

Sistema de tratamiento de aguas superficiales para consumo humano en la microcuenca del Río Carrizal, Ecuador

Surface water treatment system for human consumption in the micro-basin of the Carrizal River, Ecuador

Autores: Ángela Lorena Carreño Mendoza¹

Leonel Rolando Lucas Vidal²

Ernesto Antonio Hurtado³

Renny Barrios-Maestre⁴

Ramón Silva-Acuña⁵

Dirección para correspondencia: ernestohurta@gmail.com

Recibido: 2019-03-07

Aceptado: 2019-05-24

Resumen

Con el objetivo de implementar un sistema de tratamiento del agua del tipo filtración de múltiples etapas para el consumo humano en las comunidades Balsa en Medio, Julián y Severino, Ecuador, a nivel de laboratorio se desarrolló un sistema a escala, estructurado por filtrado en arenas+gravas, seguido de filtración con las zeolitas clinoptilolita y mordenita y finalmente se realizó el proceso de cloración. Se empleó el diseño experimental completamente aleatorizado con cuatro repeticiones para los tratamientos. Los resultados indican que en la etapa de filtración en arenas+gravas las variables DBO₅; sólidos totales; coliformes fecales y turbiedad, alcanzaron niveles permitidos de acuerdo a las normas establecidas para el agua de consumo humano. El uso de zeolitas del tipo clinoptilolita y/o mordenita como procedimiento para complementar el proceso de filtración, redujo significativamente los tenores de

¹ Carrera de Ingeniería Ambiental, Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí, Calceta, Manabí, Ecuador.

² Carrera de Ingeniería Ambiental, Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí, Calceta, Manabí, Ecuador.

³ Carrera de Medicina Veterinaria, Campus Politécnico El Limón, km 2,7 Vía Calceta-El Limón, sector El Gramal, Ecuador.

⁴ Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, San Agustín de la Pica, Vía Laguna Grande, Maturín, Venezuela.

⁵ Profesor del Postgrado de Agricultura Tropical, Universidad de Oriente Campus Juanico, Maturín, Monagas, Venezuela.

cobre, plomo, hierro, aluminio, cobalto y cromo. El uso del tratamiento con cloro después del filtrado redujo en 87% la presencia de coliformes fecales reduciendo los valores dentro de los rangos permitidos. El sistema de tratamiento de aguas propuesto para las comunidades estudiadas es de fácil operación y mantenimiento, sus costos son aceptables y los insumos requeridos para su implantación están disponibles en el Ecuador.

Palabras clave: calidad de agua; filtros de arenas y gravas; zeolita, cloración.

Abstract

With the objective of implementing a multi-stage filtration system for water treatment to human consumption in the communities of Balsa en Medio, Julián and Severino, Ecuador, at the laboratory level a scale system was developed, initially structured by filtering in sands + gravels, followed by filtration with clinoptilolite and mordenite zeolites. Finally the water chlorination process was carried out. The essay was developed with a completely randomized experimental design with four repetitions. According to the results, it was evidenced that in the filtration stage in sands + gravels the variables: BOD₅; total solids; fecal coliforms and turbidity, reached permitted levels according to the norms established for water for human consumption. The use of clinoptilolite and/or mordenite zeolites as a method to complement the filtration process significantly reduced the copper, lead, iron, aluminum, cobalt and chromium levels. The use of the chlorine treatment after filtering reduced the presence of fecal coliforms in water in 87% leading the values within the permitted ranges. The proposed system for the treatment of the dammed water in the studied communities is easy to operate and maintain, its costs are acceptable and the inputs required for its implementation are available in Ecuador.

Keywords: water quality; sand and gravel filters; zeolite; chlorination.

Introducción

Las fuentes de abasto de agua para el consumo humano pueden ser superficiales (ríos, arroyos, lagos, humedales, estuarios, etc.); pluviales (aguas de lluvia) y; subterráneas (manantiales, pozos, nacientes). Para elegir alguna de ellas, existen restricciones relacionadas con la calidad del líquido, normas en las diferentes localidades, disponibilidad de la misma y necesidades de la población a abastecer (Barrios *et al.*, 2009).

Los consumidores evalúan la calidad del agua de consumo basándose principalmente en sus sentidos. Los componentes microbianos, químicos y físicos del agua pueden afectar a su aspecto, olor o sabor y el consumidor evaluará su calidad y aceptabilidad basándose en estos criterios; aunque, es posible que estas sustancias no produzcan ningún efecto directo sobre la salud, los consumidores pueden considerar que el agua muy turbia, con mucho color,

o que tiene un sabor u olor desagradable es insalubre y pueden rechazarla (OMS, 2006).

La ONU (2014) señala que la décima parte de enfermedades bacterianas y virales ocasionadas por agentes infecciosos transportados al ser humano provienen del consumo de agua no apta y que podrían prevenirse al realizar procesos adecuados de tratamiento, abastecimiento, saneamiento, higiene y gestión de los recursos hídricos.

