. ....	8
3.	Alcalinidad y acidez en el agua la primera casa en campus alto, EAP, Valle del Yeguaré, Honduras. 2012.....	8
4.	Alcalinidad y acidez en el agua de la última casa en campus alto, EAP, Valle del Yeguaré, Honduras. 2012.....	9
5.	Resultados comparativos del análisis ICP-MS de los elementos totales de las fuentes de abastecimiento de agua El Benque y Agua Amarilla de la Reserva Biológica El Uyuca, Honduras. 2012. ....	10
6.	Resultados comparativos del análisis ICP-MS de los elementos disueltos de las fuentes de abastecimiento de agua El Benque y Agua Amarilla de la Reserva Biológica El Uyuca, Honduras. 2012. ....	10
7.	Dosis de $\text{Na}_2\text{CO}_3$ recomendada en el tratamiento de agua cruda para alcanzar un pH de 6.5. ....	11
8.	Dosis de $\text{Na}_2\text{CO}_3$ recomendada en el tratamiento de agua cruda para alcanzar un pH de 7.0. ....	12
9.	Dosis de $\text{Na}_2\text{CO}_3$ recomendada en el tratamiento de agua cruda para alcanzar un pH de 7.5. ....	12
10.	Dosis de $\text{Na}_2\text{CO}_3$ recomendada en el tratamiento de agua cruda para alcanzar un pH de 8.0. ....	12
11.	Dosis de $\text{Na}_2\text{CO}_3$ recomendada en el tratamiento de agua cruda para alcanzar un pH de 8.5. ....	13
12.	Porcentaje de remoción del Al a diferentes dosis de $\text{Na}_2\text{CO}_3$ en las muestras del laboratorio de calidad de agua, Departamento de AD, EAP, Honduras. 2012. ....	14
13.	Porcentaje de remoción del hierro a diferentes dosis de $\text{Na}_2\text{CO}_3$ en las muestras del lab. calidad de agua, Departamento de AD, EAP, Honduras. 2012.....	14
14.	Efecto del tratamiento de potabilización de agua de la EAP, Honduras. Análisis del 2007-2011. ....	16
15.	Comparación de medianas y medias de las fuentes de abastecimiento del sistema de potabilización de agua de la EAP, Honduras. Análisis del 2007-2011. ....	16

Figuras	Página
1. Concentraciones de Al y Fe en oasis de residencias estudiantiles del campus central de la EAP, Honduras. 2012. ....	15
2. Diagrama de caja de los valores del pH de las fuentes de agua El Benque, Agua Amarilla y Lácteos de la EAP, Honduras. Análisis del 2007-2011. ....	17
3. Diagrama de caja de [Fe] en el agua de entrada y salida del sistema de agua potable de la EAP, Honduras. Análisis del 2007-2011. ....	18
4. Diagrama de caja de [Al] en el agua de entrada y salida del sistema de agua potable de la EAP, Honduras. Análisis del 2007-2011. ....	19
5. Diagrama de caja de [Mn] en el agua de entrada y salida del sistema de agua potable de la EAP, Honduras. Análisis del 2007-2011. ....	19
1.	

Anexos	Página
1. Sistema de agua potable de la EAP, Honduras. 2012. ....	24
2. Parámetros fisicoquímicos del agua potable. ....	24
3. Parámetros para sustancias inorgánicas con significado para la salud. ....	25
4. Parámetros para sustancias no deseadas en agua potable. ....	25
5. Análisis de calidad de agua potable de la EAP del año 2007 al 2011, fuente de abastecimiento El Benque de la Reserva Biológica El Uyuca, Honduras. ....	26
6. Análisis de calidad de agua potable de la EAP del año 2007 al 2011, fuente de abastecimiento A. Amarilla de la Reserva Biológica El Uyuca, Honduras. ....	28
7. Análisis de calidad de agua potable de la EAP del año 2007 al 2011, fuente de agua de consumo de la planta de lácteos, EAP, Honduras. ....	29
8. Elementos totales y disueltos en las fuentes de abastecimiento El Benque y Agua Amarilla de la Reserva Biológica El Uyuca. Análisis ICP-MS. 2012. ....	30

## 1. INTRODUCCIÓN

Un agua clara y potable es una necesidad humana básica; sin embargo, el acceso a ella continúa siendo una gran dificultad para comunidades de los países en desarrollo. La contaminación del agua por organismos patógenos constituye todavía una fuente de enfermedades importante en estos países. Sin embargo, es creciente el número de poblaciones que enfrentan además una contaminación química proveniente del uso de los agroquímicos, las actividades industriales y las fuentes domésticas (Castillo 2004).

El agua potable es aquella que se considera apta para el consumo humano puesto que no presenta riesgo alguno a la salud y adicionalmente cuenta con la aceptación de los consumidores por su apariencia estética (turbidez, olor, color, sabor) y su composición química. Para que un agua pueda considerarse apta para el consumo, debe cumplir con las normativas que regulan los parámetros físicos y químicos importantes para prevenir las enfermedades y garantizar la aceptabilidad en los usuarios. La presencia de metales en cantidades excesivas puede interferir con usos beneficiosos del agua debido a su toxicidad, por lo tanto frecuentemente es deseable medir y controlar las concentraciones de estas sustancias (Tchobanoglous *et al.* 2003). La medición constante de los metales en el agua es importante para prevenir graves enfermedades en el ser humano.

El agua potable que se consume en la Escuela Agrícola Panamericana (EAP) se origina de trece manantiales localizadas en dos sitios de la Reserva Biológica de Uyuca: El Benque y Agua Amarilla. El agua de estas fuentes se ha caracterizado por su bajo pH, altas concentraciones de aluminio [Al] y hierro [Fe], lo que resulta en la corrosividad en la red de distribución y poca aceptación por los consumidores ya que el agua usualmente presenta sabor metálico y es normal ver manchas en los equipos sanitarios del campus. El sistema de tratamiento de agua potable de Zamorano tiene aproximadamente 25 años de antigüedad, cuenta con una red de conducción desde los manantiales hasta dos tanques de almacenamiento en los cuales el agua es tratada mediante la alcalinización para ajustar el pH y cloración con fines de desinfección.

Los estudios anteriores y las evaluaciones periódicas realizadas en el agua cruda reportan valores de pH tan bajos como 3.7 cuando el valor mínimo permitido por la regulación internacional es de 6.5. A la fecha no se han realizado estudios que determinen las dosificaciones puntuales de alcalinizante con base en las fluctuaciones de pH del agua cruda con el fin de evitar problemas de corrosividad en las tuberías y equipos, el sabor metálico y los daños a la salud por la presencia de niveles elevados de metales en el agua. Pese a que la Dirección de Planta Física (DPF) ha solicitado muestreos rutinarios de estos y otros indicadores de calidad de agua, no se han realizado evaluaciones estadísticas de la

eficiencia de los procesos actuales en la regulación del pH y la reducción de metales con base en estos registros.

La presente investigación pretendió evaluar la eficiencia actual de los procesos de potabilización del agua en Zamorano y proponer nuevas alternativas de tratamiento con el fin de mejorar la calidad del agua en el sistema de distribución y beneficiar a la población zamorana. Los resultados obtenidos en esta investigación pueden servir de guía para determinar las dosis de carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) con las que se deberán calibrar los dosificadores y así contribuir a la normalización del pH y por ende mitigar la corrosividad en el sistema de tuberías.

Los objetivos de este estudio estuvieron enfocados en:

- Evaluar la presencia de los metales en el sistema de agua potable de Zamorano.
- Evaluar la eficiencia del proceso de alcalinización en la regulación del pH del agua del sistema y la remoción de aluminio [Al] y hierro [Fe].
- Comparar los indicadores de calidad de agua en las diferentes fuentes que abastecen el sistema (Benque y Agua Amarilla).
- Determinar las dosis de alcalinizante con base en las características del agua cruda del sistema.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

**Localización del estudio.** El presente estudio se llevó a cabo entre mayo y septiembre del 2012 en la red de captación y distribución del sistema de agua potable de la EAP. La toma de muestras del agua cruda se realizó gracias a la instalación de dos llaves por parte de la DPF, la primera ubicada en las tuberías de entrada al tanque correspondiente al agua proveniente del conjunto de arroyos denominados como fuente El Benque y la segunda perteneciente al tanque de agua de la fuente Agua Amarilla. Los puntos de muestreo del agua tratada se realizaron en dos viviendas del área residencial denominada Campus Alto, en el Laboratorio de Agua del departamento de AD y en las residencias estudiantiles localizadas en el centro del Campus. Los análisis de calidad y los ensayos de dosificación se realizaron en el laboratorio de Calidad de Agua del Departamento de Ambiente y Desarrollo de la Escuela Agrícola Panamericana y en el laboratorio de análisis ambiental del Departamento de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Texas en San Antonio, Estados Unidos.

**Metodología.** El estudio se desarrolló en las siguientes fases simultáneas: i) evaluación de la acidez, la alcalinidad y los elementos metálicos y no metálicos en el agua cruda proveniente de las fuentes que alimentan el sistema, ii) evaluación de la mezcla del agua cruda en un punto en el sistema, ensayos de dosificación de alcalinizante para alcanzar los pH óptimos y pruebas de remoción de [Fe] y [Al] mediante la alcalinización, iii) evaluación de Fe y Al en los puntos de consumo en residencias estudiantiles y iv) comparación de la calidad de las fuentes y evaluación de la eficiencia de los procesos de tratamiento con base en los registros del periodo 2007-2011 de la DPF de Zamorano. A continuación se describen la metodología empleada en cada fase.

**Evaluación del agua cruda.** Se llevó a cabo en 44 muestras recolectadas tres veces por semana (lunes, miércoles y viernes) durante un periodo de tres meses. En estas muestras se realizaron los análisis del pH, la alcalinidad y la acidez y se preservaron las muestras para los análisis de elementos totales y disueltos. Las muestras preservadas se trasladaron a la Universidad de Texas en donde fueron analizadas mediante el método ICP-MS por sus siglas en inglés (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry). En ellas se analizaron los elementos metálicos como el aluminio, el plomo, el cobre, el zinc, y los elementos no metálicos como el calcio, el magnesio, el sodio y el potasio en 30 muestras de las fuentes de El Benque y Agua Amarilla.