Las enfermedades relacionadas con la contaminación del agua de consumo tienen gran repercusión en la salud de las personas. Las medidas destinadas a mejorar la calidad del agua de consumo proporcionan beneficios significativos para la salud. La garantía de la inocuidad microbiana del abastecimiento de agua de consumo se basa en la aplicación, desde la cuenca de captación al consumidor, de barreras múltiples para evitar la contaminación del agua de consumo o reducirla a niveles inocuos para la salud (OMS, 2006).

La OMS (2006) señala que los riesgos asociados a los componentes químicos del agua se deben a la capacidad de producir efectos adversos sobre la salud tras periodos de exposición prolongados. En tanto que, la presencia de metales pesados causa una variedad de impactos ambientales y de salud debido a la estabilidad, alta solubilidad y actividad de migración en medios acuosos, potenciado por la bioacumulación en las cadenas tróficas (Akpór *et al.*, 2014).

Estudios de Lucas *et al.*, (2018) en la microcuenca del Río Carrizal, cantón Bolívar de la provincia de Manabí en Ecuador arrojó índices de calidad de agua que clasifican las aguas de Balsa en Medio y Julián como “aguas poco contaminadas”, y a las aguas de la comunidad de Severino se clasifican como “aguas contaminadas”, con tendencias a presentar mayores riesgos sanitarios en la localidad de Balsa en Medio, seguido por la localidad de Severino; mientras que el menor riesgo correspondió a la localidad de Julián.

La tecnología FIME (Filtración en Múltiples Etapas) ofrece una opción para casos donde los usuarios no pueden conectarse a una planta de tratamiento, siendo de funcionamiento simple, mantenimiento sencillo, costos de operación y mantenimiento relativamente y con resultados de calidad de agua relativamente altos (Prada *et al.*, 2009) las mismas pueden estar conformadas por dos o tres procesos de filtración, dependiendo del grado de contaminación de las fuentes de agua (OPS, 2005). Sánchez *et al.*, (2009) evaluaron un proceso de filtración en múltiples etapas, emplearon un filtro lento de arena y filtros de anillos, siendo la arena la más eficiente; además, presentó mayor estabilidad y mejor desempeño.

De manera similar, Pereira *et al.*, (2013) indicaron que la filtración de múltiples etapas (FIME) es una alternativa que permite expandir el espectro de aplicación de la filtración lenta en relación con la calidad y la duración del efluente y agregan que el uso de la manta y el carbón activado granular (CAG) propiciaron mayor remoción de la turbiedad y contribuyeron a la reducción eficiente del color aparente y verdadero.

Las zeolitas también han sido utilizadas como material filtrante, ya que son minerales con características porosas (Morag, 2002) que poseen alta capacidad de intercambio catiónico así como propiedades de tamiz molecular (Wang y Peng 2010), tienen diversas aplicaciones y han sido reportadas para remoción de metales pesados (Morag, 2002; Mishue *et al.*, 2012; Francisca y Carro, 2014; Cuchimaque *et al.*, 2013); salinidad (Vera *et al.*, 2015), y dureza (Gutiérrez *et al.*, 2006) cuando utilizada regularmente como material filtrante.

Por otro lado, Olivas *et al.*, (2013) la cloración del agua no elimina parásitos y para su aplicación se deben realizar estudio sobre su viabilidad y efectividad como causantes de enfermedades gastrointestinales, cumpliendo los límites permisibles vigentes (Acuerdo Ministerial N° 061. 2015; Acuerdo Ministerial Edición Especial N° 316., 2015; OMS, 2008; NTE INEN 1108, 2014), se debe conocer la cantidad cloro necesaria para desinfectar el agua, a la vez que garantice un residual libre disponible para evitar posible contaminación en las redes de distribución, sin exceder los límites permitidos por la ley (Mayorga y Mayorga, 2016). Asimismo, la cloración es el método más utilizado, es de fácil aplicación, manejo sencillo y bajo costo, con dosis correctas no produce riesgos para el hombre y su efecto residual protege al agua en las redes de distribución (Chulluncuy, 2011) y debe ser empleado, después de la filtración para eliminar cualquier patógeno que pueda poner en peligro la salud de los consumidores (Mayorga y Mayorga, 2016).

En razón de lo antes señalado la presente investigación tiene por objetivo proponer un proceso de filtración del agua para consumo humano en múltiples etapas (FIME) con el empleo de arenas, gravas y zeolitas del tipo clinoptilolita y mordenita como material filtrante y la cloración como método de desinfección; así como también, ponderar sobre la factibilidad económica de adopción en las comunidades Balsa en Medio, Julián y Severino de la microcuenca del río Carrizal en el Ecuador.

Metodología

Ubicación del estudio

El estudio se desarrolló en las comunidades Balsa en Medio, Julián y Severino, ubicadas en la parroquia Quiroga; cantón Bolívar, provincia de Manabí, Ecuador. Estas localidades se encuentran en la microcuenca alta del río Carrizal, comprendida entre las coordenadas 1°4'15.04"S, 79°52'11.79"W, la cual cubre un área de aproximadamente 1390 Km². Se encuentra asentada en la provincia de Manabí y limita al norte con las cuencas del Río Briceño y Río Jama al sur con las cuencas del Río Portoviejo y Río Guayas, al este con el Océano Pacífico, la cuenca del Estero Pajonal y al oeste con la cuenca del Río Guayas (Muñoz *et al.*, 2009).