Las muestras fueron recolectadas en envases de polietileno de alta densidad, lavados con agua destilada y ácido clorhídrico y enjuagados tres veces con el agua de muestra previa a

su recolección final. Para minimizar el potencial de volatilización o biodegradación de los metales entre el muestreo y el análisis, las muestras fueron preservadas mediante la acidificación con ácido nítrico concentrado ( $\text{HNO}_3$ ) hasta dejarlas en un pH final menor a 2. Los metales disueltos fueron analizados en muestras filtradas en membranas de acetato de celulosa de 0.45 micras de poro y seguidamente acidificadas con  $\text{HNO}_3$ . Después de la acidificación, las muestras se refrigeraron a 4 °C. Bajo estas condiciones, las muestras con concentraciones de metales de varios miligramos por litro son estables hasta 6 meses (APHA 1998).

Las mediciones de pH se realizaron mediante un medidor de campo Oakton ® el cual fue calibrado diariamente. El pH influye en algunos fenómenos que ocurren en el agua, como la corrosión y las incrustaciones en las redes de distribución. Aunque podría decirse que no tiene efectos directos en la salud, sí puede influir en los procesos de tratamiento del agua, como la coagulación y la desinfección. Por lo general, las aguas naturales exhiben un pH en el rango de 5 a 9. En este estudio, la medición del pH fue el punto de partida en la mayor parte de los análisis y posteriormente las pruebas de dosificación.

La alcalinidad se determinó por medio de la titulación con ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ) 0,1 N y se reportó en mg/L de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) gastados. El método utilizado para su análisis fue el 2320A (APHA 1998). La alcalinidad es la medición cuantitativa de los constituyentes alcalinos totales de un agua, tanto en el estado ionizado como en el no ionizado, usualmente se expresa en mg/L de  $\text{CaCO}_3$  equivalente (Hilleboe 2006). La alcalinidad del agua está determinada por la presencia de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos que actúan como reguladores en los cambios del pH y está ligada a los procesos de coagulación química, el ablandamiento, el control de la corrosión y la evaluación de la capacidad amortiguadora del agua.

El análisis de acidez se llevó a cabo por medio de la titulación de las muestras de agua con hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) 0.02 N. Los resultados obtenidos fueron reportados en mg/L de carbonato de calcio. El método utilizado fue el 2310A (APHA 1998). Los análisis de la acidez son importantes especialmente en la parte sanitaria o en los procesos de instalación de los sistemas de agua, debido a las características corrosivas que presentan las aguas ácidas. La acidez del agua se define como su capacidad cuantitativa para reaccionar con una base fuerte a un pH designado o como la medida de las sustancias ácidas que contenga. Los ácidos contribuyen a las tasas de corrosión, determinan un gran número de reacciones químicas, la especiación de elementos y los procesos biológicos (Clesceri *et al.* 1992).

**Ensayos de Dosificación.** Cuarenta muestras de agua no tratada en la red de distribución fueron recolectadas en el Laboratorio de Calidad de Agua del Departamento de AD. Los días previos a la recolección de estas muestras se suspendió el tratamiento en todo el sistema debido a que no existe un punto de mezcla de las aguas crudas previo a su almacenamiento y la distribución. Se realizaron análisis de aluminio, hierro, alcalinidad y acidez en el agua cruda y posteriormente se alcalinizó el agua cruda con carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) para llevarla hasta distintos pH finales. Este procedimiento buscó la determinación de la cantidad de carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) para alcanzar los pH finales

de 6.5, 7, 7.5, 8 y 8.5. Los ensayos se realizaron en alícuotas de 1,800 mL, los cuales fueron dosificados con una solución madre de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  a una concentración de 3,000 mg/L hasta alcanzar los pH deseados. Una vez terminada la dosificación, las muestras se sometían a agitación por aproximadamente una hora y se dejaban reposar durante una noche. Al siguiente día se decantaba el agua superficial de cada muestra para su posterior análisis de aluminio y hierro, ya que se esperaba que los metales hubiesen precipitado por la adición del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y el cambio de pH (Manahan 2007).

Los análisis de Al y Fe se llevaron a cabo mediante los métodos colorimétricos en un colorímetro portátil HACH DR 890®. Los análisis de Al se realizaron según el método Aluminon 8012 del manual HACH® y los análisis de Fe mediante el método FerroVer 8008 de HACH®. Ambos análisis se efectuaron en muestras digestadas para asegurar la disponibilidad de ambos metales en su estado reducido al momento de su lectura. El límite máximo admisible de Al en el agua para consumo es de 0.2 mg/L, según la norma técnica hondureña para la calidad del agua potable (NTCAP). El Al aparenta ser un factor importante en severas enfermedades neurodegenerativas: amiotrofia lateral y demencia de Parkinson (Gray 1996). La Organización Mundial de la Salud (OMS) no clasifica el Al como una sustancia química del agua potable significativa para la salud. Actualmente está clasificado como una sustancia que puede dar origen a quejas por parte de los consumidores y tiene un estándar revisado de 200  $\mu\text{g/l}$  (OMS 2006). La presencia de Fe no implica problemas de toxicidad siempre y cuando sus concentraciones sean las adecuadas, ya que cuando excede los niveles máximos permisibles en el agua, ésta no es deseada para consumo humano, debido a su desagradable sabor (Castillo 2004). El límite máximo admisible de hierro según lo establecido por la NTCAP es de 0.3 mg/L.

**Evaluación de calidad de agua en los puntos finales de consumo.** Se realizó un muestreo único en los oasis en las residencias estudiantiles Barrios, Cabañas, Delgado, Mora y Morazán, por ser las de mayor antigüedad y en las que se esperaba que la acumulación de hierro y aluminio en las tuberías sea más elevada. Estos análisis se llevaron a cabo mediante los métodos antes descritos en el laboratorio de calidad de agua de IAD.

**Evaluación de la eficiencia del tratamiento.** Se tabularon los registros de 141 muestreos mensuales de la calidad de agua de la DPF desde del 2007 al 2011 en las fuentes de agua cruda y en un punto en el sistema de distribución (Planta de Lácteos). Los análisis de los metales de estos registros se llevaron a cabo en el laboratorio UniLab de la Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC) mediante espectrofotometría de absorción atómica. Se evaluaron las diferencias estadísticas entre las fuentes de El Benque y Agua Amarilla y entre la mezcla de ambas fuentes y el agua tratada en Lácteos en relación a las concentraciones de Fe, Mn, Al y pH y se evaluaron diferencias por temporada (seca y lluviosa) en las concentraciones de metales. Se realizó la prueba estadística de normalidad de Shapiro Wilk y según la normalidad de los datos a analizar se utilizaron las pruebas estadísticas t Student, U Mann Whitney y Wilcoxon en los registros recientes de la DPF (2007-2012), para lo cual primero se obtuvo una media pesada de agua cruda con base en

las concentraciones reportadas y el caudal promedio de cada fuente. El análisis se llevó a cabo en el paquete estadístico SPSS ®.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Acidez y Alcalinidad en las fuentes.** Se determinó una relación estrecha entre el pH, la alcalinidad y la acidez de las muestras. La mayor acidez determinada en El Benque fue de 35.5 mg/L a un pH de 4.32 y la menor de 19.7. La alcalinidad de El Benque es en promedio de 16.08 mg/L (Cuadro 1).

Cuadro 1. Alcalinidad y acidez en el agua de la fuente de abastecimiento El Benque de la Reserva Biológica El Uyuca, Honduras. 2012.

Fecha	pH	Alcalinidad (mg/L)	Acidez (mg/L)
11/07/2012	4.08	9.8	19.7
12/07/2012	4.31	19.7	19.7
13/07/2012	4.52	19.7	19.7
14/07/2012	4.33	19.7	17.8
16/07/2012	4.24	9.8	19.7
17/07/2012	4.27	9.8	23.7
18/07/2012	4.30	19.7	21.7
19/07/2012	4.12	9.8	23.7
20/07/2012	4.31	19.7	19.7
08/08/2012	4.53	19.7	29.6
09/08/2012	4.32	19.7	35.5

mg/L: miligramos por litro

En las muestras analizadas de Agua Amarilla se obtuvieron valores de alcalinidad que oscilaron entre 19.7 y 49.1 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  y valores de acidez entre 43.4 y 67.1 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  (Cuadro 2). La media en alcalinidad fue de 32.2 mg/L y de acidez 49.3 mg/L. En esta fuente se presentó el grado de acidez más elevado en comparación con El Benque y Campus Alto y la alcalinidad más baja lo que demuestra una baja capacidad neutralizante del agua de estas fuentes.

Cuadro 2. Alcalinidad y acidez en el agua de la fuente de abastecimiento Agua Amarilla de la Reserva Biológica El Uyuca, Honduras. 2012.

Fecha	pH	Alcalinidad (mg/L)	Acidez (mg/L)
11/07/2012	3.82	29.5	43.4
12/07/2012	3.41	19.7	49.3
13/07/2012	4.00	29.5	47.3
14/07/2012	4.13	39.3	45.4
16/07/2012	3.97	49.1	55.2
17/07/2012	4.02	39.3	59.2
18/07/2012	4.11	19.7	67.1
19/07/2012	3.74	29.5	55.9
20/07/2012	3.88	29.5	43.4
08/08/2012	3.98	19.7	63.1
09/08/2012	3.93	49.1	63.1

mg/L: miligramos por litro

Los valores de alcalinidad y la acidez en la primera casa de Campus Alto estuvieron comprendidos entre 9.8 y 29.5 mg/L de CaCO<sub>3</sub> para alcalinidad y entre 13.8 y 27.6 mg/L CaCO<sub>3</sub> para acidez (Cuadro 3). La media fue de 17.9 mg/L para alcalinidad y de 19.8 mg/L para acidez. A pesar de tratarse de una fuente de agua de consumo final los valores de acidez son muy altos para considerarla apta para consumo.