Diagnóstico de calidad de agua

Se tomaron cuatro muestras de 10 dm³ del agua almacenada en cada una de las comunidades de Balsa en Medio, Julián y Severino siguiendo las

indicaciones descritas en la metodología APHA, AWWA, WPCF (2012). Para conocer la condición inicial del agua de cada una de las comunidades se determinaron las variables DBO₅, sólidos totales, coliformes fecales y turbiedad. Similarmente, se determinaron los tenores de los metales cobre, plomo, hierro, aluminio, hierro y cobalto. Todas las evaluaciones fueron realizadas en el Laboratorio de Evaluaciones Ambientales de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí, ubicada en Manabí, Bolívar, Calceta, Provincia de Manabí, República del Ecuador.

Proceso de filtración en múltiples etapas

A nivel de laboratorio, se construyó un filtro conformado por la siguiente secuencia desde el nivel superior al inferior: grava gruesa, grava fina, arena gruesa, arena fina, arena gruesa y arena fina en la proporción 8,5: 2,6: 1: 25: 1: 3, respectivamente. A través de este se filtraron 10 dm³ del agua almacenada proveniente de las comunidades de Balsa en Medio, Julián y Severino. A continuación se tomó una muestra para determinar las variables DBO₅, sólidos totales, coliformes fecales y turbiedad.

Por otro lado, se elaboraron columnas intercambiadoras de cationes para complementar el tratamiento del filtrado del agua. La empaquetadura utilizada fue de dos tipos de zeolitas, una con clinoptilolita y la otra con mordenita, que funcionaron como últimas capas a continuación de la filtración tradicional con arena+grava. Cabe destacar que la mordenita es un tipo de zeolita diferente de la clinoptilolita (más usada); son minerales de la clase de los tectosilicatos, aluminosilicatos hidratados de sodio, calcio, magnesio, potasio y otros alcalinos y alcalinos térreos que se encuentran en forma natural en la tierra; sus estructuras cristalinas, eléctricamente cargadas pueden ser utilizadas para retener cationes o aniones en el tratamiento de agua. Para este caso, la muestra de 10 dm³ objeto del análisis, fue constituida de forma compuesta para las tres comunidades en estudio y fue sometida inicialmente al proceso de filtración en arenas+gravas y luego pasadas por los filtros de zeolitas, de manera independiente. El agua producto de los dos procesos de filtrado fue analizada para determinación de los tenores de cobre, plomo, hierro, aluminio, cromo y cobalto (APHA, AWWA, WPCF 2012).

Considerando que los tratamientos anteriores tendrían poco efecto sobre la presencia de contaminantes microbiológicos, al agua previamente filtrada se le realizó el tratamiento con cloro, de acuerdo a la metodología indicada por Metcalf y Eddy (1996) que indican el uso de 5 mg de cloro activo por dm³ de agua, para la destrucción de microorganismos en un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 30 minutos.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos, se procedió a realizar una propuesta de un sistema de filtración para satisfacer los requerimientos de agua de cada una de las comunidades con condiciones sanitarias adecuadas a las normas de calidad vigente en Ecuador.

Diseño estadístico

Se utilizó el diseño experimental completamente aleatorizado, con cuatro repeticiones. Previo al análisis de varianza (ANAVA), los valores de las características determinadas en las muestras de agua fueron examinados por las pruebas de normalidad de Wilk-Shapiro y la de homogeneidad de varianza de Bartlett por el ASSISTAT (Silva y Azevedo, 2016), y los análisis de varianza se realizaron con el software InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2016). Las comparaciones de promedios se realizaron a través de la prueba de Tukey al 5% de probabilidad.

Resultados y Discusión

Filtración en arena + grava

En la Tabla 1, están descritos los resultados de la cuantificación de las variables DBO₅, sólidos totales (S. totales), coliformes fecales (C. fecales) y turbiedad en la muestra de agua de cada una de las tres comunidades objeto de la investigación. Por la prueba de Tukey a 5% de probabilidad se detectó diferencias significativas entre las aguas provenientes del afluente y el efluente, o en otras palabras, entre el agua almacenada del río que entra al sistema de filtrado en arenas + gravas y las que salen. Tal hallazgo demuestra la particular bondad del sistema de filtrado en disminuir significativamente las concentraciones de las variables estudiadas. Ese resultado está consolidado para todas las variables analizadas en las tres comunidades donde la repuesta es ratificada entre la calidad del agua que entra al sistema y la que sale después del filtrado.

Tabla 1. Eficiencia de remoción por filtración de las variables indicadoras de la contaminación del agua almacenada en Balsa en Medio, Julián y Severino en el Ecuador.