Cuadro 3. Alcalinidad y acidez en el agua la primera casa en campus alto, EAP, Valle del Yeguaré, Honduras. 2012.

Fecha	pH	Alcalinidad (mg/L)	Acidez (mg/L)
11/07/2012	5.12	29.5	13.8
12/07/2012	5.95	19.7	13.8
13/07/2012	5.08	19.7	19.7
14/07/2012	6.03	19.7	17.8
16/07/2012	4.48	19.7	19.7
17/07/2012	4.54	19.7	19.7
18/07/2012	4.51	14.7	24.7
19/07/2012	4.58	9.8	19.7
20/07/2012	4.63	19.7	15.8
08/08/2012	4.46	9.8	27.6
09/08/2012	5.89	14.7	25.6

mg/L: miligramos por litro

En la última casa de Campus Alto, los valores en cuanto a alcalinidad resultaron similares a los anteriormente mostrados. Por otro lado la acidez del agua fue mayor, ya que el valor máximo alcanzó 29.9 mg/L. La acidez y alcalinidad del agua de este punto de muestreo no es la adecuada para agua de consumo final. Para mejorar sus condiciones de acidez es necesario incrementar la alcalinidad por medio de la adición de álcali efectivo en las dosis

adecuadas. En todas las muestras analizadas la alcalinidad es baja (<100 mg/L de CaCO<sub>3</sub>) (Cuadro 4).

Cuadro 4. Alcalinidad y acidez en el agua de la última casa en campus alto, EAP, Valle del Yeguaré, Honduras. 2012.

Fecha	pH	Alcalinidad (mg/L)	Acidez (mg/L)
11/07/2012	5.34	19.7	14.8
12/07/2012	6.15	39.3	11.8
13/07/2012	5.44	19.7	13.8
14/07/2012	6.10	24.6	19.7
16/07/2012	4.63	19.7	23.7
17/07/2012	4.67	19.7	19.7
18/07/2012	4.71	9.8	15.8
19/07/2012	4.46	19.7	19.7
20/07/2012	4.68	9.8	15.8
08/08/2012	4.6	9.8	29.6
09/08/2012	5.83	9.8	19.7

mg/L: Miligramos por litro

**Metales en las fuentes.** Los resultados obtenidos reflejaron que el [Al] de ambas fuentes excedió el valor máximo admisible en 29 de las 30 muestras analizadas por el método ICP-MS. En una comparación entre las dos fuentes, Agua Amarilla resultó tener los valores más elevados de metales especialmente en el caso de [Al] el cual tuvo un porcentaje de exceso cinco veces mayor que el valor máximo admisible. Por su parte el Benque excedió el máximo admisible en 81% (dos veces más) con respecto a la norma. Los resultados obtenidos de [Al] realizados en el laboratorio de Calidad de Aguas también excedieron los límites máximos permisibles. En cuanto al [Fe], El Benque tuvo un porcentaje de exceso 58 veces mayor que el máximo admisible y Agua Amarilla un porcentaje de exceso 50 veces mayor a la norma.

Adicionalmente se encontraron concentraciones de plomo [Pb] arriba de lo recomendable en seis de las 30 muestras analizadas con el mismo método. El plomo es un metal pesado en esencia tóxico que puede provocar intoxicaciones agudas o crónicas. Es un elemento de gran capacidad de bioacumulación que afecta a todos los órganos, tanto de los seres humanos como de los animales. Los sistemas más sensibles a este metal son el nervioso, el hematopoyético y el cardiovascular (Hilleboe 2006). Las aguas ácidas blandas disuelven el plomo especialmente a altas temperaturas. El porcentaje de exceso de plomo en la fuente del Benque fue de 40 % con relación al valor máximo admisible (0.01 mg/L) y en Agua Amarilla el nivel excedió 20% (Cuadro 5). Sin embargo, el porcentaje de exceso del plomo presente en las muestras analizadas es leve y se debe corroborar con nuevos análisis y mayor número de muestreos.

Cuadro 5. Resultados comparativos del análisis ICP-MS de los elementos totales de las fuentes de abastecimiento de agua El Benque y Agua Amarilla de la Reserva Biológica El Uyuca, Honduras. 2012.

Elementos (mg/L)	Máx. Adm. (mg/L)	Benque				Agua Amarilla			
		Min.	Máx.	Media	D.E.	Min.	Máx.	Media	D.E.
Aluminio	0.2	0.316*	0.424*	0.363*	0.043	1.023*	1.298*	1.088*	0.094
Plomo	0.01	0.004	0.038*	0.015*	0.011	0.002	0.034*	0.012*	0.015
Hierro	0.3	0.726*	53.49*	17.51*	18.52	1.096*	39.53*	14.93*	13.93
Cobre	2.0	0.008	0.036	0.019	0.011	0.012	0.072	0.038	0.020
Zinc	3.0	0.034	0.151	0.098	0.035	0.098	3.004	0.572	1.076
Calcio	-	0.899	1.665	1.463	0.257	0.899	3.106	2.388	1.020
Magnesio	50	0.059	0.463	0.390	0.147	0.058	1.490	1.061	0.684
Sodio	200	0.171	1.743	1.383	0.540	0.164	2.079	1.444	0.877
Potasio	10	0.178	1.237	1.008	0.369	0.176	1.797	1.301	0.769

Min: Mínimo; Máx.: Máximo; D.E.: Desviación estándar; mg/L: miligramos por litro; Máx. Adm.: Máximo admisible; \* Valores que sobrepasan el valor máximo permisible.

Los metales disueltos representan la fracción presente en la solución o en las partículas menores a 0.45  $\mu\text{m}$ . Por su parte los metales totales representan la fracción presente en la solución y en partículas suspendidas (Cuadro 6). Las concentraciones de metales disueltos son menores a las concentraciones de metales totales y el conocer este fraccionamiento de los metales nos ayuda a conocer la especie química dominante de los elementos presentes (Delgadillo *et al.* 2010). Los metales presentes en las fuentes analizadas se encuentran predominantemente disueltos y en sus estados reducidos, lo que indica que su presencia está más asociada a procesos biogeoquímicos del medio que a condiciones hidrológicas que determinan su arrastre a las fuentes por escorrentía superficial.

Cuadro 6. Resultados comparativos del análisis ICP-MS de los elementos disueltos de las fuentes de abastecimiento de agua El Benque y Agua Amarilla de la Reserva Biológica El Uyuca, Honduras. 2012.

Elementos (mg/L)	Máx. Adm. (mg/L)	Benque				Agua Amarilla			
		Min.	Máx.	Media	D.E.	Min.	Máx.	Media	D.E.
Aluminio	0.2	0.262*	0.466*	0.333*	0.058	1.028*	1.190*	1.094*	0.064
Plomo	0.01	0.004	0.030*	0.010	0.009	0.002	0.015*	0.008	0.006
Cobre	2.0	0.007	0.049	0.021	0.015	0.010	0.038	0.026	0.012
Zinc	3.0	0.045	1.010	0.242	0.321	0.094	1.694	0.664	0.742

Min: Mínimo; Máx.: Máximo; D.E.: Desviación estándar; mg/L: miligramos por litro; Máx. Adm.: Máximo admisible; \* Valores que sobrepasan el valor máximo permisible.

El tratamiento del agua cruda con alcalinizante en el sistema de potabilización de la EAP ha mantenido las dosis únicas periódicas y no continuas en las cuales no se considera el

pH inicial del agua cruda. En los ensayos de laboratorio realizados en este estudio, fue notable que aun los cambios menores en el pH inicial influyan drásticamente en las cantidades de carbonato de sodio gastadas para elevarlo y llegar hasta un rango requerido. Para alcanzar un pH final de 6.5 se requirieron dosis que iban desde 23.5 mg/L hasta 46.7 mg/L según el pH inicial del agua. Por lo tanto el pH inicial no se debe desestimar al momento de tratar el agua con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , ya que el agua nunca permanece a un pH constante debido a las condiciones ambientales, geológicas y químicas, que pueden influir en él. En este caso para alcanzar un pH final de 6.5 a un pH inicial de 3.6 y a un caudal de 1,600 m<sup>3</sup>/día se necesitan 165 lb/día y a un pH inicial de 4.9 bajo las mismas condiciones de caudal se necesitan 83 lb/día para elevar el pH a ese mismo valor (Cuadro 7).

Cuadro 7. Dosis de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  recomendada en el tratamiento de agua cruda para alcanzar un pH de 6.5.

pH final 6.5		Caudal m <sup>3</sup> /día										
		1,000	1,100	1,200	1,300	1,400	1,500	1,600	1,700	1,800	1,850	1,900
Dosis mg/L	pH Inc.	Lb/día										
46.75	3.6	103	113	124	134	144	154	165	175	185	191	196
40.83	4.4	90	99	108	117	126	135	144	153	162	166	171
39.17	4.4	86	95	104	112	121	129	138	147	155	160	164
33.17	4.7	73	80	88	95	102	110	117	124	131	135	139
23.50	4.9	52	57	62	67	72	78	83	88	93	96	98
Prom.	4.4	81	89	97	105	113	121	129	137	145	149	154

mg/L: Miligramos por litro; Lb: Libras; Inc.: inicial; Prom.: promedio.

Para alcanzar un pH final de 7.0, 7.5, 8.0 y 8.5 (Cuadros 8, 9, 10 y 11) de igual forma que en el caso anterior, el pH inicial fue el punto de partida para determinar la cantidad de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  requerida. Los pH antes mencionados están dentro los requerimientos de la norma, por lo tanto fue importante determinar las dosis necesarias para llegar a ellos.

Cuadro 8. Dosis de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> recomendada en el tratamiento de agua cruda para alcanzar un pH de 7.0.

pH final 7.0		Caudal m <sup>3</sup> /día										
		1,000	1,100	1,200	1,300	1,400	1,500	1,600	1,700	1,800	1,850	1,900
Dosis mg/L	pH Inc.	Lb/día										
42.50	4.7	94	103	112	122	131	140	150	159	169	173	178
39.75	4.6	88	96	105	114	123	131	140	149	158	162	166
34.50	4.6	76	84	91	99	106	114	122	129	137	141	144
25.50	4.5	56	62	67	73	79	84	90	95	101	104	107
Prom.	4.6	78	86	94	102	110	117	125	133	141	145	149

mg/L: Miligramos por litro; Lb: Libras; Inc.: inicial; Prom.: promedio.

Cuadro 9. Dosis de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> recomendada en el tratamiento de agua cruda para alcanzar un pH de 7.5.

pH final 7.5		Caudal m <sup>3</sup> /día										
		1,000	1,100	1,200	1,300	1,400	1,500	1,600	1,700	1,800	1,850	1,900
Dosis mg/L	pH Inc.	Lb/día										
52.42	3.6	115	127	139	150	162	173	185	196	208	214	219
45.00	4.5	99	109	119	129	139	149	159	169	178	183	188
37.17	4.9	82	90	98	106	115	123	131	139	147	151	156
36.17	5.1	80	88	96	104	112	119	127	135	143	147	151
Prom.	4.5	94	103	113	122	132	141	150	160	169	174	179

mg/L: Miligramos por litro; Lb: Libras; Inc.: inicial; Prom.: promedio.

Cuadro 10. Dosis de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> recomendada en el tratamiento de agua cruda para alcanzar un pH de 8.0.

pH final 8.0		Caudal m <sup>3</sup> /día										
		1,000	1,100	1,200	1,300	1,400	1,500	1,600	1,700	1,800	1,850	1,900
Dosis mg/L	pH Inc.	Lb/día										
58.63	4.9	129	142	155	168	181	194	207	220	232	239	245
51.75	4.6	114	125	137	148	160	171	182	194	205	211	217
51.58	4.4	114	125	136	148	159	170	182	193	205	210	216
47.33	4.0	104	115	125	136	146	156	167	177	188	193	198
Prom.	4.5	115	127	138	150	161	173	184	196	207	213	219

mg/L: Miligramos por litro; Lb: Libras; Inc.: inicial; Prom.: promedio.

Cuadro 11. Dosis de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  recomendada en el tratamiento de agua cruda para alcanzar un pH de 8.5.

pH final 8.5		Caudal $\text{m}^3/\text{día}$										
Dosis $\text{mg/L}$	pH Inc.	1,000	1,100	1,200	1,300	1,400	1,500	1,600	1,700	1,800	1,850	1,900
		Lb/día										
57.75	4.5	127	140	153	165	178	191	204	216	229	235	242
56.33	4.7	124	136	149	161	174	186	199	211	223	230	236
41.67	4.9	92	101	110	119	128	138	147	156	165	170	174
40.33	5.2	89	98	107	115	124	133	142	151	160	164	169
Prom.	4.8	108	119	130	140	151	162	173	184	194	200	205

$\text{mg/L}$ : Miligramos por litro; Lb: Libras; Inc.: inicial; Prom.: promedio.

Para lograr una aplicación de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  efectiva, la DPF debe medir diariamente el pH del agua antes de alcalinizarla y conocer el caudal de las fuentes. El propósito de agregar inhibidores al agua tales como el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  es lograr la formación de una película protectora sobre la superficie de la tubería, que forme una barrera entre ésta y el agua. El éxito de cualquier inhibidor de corrosión depende de la efectividad en la aplicación de las dosis para la formación de la capa protectora inicial, así mismo mantener las dosis continuas y suficientes para prevenir la redisolución de ésta y alcanzar un flujo constante de agua sobre las superficies metálicas del sistema (National Environmental Services Center 1997). El  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  tiene un costo y eficacia aceptable y no causa dureza en el agua tratada (Hilleboe 2006).

Al evaluar los requerimientos de dosificación por las fuentes separadas, la media en la dosificación con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  en El Benque fue de 28.8  $\text{mg/L}$  para llegar a un pH promedio de 6.5, el cual está dentro del rango ideal de agua para consumo humano. En esta fuente el promedio de pH en el agua sin alcalinizante fue de 4.3 y este fue variando según la temporada, ya que en el período seco el pH se mantuvo constante y en el período húmedo el pH se tornó ácido. En Agua Amarilla el pH inicial de cada muestra fue altamente ácido con un promedio de 3.9, por lo que las dosis de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  aplicadas fueron más elevadas que en El Benque. La media en la dosificación con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  en esta fuente fue de 43.9  $\text{mg/L}$  para llegar a un pH de 6.5.

El  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  fue eficiente en elevar el pH en las muestras analizadas, sin embargo fue poco eficiente en la regulación de [Al] y [Fe]. Con pH más alcalinos se esperaría por lo tanto que los metales se encuentren en concentraciones más bajas. En los ensayos de laboratorio realizados se encontró un comportamiento diferente, debido a que únicamente en ocho de 40 muestras dosificadas con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  hubo remoción de [Al] y el porcentaje más alto de remoción fue de únicamente alcanzó un 44 % (Cuadro 12). Por lo tanto el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  no es un tratamiento suficiente en la remoción del [Al] del agua.

Cuadro 12. Porcentaje de remoción del Al a diferentes dosis de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  en las muestras del laboratorio de calidad de agua, Departamento de AD, EAP, Honduras. 2012.

Fecha	pH inc.	[Al] Inic. (mg/L)	Dosis (mg/L)	pH final	[Al] Final. (mg/L)	% Remoción
16/08/2012	4.6	0.776	37.17	7.5	0.438	44
17/08/2012	4.5	0.44	21.33	6.5	0.265	40
21/08/2012	4.7	0.541	20.58	6.5	0.445	18
04/09/2012	4.3	0.492	40.83	6.5	0.425	14
05/09/2012	4.7	0.405	47.83	6.5	0.327	19
06/01/2012	3.6	0.521	46.75	6.5	0.479	8
06/01/2012	3.8	0.521	51.83	7.0	0.472	9
06/01/2012	4.4	0.521	51.58	8.0	0.476	8

Al: Aluminio; mg/L: miligramos por litro.

Únicamente en cinco de 40 muestras dosificadas con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  hubo reducción de [Fe]. Los porcentajes de remoción más altos fueron de 93 y 82 % que corresponden a las dosificaciones más elevadas de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (Cuadro 13).

Cuadro 13. Porcentaje de remoción del hierro a diferentes dosis de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  en las muestras del laboratorio de calidad de agua, DAD, EAP, Honduras. 2012.

Fecha	pH inc.	[Fe] inic. (mg/L)	Dosis (mg/L)	pH final	[Fe] Fin. (mg/L)	% Remoción
16/08/2012	4.8	0.15	23.50	6.5	0.010	93
16/08/2012	4.8	0.15	30.33	7.0	0.070	53
21/08/2012	4.5	0.23	25.50	7.0	0.100	57
04/09/2012	4.4	0.11	51.75	8.2	0.060	45
04/09/2012	4.4	0.11	56.33	8.5	0.020	82

Fe: Hierro; Mg/L: miligramos por litro.

**Evaluación de Fe y Al en puntos de consumo.** En las muestras tomadas de los oasis de las residencias estudiantiles del campus central, el pH se mantuvo por debajo de los valores recomendados para consumo (6.5 a 8.5), debido a que la media de pH fue de 4.7. Así mismo los niveles de aluminio tuvieron una media de 0.54 mg/L, nivel que está tres veces (170%) por encima del valor máximo permisible. En el caso del hierro la media fue de 0.12 mg/L, el cual está dentro de los valores aceptados. La residencia estudiantil Barrios fue la que tuvo los valores más altos de [Al] y [Fe], en el caso del aluminio un exceso de 233% y en cuanto al hierro el nivel es el adecuado, sin embargo, es más alto en comparación a las otras residencias estudiantiles (Figura 1). A pesar de que el agua no tuvo niveles altos en hierro, es necesario revisar los sistemas de filtros y oasis, con el propósito de mejorar las propiedades físicas del agua, en especial el sabor.

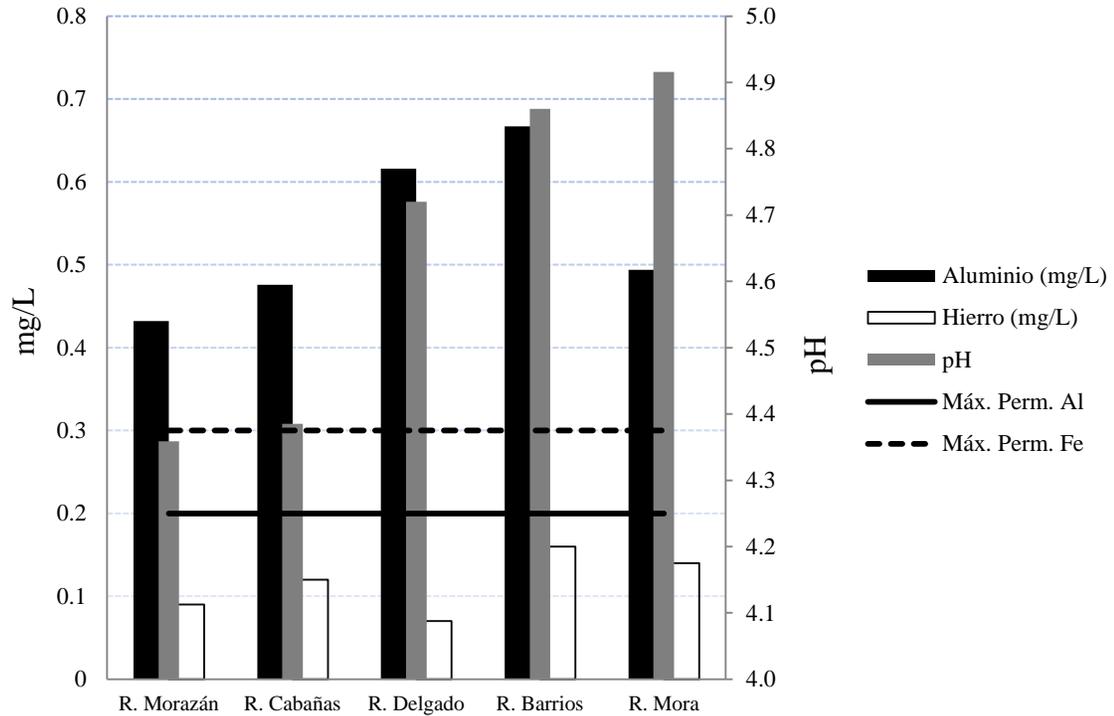


Figura 1. Concentraciones de Al y Fe en oasis de residencias estudiantiles del campus central de la EAP, Honduras. 2012.