Comunidad	Tipo de muestra	Variables cuantificadas			
		DBO ₅ (mg/dm ³)	Sólidos totales (mg/dm ³)	Coliformes fecales (NMP/100 cm ³)	Turbiedad (NTU)
Balsa en Medio	Afluente	3,67 b	184,67 b	75,00 b	8,33 b
	Efluente	0,55 a	7,23 a	6,58 a	0,96 a
	GR (%)	85,01	96,08	91,23	88,48
Julián	Afluente	2,67 b	190,67 b	78,33 b	8,0 b
	Efluente	0,4 a	5,48 a	7,05 a	0,8 a
	GR (%)	85,02	97,13	91,00	90,00
Severino	Afluente	3,00 b	195,67 b	79,67 b	7,33 b
	Efluente	0,52 a	4,78 a	6,59 a	1,06 a
	GR (%)	82,67	97,56	91,73	85,54
Promedio de remoción (%)		84,23	96,92	91,32	88,00

GR: Grado de remoción. Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados obtenidos para el análisis del agua en el afluente (Tabla 1) se puede ratificar lo señalado por Lucas y Carreño (2018) en relación a

la mala calidad del agua para consumo humano en las comunidades de Balsa en Medio, Julián y Severino en la cuenca del Río Carrizal; sin embargo, al ser sometidas al proceso filtración en arenas+gravas las variables indicadoras DBO₅, sólidos totales, coliformes fecales y turbiedad presentan un cambio notorio, de acuerdo a los valores observados para el efluente-salida del sistema de filtrado. Este resultado consolida la operacionalidad del sistema de filtración, al permitir mejoras significativas de calidad para las variables cuantificadas en las muestras de agua.

Cuando se observa el grado de remoción (GR%) expresado en porcentaje (Tabla 1) se puede constatar que en relación a la DBO₅ los niveles de reducción promedio alcanzaron 84,23%; de manera similar para las variables sólidos totales, coliformes fecales y turbiedad las disminuciones fueron del orden de 96,92; 91,32 y 88 %, respectivamente. Estos valores porcentuales de eficiencia propiciaron al agua de las tres localidades niveles por debajo de los establecidos para agua potable, según la normativa correspondiente (INEN, 2014). Los hallazgos obtenidos ratifican la potencialidad de la técnica de filtrado en arenas+gravas al mejorar las características físicas y químicas del agua almacenada en las comunidades de Balsa en Medio, Julián y Severino del Ecuador.

Filtración en zeolitas

Tanto para la zeolita del tipo clinoptilolita como la mordenita en relación a la presencia de metales pesados (Tabla 2) se constató reducción significativa de los tenores de Cu²⁺, Cr⁶⁺, Al³⁺, Fe³⁺ y Pb²⁺, los cuales no habían sido removidos por la filtración en las capas de arenas y gravas anteriores a la adsorción con las zeolitas, particularmente con la mordenita, que es poco usada en procesos de filtración múltiple. De manera general, se constató la efectividad de la filtración del agua con la zeolita del tipo mordenita, la cual supera en eficiencia a los logrados con la clinoptilolita, procedentes del filtrado en arenas+gravas. La excepción la constituyó los tenores de plomo, los cuales superan a los límites permitidos en el índice TULSMA (2015)

El análisis de varianza de los tenores de cobre, plomo, hierro, aluminio, cobalto y cromo y la comparación de los valores promedios por la prueba de Tukey a 5% (Tabla 2) mostró que para el cobre los menores tenores están asociados al agua que fue filtrada a través de la mordenita difieren estadísticamente de los tenores en el agua filtrada en clinoptilolita y de manera similar a los obtenidos para el agua procedente del filtrado en arenas+gravas, similar comportamiento estadístico presentaron los tenores de cromo. Para el caso del plomo, los tenores de este elemento presentaron similitud estadística entre las muestras de agua procedente del filtrado con clinoptilolita y mordenita y ambos promedios difieren de los tenores de plomo presentes en las muestras obtenidas del proceso de filtración en arenas+gravas. Es pertinente señalar que este fue el único elemento, dentro de los estudiados, que estuvo por encima de los niveles permitidos por el índice TULSMA (2015).

Para los tenores de hierro y aluminio se constató similitud en su comportamiento estadístico; se observó, que las muestras de agua procedentes del filtrado con la zeolita del tipo mordenita presentaron los menores tenores de ambos metales y sus valores difieren de los obtenidos para las muestras de agua procedentes del filtrado con clinoptilolita y la obtenida del proceso de filtración en arenas+gravas, que son similares entre sí. Para el caso específico del cobalto no se detectaron diferencias estadísticas entre las tres muestras evaluadas, aunque los tenores del elemento procedentes de las muestras obtenidas del filtrado en los dos tipos de zeolitas de manera independiente están por debajo de los permitidos por el índice TULMA (2015) y las variaciones en los tenores de eficiencia de remoción del elemento con ambas zeolitas es del orden de 9,52 % (Tabla 2).

Tabla 2. Concentraciones de los principales metales pesados en muestras conjuntas del agua almacenada procedente de las localidades de Severino, Julián y Balsa en Medio en el Ecuador.