**Evaluación de la eficiencia del sistema de tratamiento.** Agua Amarilla constituye el 10% del total del agua que entra al sistema. Se evaluó la eficiencia del tratamiento actual en el incremento de pH, la remoción de [Al], [Fe] y [Mn] en el agua tratada, seleccionando como punto de referencia a la Planta de Lácteos. Pese a que se determinan incrementos de pH y existen reducciones significativas de las concentraciones de [Al] ( $P=0.098$ ) en el agua tratada, aun se sobrepasan los valores máximos permitidos por la legislación vigente. El [Fe] se incrementa en la red de distribución de forma significativa ( $P=0.044$ ) entre la mezcla del agua cruda y el agua tratada y el [Mn] se mantiene constante (Cuadro 14).

Cuadro 14. Efecto del tratamiento de potabilización de agua de la EAP, Honduras. Análisis del 2007-2011.

Parámetro	n	Cruda		Lácteos	
		Mediana	Rango	Mediana	Rango
[Fe] (mg/L)	33	0.13	(0.82) <sup>a*</sup>	0.17	(2.62) <sup>b</sup>
[Mn] (mg/L)	32	0.03	(0.11) <sup>a</sup>	0.03	(0.07) <sup>a</sup>
		Media ± DE		Media ± DE	
[Al] (mg/L)	16	0.39 ± 0.21 <sup>a</sup>		0.31 ± 0.20 <sup>b</sup>	
pH	33	4.33 ± 0.37 <sup>a</sup>		4.54 ± 0.26 <sup>a</sup>	

D.E.: Desviación Estándar.

\*Los datos estadísticos comparados por fila seguidos de la misma letra, no presentan efecto significativo (P>0.05).

\*Los datos estadísticos comparados por fila seguidos de diferente letra, presentan efecto significativo (P<0.05).

Los resultados reflejan que hubo una diferencia significativa en la concentración de los metales y pH de las dos fuentes (Cuadro 15). Agua Amarilla resultó la fuente de pH más ácido y con exceso de metales, especialmente de aluminio (P=0.000033) y hierro (P=0.001).

Cuadro 15. Comparación de medianas y medias de las fuentes de abastecimiento del sistema de potabilización de agua de la EAP, Honduras. Análisis del 2007-2011.

Parámetro	Benque			Agua Amarilla		
	N	Mediana	Rango	n	Mediana	Rango
pH	88	4.25	(2.35) <sup>a*</sup>	49	3.9	(1.18) <sup>b</sup>
[Fe] (mg/L)	72	0.09	(1.09) <sup>a</sup>	36	0.18	(0.89) <sup>b</sup>
[Mn] (mg/L)	69	0.03	(0.22) <sup>a</sup>	34	0.09	(0.39) <sup>b</sup>
		Media ± DE		Media ± DE		
[Al] (mg/L)	38	0.33 ± 0.21 <sup>a</sup>		19	0.99 ± 0.63 <sup>b</sup>	

D.E.: Desviación Estándar.

\*Los datos estadísticos comparados por fila seguidos de la misma letra, no presentan efecto significativo (P>0.05).

\*Los datos estadísticos comparados por fila seguidos de diferente letra, presentan efecto significativo (P<0.05).

Todos los análisis muestran que el pH de Agua Amarilla es consistentemente más bajo que el de El Benque. Por otro lado Lácteos, a pesar de ser una fuente de consumo final con un tratamiento previo de alcalinización, mantiene un pH ácido, lo cual reduce la calidad de agua de esta fuente para consumo humano. En consecuencia, el Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> logra incrementar el pH del agua pero no hasta el rango recomendable y esto puede ser debido a una dosis aplicada insuficiente y poco constante que no va acorde al pH inicial y al caudal del agua de las fuentes (Figura 2).

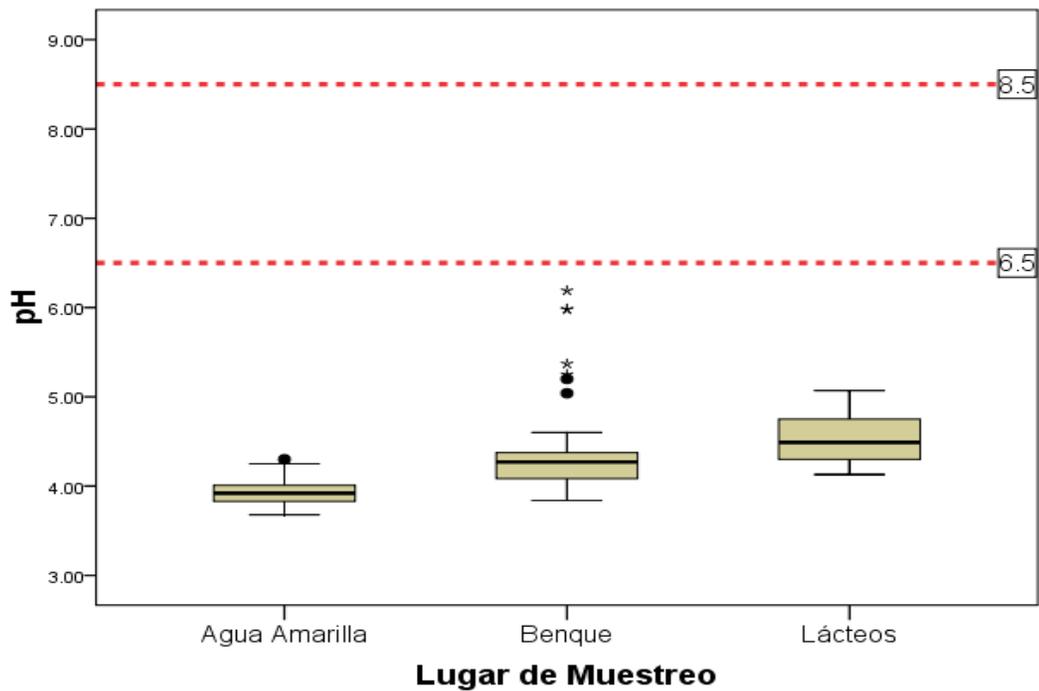


Figura 2. Diagrama de caja de los valores del pH de las fuentes de agua El Benque, Agua Amarilla y Lácteos de la EAP, Honduras. Análisis del 2007-2011.

Ninguna de las fuentes incumple con el valor máximo admisible de [Fe]. Lácteos sobrepasa el límite admisible en algunos muestreos a pesar de que el agua que ahí se consume ha sido alcalinizada y clorada previamente en el sistema de potabilización, lo que indica que el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  no es efectivo en la reducción del [Fe] del agua cruda. El aumento del [Fe] en el agua de consumo final también se debe a la alta corrosividad y antigüedad de las tuberías (Figura 3). La corrosión se caracteriza por la disolución parcial del hierro o de los materiales de los que están hechos los sistemas de tratamiento y abastecimiento del agua (Hilleboe 2006). La corrosión del hierro consiste en el remplazo de sus moléculas por los iones de hidrógeno que contiene el agua, lo cual da paso a la formación de moléculas de hidrógeno y de iones de hierro (ferroso). Es así como los iones ferrosos reaccionan con los iones hidróxido del agua y forman el hidróxido ferroso, el cual es un compuesto insoluble (Gray1996).

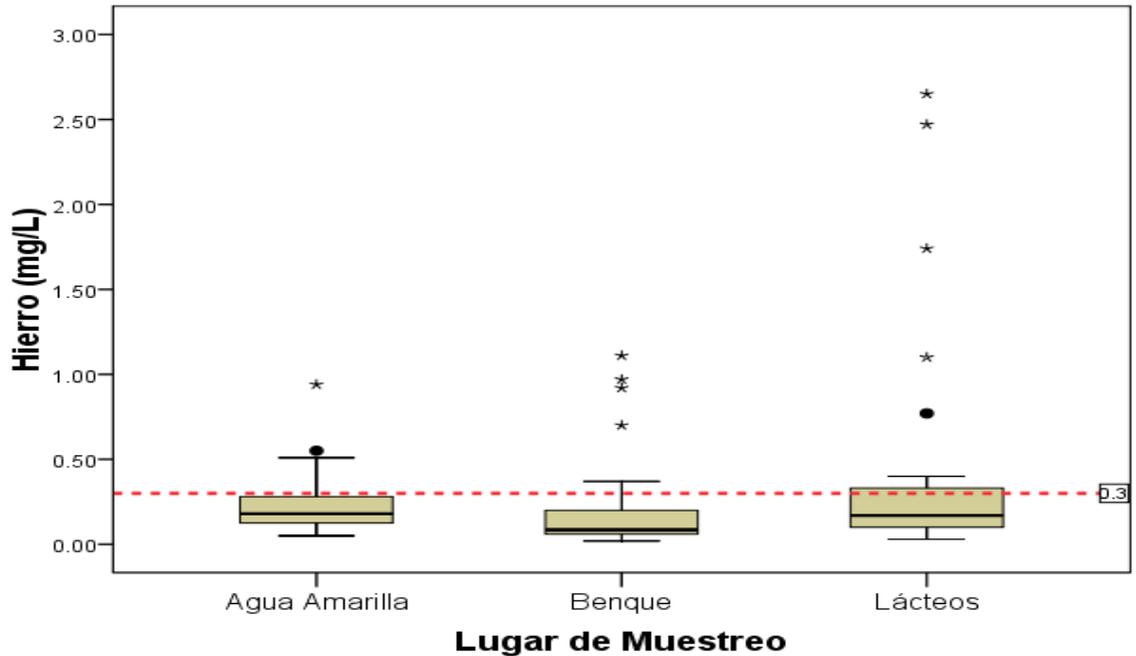


Figura 3. Diagrama de caja de [Fe] en el agua de entrada y salida del sistema de agua potable de la EAP, Honduras. Análisis del 2007-2011.

Las concentraciones elevadas de metales en las fuentes tienen su origen en las características geológicas y edafológicas propias de los sitios de captura del agua tales como los suelos que en el caso de Uyuca (lugar de captación) son predominantemente andosoles (G. Arévalo, com. pers.), suelos de origen volcánico que en su fracción fina tienen aluminio y un medio por ciento de hierro. En suelos con pH ácido de 4.2 a 5.2 el aluminio se encuentra en su estado trivalente y como hidróxido de aluminio (Porta 2005). Los suelos con altos contenidos de hierro y manganeso se caracterizan por su gran capacidad de absorber metales divalentes, como el cobre y el plomo. La adhesión de los metales pesados al suelo está íntimamente relacionada al pH (Nanía, 2003), por lo tanto los excedentes en los niveles de aluminio encontrados en El Benque y Agua Amarilla eran evidentes debido a los rangos ácidos de pH que tuvieron, los cuales oscilaron de 3 a 4.8. La presencia del manganeso denota de las características antes mencionadas del lugar de captación. La concentración de manganeso es la adecuada según la norma en los tres sitios analizados (Figuras 4 y 5).

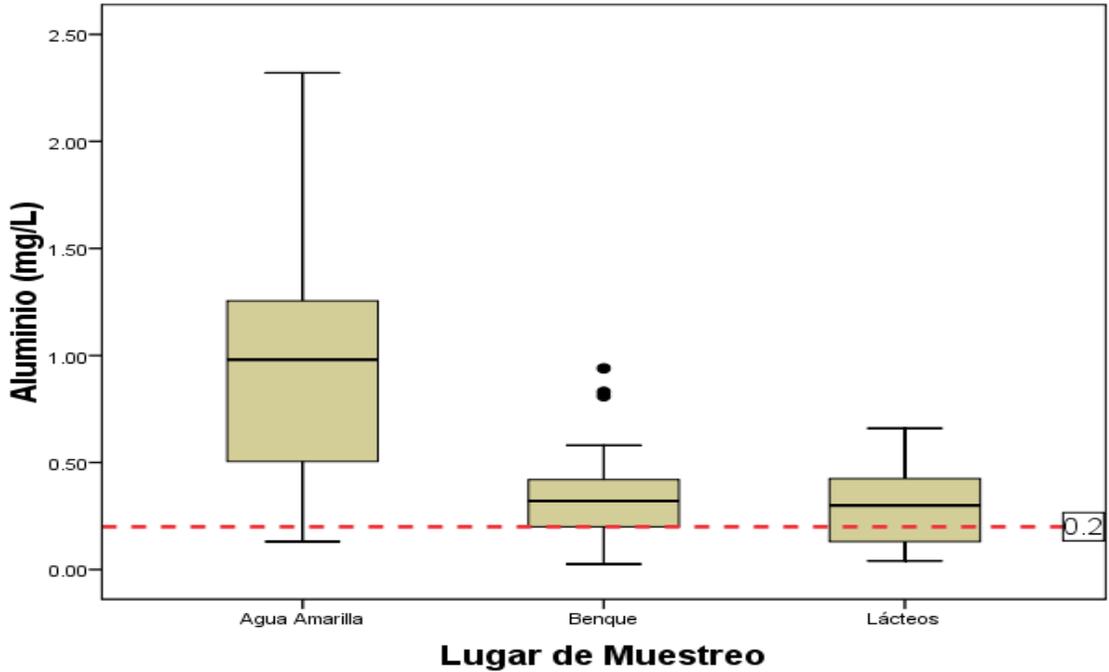


Figura 4. Diagrama de caja de [Al] en el agua de entrada y salida del sistema de agua potable de la EAP, Honduras. Análisis del 2007-2011.

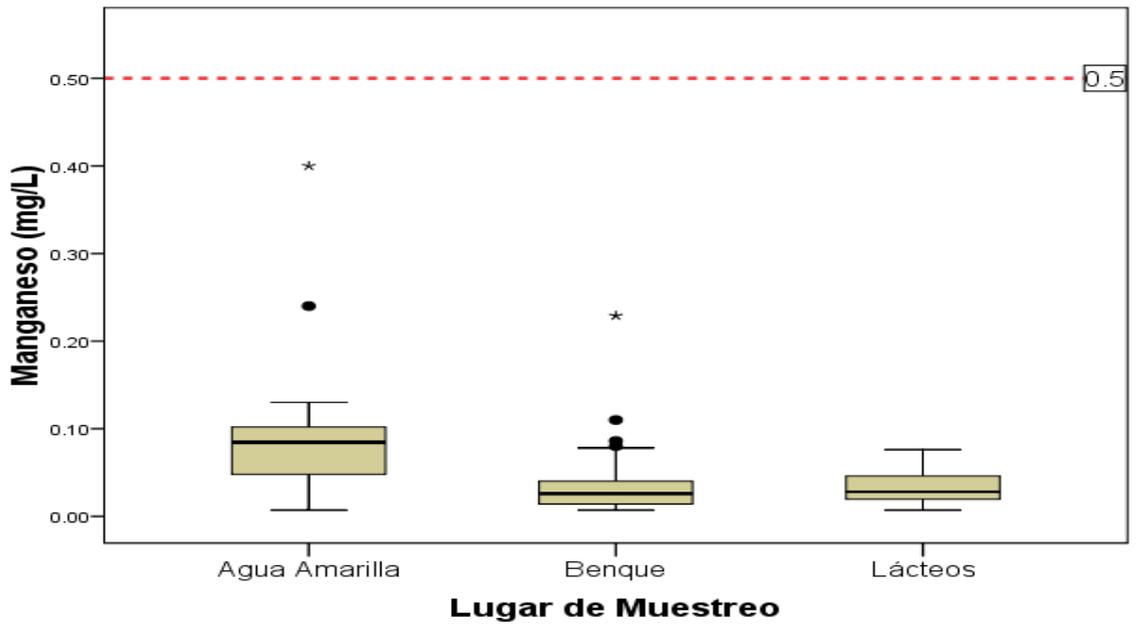


Figura 5. Diagrama de caja de [Mn] en el agua de entrada y salida del sistema de agua potable de la EAP, Honduras. Análisis del 2007-2011.

## 4. CONCLUSIONES

- El presente estudio confirmó la presencia de aluminio, hierro y plomo sobre los límites estipulados en la Norma Técnica para la calidad del Agua Potable (NTCAP) del Ministerio de Salud de Honduras en las fuentes El Benque y Agua Amarilla, que abastecen a Zamorano, lo cual a largo plazo puede representar un riesgo para la salud de los consumidores y representa malestares actuales en la comunidad.
- Al evaluar los registros mensuales de la calidad de agua de Zamorano del periodo 2007-2012 se demuestra que el tratamiento de agua potable utilizado actualmente no ha podido mitigar la acidez del agua de sus fuentes. El pH del agua de salida del sistema, el cual fluctúa de 4.5 a 5, sigue por debajo del valor de pH deseable para el consumo humano de 6.5 a 8.5. El tratamiento actual no ha logrado reducir las concentraciones de Aluminio a valores aceptables por la normativa. Por otro lado los valores aún bajos de pH han resultado en incrementos en las concentraciones de hierro en la red de distribución.
- La calidad del agua de la fuente de Agua Amarilla es inferior a la de El Benque, lo cual se ve reflejado en su elevada acidez y los niveles de aluminio con un valor medio de 1.10 mg/L, que representa 450 % de exceso, es decir seis veces más que el valor máximo admisible por la NTCAP. Con base en el análisis de los registros históricos y a los obtenidos recientemente se puede inferir que la fuente de Agua Amarilla no tiene las características deseables que la hagan propicia para ser utilizada como fuente de abastecimiento permanente para Zamorano.
- La regulación del pH en el sistema de potabilización de agua de Zamorano dependerá de los mecanismos de aplicación de alcalinizante, la cual debe ser continuo y ajustado permanentemente con base en el pH inicial del agua cruda y el caudal de entrada al sistema. Adicionalmente, el presente estudio demuestra que la regulación del pH por sí sola, aunque tendría impactos en reducir corrosividad y alcanzar los valores establecidos por la normativa internacional, no es completamente eficiente en la remoción de los metales indeseables en el sistema.

## 5. RECOMENDACIONES

- Debido a la implementación que se hará de un dosificador mecanizado de alcalinización al sistema de tratamiento de agua potable en la EAP, se propone realizar un nuevo estudio que evalúe la eficiencia del sistema de potabilización una vez integrado el equipo, para así efectuar una comparación de los resultados de esta investigación.
- Se deberán incluir en los monitoreos rutinarios que realiza la Dirección de Planta Física, análisis de plomo en muestras de agua cruda y tratada en el sistema de agua y prescindir de análisis menos relevantes al tipo de fuente tales como nitratos, alcalinidad y dureza que normalmente no han presentado valores fuera de la normativa. Se deberán considerar como sitios de análisis los oasis de las residencias estudiantiles.
- Agua Amarilla se debería utilizar como fuente de emergencia en el sistema de agua potable de la EAP a causa de sus características ácidas y su elevado contenido de metales, ya que de mantenerse la fuente se continuará ocasionado corrosión en el sistema de las tuberías y los equipos.
- Buscar nuevas alternativas de tratamiento para reducir los metales de las fuentes de agua de entrada al Sistema de Potabilización.
- Aumentar la dosis de alcalinizante para mejorar el pH, teniendo muy en cuenta el pH inicial del agua cruda, ya que la dosis a aplicar está íntimamente relacionada con estos valores.

## 6. LITERATURA CITADA

American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20 ed. Washington, DC. 1220 p.