Tratamiento	Tenores de metales pesados(mg/dm ³)					
	Cobre	Plomo	Hierro	Aluminio	Cobalto	Cromo
Filtración grava y arena	1,80 c	1,07 b	0,37 b	0,14 b	0,21 a	0,38 c
Filtración con Clinoptilolita	1,20 b	0,07 a	0,34 b	0,13 b	0,19 a	0,09 b
Filtración con Mordenita	0,80 a	0,07 a	0,27 a	0,09 a	0,19 a	0,03 a
Límites permisibles TULSMA	1,00	0,05	0,30	0,10	0,20	0,05
% Eficiencia Clinoptilolita	33,33	93,46	8,11	7,14	9,52	76,32
% Eficiencia Mordenita	55,56	93,46	27,03	35,71	9,52	92,11

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ecuador (TULSMA, 2015) o limite TULSMA establecido para los metales pesados en las muestras de agua destinadas a consumo humano, se constató para el caso del agua almacenada (efluente) de la muestra compuesta obtenida de las comunidades de Balsa en Medio, Julián y Severino, que el Cu^{+2} sobrepasó el límite permisible en 80% y la adsorción por la clinoptilolita fue de 33%, mientras que la mordenita redujo el 56%. En el caso del Pb^{+2} , el límite permisible fue excedido en más de 2000%, la remoción fue similar en ambas zeolitas y fue del orden del 93%. Para Fe^{+3} sobrepasó el límite en 19%, siendo que, de acuerdo a proceso de filtrado en las zeolitas la adsorción por la clinoptilolita mostró eficiencia de remoción de 8%; mientras que con la mordenita fue de 27%; de manera similar, para el Al^{+3} que sobrepasó el límite en 29%, la adsorción con clinoptilolita fue de 7%, mientras que, con la mordenita fue de 36%. Para el caso del Co^{+3} que sobrepasó el límite en 5%, la eficiencia de adsorción fue similar para ambas zeolitas con 9,5%. En el caso del Cr^{+6} que sobrepasó el límite TULSMA (2015) en 87% se constató eficiencia de adsorción de la clinoptilolita de 76% en relación a la mordenita que fue del 92%.

De acuerdo a los hallazgos obtenidos en este trabajo en relación a la eficiencia de remoción de metales pesados por la mordenita, se ratifican los resultados

obtenidos por Autie-Pérez *et al.*, (2011); además de ello, agrega que hubo mayor eficiencia de remoción de los metales pesados por esta zeolita radican en su mecanismo de intercambio iónico el cual se ajusta más a la teoría del llenado volumétrico de microporos de Dubinin, relacionado con el criterio de la superficie específica, que presentan otras zeolitas diferentes de la clinoptilolita.

Otros resultados de investigación donde se empleó la técnica del filtrado FIME como los de Prada *et al.*, (2009); Sánchez *et al* (2009); Valencia *et al* (2009); Pereira *et al.*, (2013); Veliz *et al.*, (2016); así como también donde se emplearon zeolitas como medio filtrante para remoción de metales pesados (Morag, 2002; Mishue *et al.*, 2012; Francisca y Carro, 2014; Cuchimaque *et al*, 2013) se ratifican en esta investigación donde los medios filtrantes a base de clinoptilolita y mordenita, esta última en particular, ofrece importantes disminuciones en los tenores de metales pesados en las aguas de consumo humano por las comunidades de Balsa en Medio, Julián y Severino, en la cuenca del río Carrizal en El Ecuador.

Por otro lado, Córdova *et al.*, (2014) señalaron que aunque para la clinoptilolita se disponga de mayor información sobre intercambio catiónico y que sea más abundante en la naturaleza; sugieren que en los sistemas de filtración se emplee la mordenita, la cual podría favorecer el proceso de filtrado del agua por poseer espectro bidimensional de canales, en los cuales se retienen las moléculas grandes; con los resultados de esta investigación donde se constató la eficiencia de la mordenita en la remoción de tenores de Fe^{+3} Al^{+3} Co^{+3} y Cr^{+4} se consolida el supuesto de Córdova *et al.*, (2014) con resultados tangibles.

Proceso de cloración

El tratamiento de cloración se realizó por triplicado, una prueba de cloración conjunta con las aguas filtradas e intercambiadas iónicamente de las tres comunidades (Tabla 3) demuestran que la eficiencia de remoción fue en promedio de 87%.

El análisis de varianza de los datos de cloración y la comparación de los valores promedios por la prueba de Tukey a 5% de probabilidad, permiten señalar similitud estadística de los valores de coliformes fecales en la muestra compuesta de las tres localidades en el afluente o agua de entrada al sistema de cloración y de manera similar se detecta similitud estadística en los valores de coliformes en el efluente (Tabla 3). Tal comportamiento explica la consistencia de los resultados para las muestras tanto en su punto de origen como posterior al proceso de cloración. El porcentaje de eficiencia en remoción de los coliformes fecales es del orden de 87%; además, las concentraciones promedio de 0,90 NMP/100 cm³ para las tres muestras, con cuatro repeticiones permiten inferir que los valores de las concentraciones están dentro de los rangos de aceptabilidad para el agua de consumo humano (Acuerdo Ministerial N° 061. 2015; Acuerdo Ministerial Edición Especial N° 316., 2015; OMS, 2008; NTE INEN 1108, 2014).