Hilleboe, H. 2006. Manual de tratamiento de aguas. Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York. Edit. Limusa S.A. 208 p.

Castillo, G. 2004. Ensayos Toxicológicos y Métodos de evaluación de calidad de aguas. Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo. Edit. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México D.F. 189 p.

Delgadillo, O., A. Camacho, L. Pérez, M. Andrade. 2010. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua. Universidad Mayor de San Simón. Edit. Centro Andino para la Gestión y el Uso del Agua, Cochabamba, Bolivia. 69 p.

Gray, N. 1996. Drinking Water Quality. Problems and Solutions. Edit. John Wiley & Sons Ltd, Baffins Lane, Chichester, West Sussex PO19 1 UD, Inglaterra. 325 p.

Manahan, S. 2007. Introducción a la química ambiental. Universidad Autónoma de México. Edit. Reverté, México, D.F, México. 709 p.

Ministerio de Salud de la República de Honduras. Norma Técnica para la calidad del Agua Potable (en línea). Acuerdo No. 084 del 31 de julio de 1995. Consultado 31 sept. 2012. Disponible en:  
<http://www.salud.gob.hn/transparencia/archivos/regulacion/leyes/NORMA%20TECNICA%20CALIDAD%20AGUA%20POTABLE%20%20Honduras.pdf>

Nanía, L. 2003. La Cuenca y los Procesos Hidrológicos. Hidrología Superficial y Subterránea. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Granada. Edit. Granada, España. 61 p.

National Environmental Services Center. 1997. Control de la Corrosión (en línea). Tecnología en Breve. Consultado 30 sept. 2012 Disponible en:

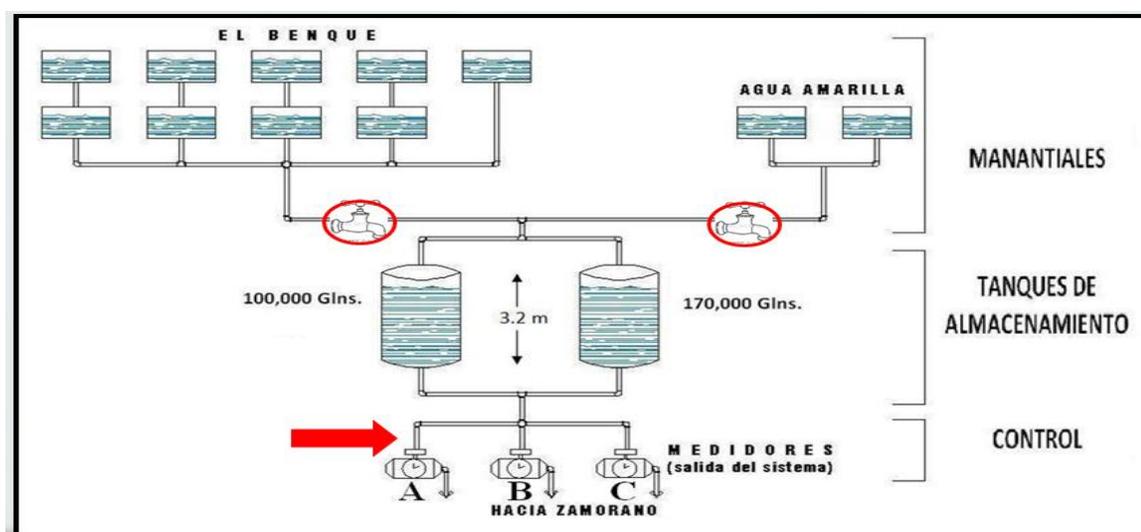
[http://www.nesc.wvu.edu/pdf/dw/publications/ontap/2009\\_tb/spanish/corrosion\\_DWFSO\\_M144.pdf](http://www.nesc.wvu.edu/pdf/dw/publications/ontap/2009_tb/spanish/corrosion_DWFSO_M144.pdf)

Organización Mundial de la Salud. 2006. Guías para la calidad de agua potable (en línea). 3 ed. Consultado 22 agost. 2012 Disponible en: [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/gdwq3\\_es\\_full\\_lowres.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf)

Porta, J. 2005. Agenda de campo de suelos. Información de suelos para la agricultura y el medio ambiente. Ed. Mundi-Prensa, España. 521 p.

Tchobanoglous G., F. Burton y H. Stensel. 2003. Metacalf & Eddy, Inc. Wastewater Engineering. Treatment and Reuse. 4 ed. New York, USA. Edit. Mc Graw-Hill Higher Education. 1771 p.

## 7. ANEXOS



Anexo 1. Sistema de agua potable de la EAP, Honduras. 2012.

Fuente: Guity (2010).

Anexo 2. Parámetros fisicoquímicos del agua potable.

Parámetro	Unidad	Valor Recomendado	Valor Máximo Admisible
Cloro residual	mg/L	0.5 a 1.0	5 mg/L
Cloruros	mg/L	25	250
Conductividad	μS/cm	400	-
Dureza	mg/L CaCO <sub>3</sub>	400	-
Sulfatos	mg/L	25	250
Cobre	mg/L	1.0	2.0
Alumio	mg/L	-	0.2
Zinc	mg/L	-	3.0
Calcio	mg/L CaCO <sub>3</sub>	100	-
Magnesio	mg/L CaCO <sub>3</sub>	30	50
Sodio	mg/L	25	200
Potasio	mg/L	-	10
Sol. Tot. Dis.	mg/L	-	1000

Fuente: Ministerio de Salud de la República de Honduras. Norma Técnica para la calidad del Agua Potable. Acuerdo No. 084 del 31 de julio de 1995. (mg/L): Miligramos por litro. μS/cm: Micro siemens por centímetro. CaCO<sub>3</sub>: Carbonato de calcio.

Anexo 3. Parámetros para sustancias inorgánicas con significado para la salud.

Parámetro	Unidad	Valor Máximo Admisible
Arsénico	mg/L	0.01
Cadmio	mg/L	0.003
Cromo	mg/L	0.05
Níquel	mg/L	0.02
Plomo	mg/L	0.01
Cianuro	mg/L	0.07
Mercurio	mg/L	0.001
Antimonio	mg/L	0.005
Selenio	mg/L	0.01

Fuente: Ministerio de Salud de la República de Honduras. Norma Técnica para la calidad del Agua Potable. Acuerdo No. 084 del 31 de julio de 1995.

mg/L: miligramos por litro.

Anexo 4. Parámetros para sustancias no deseadas en agua potable.

Parámetro	Unidad	Valor Recomendado	Valor Máximo Admisible
Nitratos-NO <sub>3</sub>	mg/L	25	50
Nitratos-NO <sub>2</sub>	mg/L	-	0.1 ó 0.3
Amonio	mg/L	0.05	0.5
Hierro	mg/L	-	0.3
Manganeso	mg/L	0.01	0.5
Fluoruro	mg/L	-	0.7 - 1.5 <sup>2</sup>
Sulfuro de Hidrógeno	mg/L	-	0.05

Fuente: Ministerio de Salud de la República de Honduras. Norma Técnica para la calidad del Agua Potable. Acuerdo No. 084 del 31 de julio de 1995.

mg/L: miligramos por litro.

Anexo 5. Análisis de calidad de agua potable de la EAP del año 2007 al 2011, fuente de abastecimiento El Benque de la Reserva Biológica El Uyuca, Honduras.

Fecha de análisis	p H	Hierro (mg/L)	Aluminio (mg/L)	Manganeso (mg/L)
27/04/2007	4.24	0.07	-	0.035
27/04/2007	4.3	0.02	-	0.007
14/05/2007	4.28	0.14	-	0.078
14/05/2007	4.29	0.06	-	0.032
19/06/2007	5.25	0.11	-	0.007
19/06/2007	4.24	0.06	-	0.007
23/07/2007	4.34	0.05	-	0.007
23/07/2007	4.48	0.05	-	0.007
16/08/2007	4.32	0.13	-	0.03
16/08/2007	5.2	0.09	-	0.019
20/09/2007	4.22	0.1	-	0.08
20/09/2007	4.27	0.1	-	0.073
20/10/2007	4.27	0.06	-	0.007
20/10/2007	4.57	0.35	-	0.01
23/11/2007	4.23	0.23	-	0.031
23/11/2007	4.37	0.37	-	0.018
12/12/2007	3.89	0.21	-	0.035
12/12/2007	4.01	0.27	-	0.022
29/01/2008	4.37	0.21	-	0.06
29/01/2008	3.92	0.14	-	0.11
27/02/2008	4.29	0.05	-	0.007
27/02/2008	4.31	0.11	-	0.007
03/04/2008	4.14	0.05	-	0.018
03/04/2008	4.37	0.22	-	0.027
26/04/2008	4.26	0.03	-	-
26/04/2008	4.26	0.04	-	-
22/05/2008	4.24	0.32	-	0.012
22/05/2008	4.6	0.06	-	0.033
25/06/2008	4.41	0.3	-	0.075
25/06/2008	4.56	0.08	-	0.086
05/08/2008	4.35	0.11	-	0.007
05/08/2008	6.19	0.7	-	0.008
05/09/2008	4.2	1.11	-	0.077
05/09/2008	4.36	0.36	-	0.048
04/11/2008	4.08	0.24	0.026	0.027
04/11/2008	3.95	0.21	0.38	0.035
29/01/2009	3.88	0.27	0.83	0.015
29/01/2009	3.95	0.1	0.11	0.04
15/02/2009	3.88	0.27	0.083	0.015
15/02/2009	3.95	0.1	0.12	0.036
02/03/2009	3.87	0.05	0.04	0.009
02/03/2009	3.98	0.05	0.08	0.023
15/04/2009	3.95	0.05	0.37	0.047

Cont. Anexo 5. Análisis de calidad de agua potable de la EAP del año 2007 al 2011, fuente de abastecimiento El Benque de la Reserva Biológica El Uyuca, Honduras.