Tabla 3. Pruebas de cloración realizadas en muestras de agua conjuntas de las comunidades de Balsa en Medio, Julián y Severino filtradas de acuerdo al modelo propuesto.

Pruebas de cloración	Unidades	Concentraciones de coliformes fecales		Eficiencia remoción (%)
		Afluente	Efluente	
1	NMP/100 cm ³	6,58 b	0,83 a	87
2		7,05 b	0,95 a	87
3		6,59 b	0,93 a	86
Media		6,74	0,90	87

Fuente: Elaboración propia

Es conveniente señalar que a pesar de haber sido empleada la dosis recomendada de cloro con el respectivo tiempo de retención hidráulica (TRH) no se logró eliminar toda la población microbiana existente de los coliformes fecales. Estos resultados están en concordancia con los obtenidos por Olivas *et al.*, (2013); además, es pertinente señalar que la dosis empleada (Mayorga y Mayorga, 2016) garantiza un residual libre disponible de cloro que evita la posible contaminación en las redes de distribución, sin exceder los límites permitidos por la ley, ambos argumentos redundan en beneficio para el proceso de tratamiento de las aguas para consumo humano de las comunidades de Balsa en Medio, Julián y Severino del Ecuador.

Propuesta de sistema de filtración

Estimación de la demanda de agua por las comunidades

Para efectos de cálculo de abastecimiento de acuerdo a la OMS (2003) se requiere en promedio 150 dm³/hab/d; particularmente, para una población de 311 habitantes, como es el caso de la comunidad de Julián (Tabla 4) la cual poseería la mayor población proyectada hasta el año 2029 de acuerdo a su tasa de crecimiento, sería necesario tratar un caudal de 46.650 dm³/día, aproximadamente. En función de lo señalado para el diseño del sistema de tratamiento del agua en las tres comunidades, se utilizará como referencia la población de la comunidad de Julián que posee la mayor tasa de crecimiento y los cálculos se extrapolaron para las comunidades de Severino y Balsa en Medio, en razón de la vida útil del sistema propuesto, así como también de mayor disponibilidad de agua potable para sus habitantes.

Tabla 4. Crecimiento de población para el tiempo previsto de funcionamiento (2029) del sistema de tratamiento en múltiples etapas.

Indicadores poblacionales	Julián	Severino	Balsa en medio
2013	215	105	183
2017	250	190	177
Tasa de crecimiento	0,0384	0,0171	-0,0004
Promedio de tasa de crecimiento	0,0184		
Proyección 2029	311	236	220

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la demanda de agua determinada para las comunidades se requieren dos tanques tipo tolva de 7.000 l, cada uno con área de filtración de 4,524 m² y velocidad de filtración de 0,215 m/h en todo el proceso; mientras que, el filtrado con zeolita requerirá un tanque tipo tolva de 14.000 L.

Descripción del sistema de tratamiento y capacidad de la infraestructura

El sistema de purificación del agua para consumo humano, propuesto en múltiples etapas (FiME) gravitatorio consiste inicialmente en un filtrado a través de grava, arena, gruesa y arena fina; seguidamente de otra etapa de filtración en zeolita y finalmente un sistema de desinfección por cloración (Figura 1).