Fecha de análisis	p H	Hierro (mg/L)	Aluminio (mg/L)	Manganeso (mg/L)
16/04/2009	4.3	0.06	0.06	0.025
16/04/2009	4.32	0.08	0.07	0.023
22/06/2009	3.95	0.05	0.94	0.229
22/06/2009	4.38	0.07	0.34	0.021
27/07/2009	4.32	0.97	0.2	0.007
27/07/2009	4.25	0.92	0.29	0.007
11/08/2009	4.15	0.071	0.23	0.019
11/08/2009	4.55	0.078	0.33	0.031
26/09/2009	4.20	0.06	0.22	0.02
26/09/2009	4.42	0.05	0.29	0.03
10/11/2009	3.84	0.07	0.39	0.021
10/11/2009	4.47	0.07	0.21	-
20/11/2009	3.84	0.07	0.39	0.021
20/11/2009	4.47	0.07	0.21	0.033
26/11/2009	4.09	0.02	0.33	0.04
26/11/2009	4.11	0.08	0.43	0.05
03/12/2009	4.12	0.02	0.34	0.02
03/12/2009	4.09	0.07	0.42	0.026
30/04/2010	4.01	0.05	0.54	0.046
07/06/2010	3.97	0.06	0.47	0.014
07/06/2010	4.01	0.06	0.58	0.008
08/10/2010	4.21	0.14	0.43	0.028
08/10/2010	4.32	0.17	0.81	0.055
09/11/2010	5.98	0.11	0.18	0.02
09/11/2010	5.04	0.02	0.47	0.03
02/12/2010	4.28	0.1	0.31	0.008
02/12/2010	4.53	0.13	0.27	0.043
20/01/2011	5.98	0.16	0.34	0.05

Anexo 6. Análisis de calidad de agua potable de la EAP del año 2007 al 2011, fuente de abastecimiento A. Amarilla de la Reserva Biológica El Uyuca, Honduras.

Fecha de análisis	p H	Hierro (mg/L)	Aluminio( mg/L)	Manganeso (mg/L)
27/04/2007	3.98	0.12	-	
14/05/2007	4.11	0.32	-	
19/06/2007	4.01	0.34	-	
23/07/2007	4.01	0.06	-	
16/08/2007	3.70	0.33	-	
20/09/2007	3.87	0.24	-	
20/10/2007	4.07	0.17	-	
23/11/2007	3.93	0.94	-	
12/12/2007	3.79	0.06	-	
29/01/2008	3.88	0.44	-	
27/02/2008	3.96	0.18	-	
03/04/2008	4.01	0.22	-	
26/04/2008	4.01	0.05	-	
22/05/2008	3.98	0.51	-	
25/06/2008	3.96	0.12	-	
05/08/2008	3.99	0.22	-	
05/09/2008	3.96	0.17	-	
04/11/2008	3.83	0.34	0.93	
15/02/2009	3.83	0.14	0.17	
15/04/2009	3.77	0.21	0.86	
22/06/2009	4.30	0.05	0.27	
27/07/2009	4.06	0.55	0.44	
11/08/2009	3.90	0.079	0.98	
26/09/2009	3.91	0.14	0.83	
10/11/2009	3.68	0.22	1.15	
29/01/2009	3.83	0.14	0.17	0.09
02/03/2009	3.75	0.13	0.13	0.061
30/03/2009	3.77	0.21	0.86	0.094
20/11/2009	3.68	0.22	1.25	0.102
26/11/2009	3.82	0.15	1.23	0.13
03/12/2009	3.86	0.07	1.26	0.098
30/04/2010	4.06	0.06	0.57	0.047
07/06/2010	3.86	0.18	1.16	0.084
08/10/2010	3.88	0.2	1.41	0.24
09/11/2010	4.25	0.13	2.32	0.13
20/01/2011	4.03	0.33	2.24	0.09

Anexo 7. Análisis de calidad de agua potable de la EAP del año 2007 al 2011, fuente de agua de consumo de la planta de lácteos, EAP, Honduras.

Fecha de análisis	p H	Hierro mg/L	Aluminio mg/L	Manganeso mg/L
27/04/2007	4.39	0.17	-	
14/05/2007	4.79	0.12	-	
19/06/2007	4.42	0.1	-	
23/07/2007	4.44	0.05	-	
16/08/2007	4.3	0.16	-	
20/09/2007	4.65	0.11	-	
20/10/2007	4.89	0.4	-	
23/11/2007	4.54	0.28	-	
12/12/2007	4.26	0.15	-	
29/01/2008	4.30	0.19	-	
27/02/2008	4.63	1.1	-	
03/04/2008	4.78	0.09	-	
26/04/2008	4.33	0.03	-	
22/05/2008	5.07	0.05	-	
25/06/2008	4.80	0.27	-	
05/08/2008	4.75	0.77	-	
05/09/2008	4.47	0.37	-	
04/11/2008	4.13	0.26	0.39	
15/02/2009	4.25	0.05	0.13	
15/04/2009	4.53	0.4	0.34	
22/06/2009	4.73	0.26	0.35	
27/07/2009	4.44	1.74	0.27	
11/08/2009	4.49	0.075	0.33	
29/01/2009	4.25	0.05	0.13	0.02
02/03/2009	4.17	0.08	0.04	0.028
30/03/2009	4.53	0.4	0.34	0.032
16/04/2009	4.42	0.31	0.09	0.032
26/11/2009	4.27	0.1	0.46	0.048
30/04/2010	4.78	0.14	0.17	0.041
07/06/2010	4.22	0.33	0.64	0.019
08/10/2010	4.56	0.23	0.66	0.054
09/11/2010	5.00	2.65	0.22	0.06
02/12/2010	5.00	2.47	0.09	0.06
20/01/2011	4.71	0.15	0.62	0.03

Anexo 8. Elementos totales y disueltos en las fuentes de abastecimiento El Benque y Agua Amarilla de la Reserva Biológica El Uyuca. Análisis ICP-MS. 2012.

Fecha	ID	Lugar	Tipo de muestra	pH	Al (mg/L)	Pb (mg/L)	Cu (mg/L)	Zn (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)
11/07/12	MB-10	Benque	M. totales	4.08	0.4087	0.0179	0.0358	0.1511	0.899	0.059	0.171	0.178
11/07/12	MB-10	Benque	M. disueltos	4.08	0.3125	0.0076	0.0156	0.1041	-	-	-	-
11/07/12	MA-10	A.amarilla	M. totales	3.82	1.0669	0.0343	0.0723	0.3703	3.106	1.465	1.992	1.797
11/07/12	MA-10	A.amarilla	M. disueltos	3.82	1.0981	0.0146	0.0095	1.6941	-	-	-	-
20/07/12	MB-18	Benque	M. totales	4.31	0.3264	0.0042	0.008	0.092	1.503	0.436	1.563	1.105
20/07/12	MB-18	Benque	M. disueltos	4.31	0.3509	0.0043	0.012	0.1151	-	-	-	-
27/06/12	MA-4	A.amarilla	M. totales	3.88	1.0447	0.0055	0.0487	0.1536	0.899	0.058	0.164	0.176
27/06/12	MA-4	A.amarilla	M. disueltos	3.88	1.111	0.0034	0.0384	0.1981	-	-	-	-
18/07/12	MA-16	A.amarilla	M. totales	3.97	1.0598	0.0024	0.0191	0.1214	2.92	1.454	2.079	1.745
18/07/12	MA-16	A.amarilla	M. disueltos	3.97	1.0276	0.002	0.0174	0.0942	-	-	-	-
09/07/12	MB-9	Benque	M. totales	3.97	0.4236	0.0123	0.0108	0.113	1.631	0.462	1.743	1.168
09/07/12	MB-9	Benque	M. disueltos	3.97	0.2626	0.0051	0.0101	0.079	-	-	-	-
19/07/12	MB-17	Benque	M. totales	4.12	0.3282	0.0046	0.011	0.0871	1.508	0.445	1.589	1.145
19/07/12	MB-17	Benque	M. disueltos	4.12	0.3207	0.0064	0.0439	0.0453	-	-	-	-
21/06/12	MA-1	A.amarilla	M. totales	3.12	1.0785	0.0329	0.046	3.0039	0.903	0.061	0.165	0.176
21/06/12	MA-1	A.amarilla	M. disueltos	3.12	1.1899	0.0134	0.033	1.2143	-	-	-	-
13/07/12	MB-12	Benque	M. totales	4.52	0.3477	0.0125	0.0185	0.0995	1.509	0.432	1.543	1.091
13/07/12	MB-12	Benque	M. disueltos	4.52	0.3332	0.0193	0.049	0.1098	-	-	-	-
13/07/12	MA-12	A.amarilla	M. totales	4	1.298	0.0025	0.0341	0.0976	2.899	1.462	1.928	1.753
13/07/12	MA-12	A.amarilla	M. disueltos	4	1.1258	0.0029	0.0239	0.1318	-	-	-	-
16/07/12	MB-14	Benque	M. disueltos	4.24	0.3555	0.0069	0.0075	0.5181	1.539	0.448	1.703	1.13
16/07/12	MB-14	Benque	M. disueltos	4.24	0.4664	0.0105	0.0119	1.0101	-	-	-	-
16/07/12	MA-14	A.amarilla	M. totales	4.13	1.0233	0.0017	0.0122	0.1514	2.888	1.437	1.872	1.72
29/06/12	MA-5	A.amarilla	M. totales	3.78	1.0424	0.0043	0.0331	0.1068	3.104	1.49	1.91	1.742
29/06/12	MA-5	A.amarilla	M. disueltos	3.78	1.0442	0.0044	0.034	0.1192	-	-	-	-
29/06/12	MB-5	Benque	M. totales	4.04	0.3869	0.0383	0.0331	0.0338	1.665	0.463	1.58	1.237
29/06/12	MB-5	Benque	M. disueltos	4.04	0.2795	0.0306	0.0291	0.0904	-	-	-	-
17/07/12	MB-15	Benque	M. totales	4.02	0.3161	0.0143	0.0162	0.1101	1.525	0.435	1.491	1.132
17/07/12	MB-15	Benque	M. disueltos	4.02	0.3181	0.0071	0.0167	0.1113	-	-	-	-