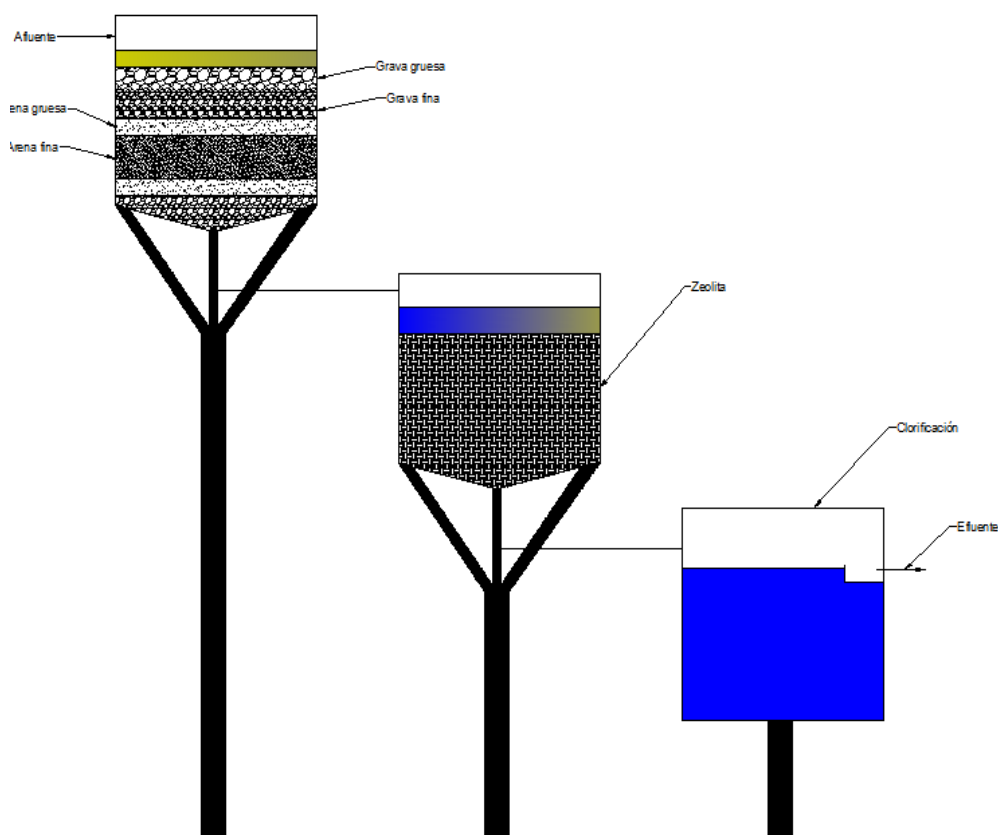


Figura 11. Esquema del sistema gravitativo propuesto para el tratamiento de aguas para consumo humano en las comunidades de Balsa en Medio, Julián y Severino.

El sistema de filtrado en grava + arena

El primer filtro estará constituido por dos tanques tipo tolvas (45°) de 7.000 litros de capacidad cada uno, con dimensiones de 2,55 m de altura y de 2,40 m de diámetro, poseerá en su interior capas de grava gruesa y fina, arena gruesa y fina, de acuerdo con lo descrito en la Figura 2.

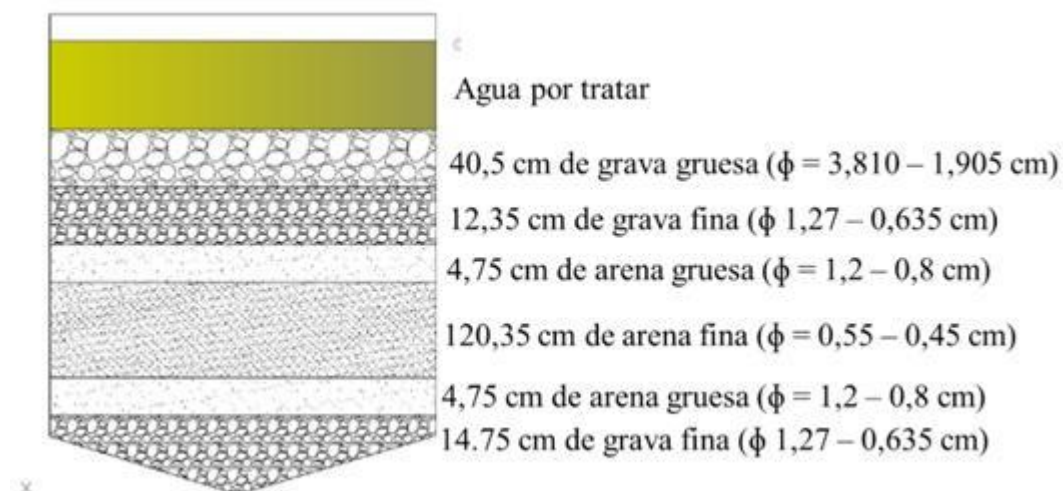


Figura 2. Dimensiones del filtro con arena y grava

El sistema de filtrado en zeolita

En la secuencia del proceso de depuración del agua por el sistema FIME, se instalará el filtro constituido por capas de zeolitas descrito en la Figura 3. Se requiere de un tanque tipo tolva (60°) de 14.000 L de capacidad, con dimensiones de 4,08 m de altura y de 3,05 m diámetro.

Para abordar este aspecto, el proceso de filtración, se realizará por dos capas de zeolitas, una primera capa constituida de zeolita del tipo clinoptilolita (320 cm) y la otra con mordenita (100 cm) (Figura 3). La zeolita ecuatoriana (Mordenita) tiene una velocidad de filtración de aproximadamente 0,266 m/h y la cubana (Clinoptilolita) de 0,264 m/h.

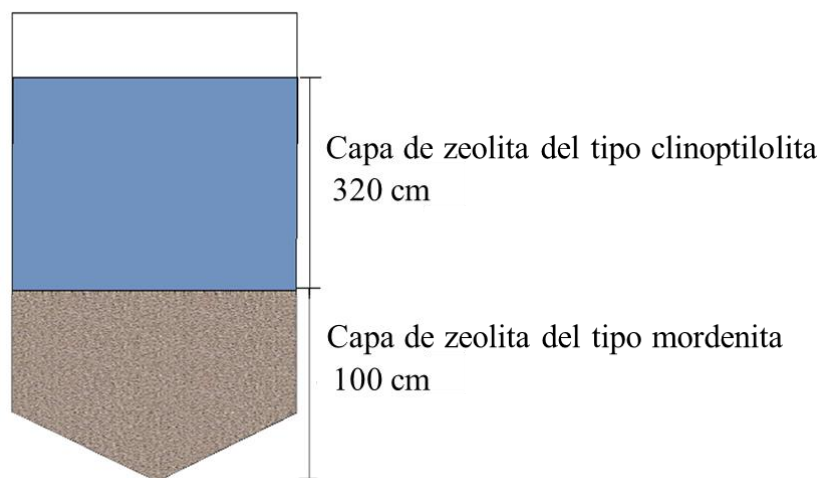


Figura 3. Dimensiones del filtro de zeolita

Desinfección con cloro activo

La tercera etapa del proceso de tratamiento de potabilización del agua consiste en la desinfección con cloro, mediante un reactor agitado, de acero inoxidable.

Para la potabilización de los $32,40 \text{ dm}^3/\text{min}$ ($46,65 \text{ m}^3/\text{día}$) se implementará un tanque de forma cilíndrica con volumen superior a 971 dm^3 , para lo cual se propone utilizar tanques de 1.100 l , dotado de 4 deflectores verticales igualmente distanciados en las paredes del tanque, para evitar vórtices y el eje del agitador a 3000 rpm , tendrá una inclinación de 15° con respecto a la vertical.

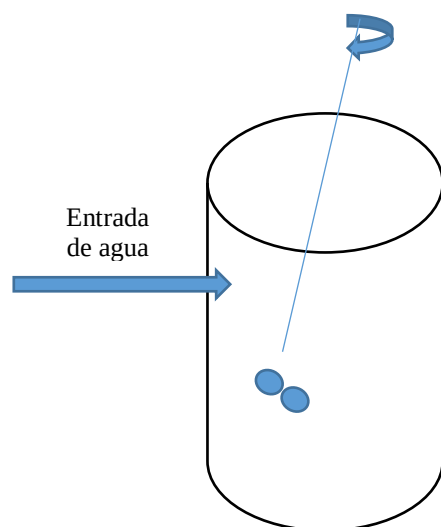


Figura 4. Tanque para desinfección con cloro.

El volumen ($V_{\text{Cloración}}$) del tanque de cloración se calcula:

$$V_{\text{Cloración}} = Q(TRH)$$

$$V_{\text{Cloración}} = 32,40 \frac{\text{dm}^3}{\text{min}} (30 \text{ min})$$

$$V_{\text{Cloración}} = 971,875 \text{ dm}^3$$

Para la instalación del clorador se creará un circuito de recirculación que permita el paso de un pequeño caudal de agua a través de la célula de medición de la concentración. El agitador de hélice a utilizar posee elementos impulsores de hojas cortas 12 cm , en este caso, giran a 3000 rpm . Al tanque de cloración se le introduce cloro activo mediante un clorador amperométrico, que mantiene una concentración constante de 5 g de cloro/ dm^3 de agua. La verificación del nivel de cloro libre presente en el agua potable lo realiza una sonda amperométrica para cloro libre.

En función del nivel detectado por la sonda, a través del controlador digital, el sistema actúa sobre la bomba dosificadora de hipoclorito de sodio (NaClO), compuesto químico fuertemente oxidante y económico que contiene cloro en estado de oxidación (+1). El sistema dosifica el producto cuando mantiene el valor de concentración deseado (Russell, 2015).

El modelo propuesto para las comunidades de Balsa en Medio, Julián y Severino satisface el requerimiento de un sistema que pueda ofrecer a sus usuarios calidad en el agua consumida de manera independiente (ONU, 2014)

visto que no se pueden vincular a sistemas interconectados con plantas de tratamiento de mayor envergadura y que pueden ser administrados por las propias comunidades como sugerido por PNUMA (2012).

Costos de implementación de la propuesta

La Tabla 5 resume los costos para la implementación de la propuesta. El proceso de filtración es de bajo costo, pues los tanques son plásticos con revestimiento antifúngico y sin recirculación; así como también, el sistema de cloración conformado por tanques, hélices y ejes de acero inoxidable, están disponibles en el mercado nacional.

El costo resulta aceptablemente conveniente, tanto que podría duplicarse por comunidad, de manera que mientras uno está en fase de operación, el otro está en etapa de mantenimiento.

Tabla 5. Precios de la implementación del sistema de tratamiento

Ítem considerado	Precio unitario (\$)	Cantidad/comunidad	Precio para una comunidad	Precio para las tres comunidades
Tolvas 7.000 L	800,00	2	1.600,00	4.800,00
Tolva 14.000 L	1.000,00	1	1.000,00	3.000,00
Tanque 1.100 L	225,00	1	225,00	675,00
Bomba centrífuga	112,00	1	112,00	336,00
Sistema de cloración	950,00	1	950,00	2.850,00
Sistema de alimentación*	3.450,00	1	3.450,00	10.350,00
Instalación general	700,00	1	700,00	2.100,00
Subtotal			8.037,00	24.111,00
Imprevistos (15%)			1.205,55	3.616,65
Total (\$)			9.242,55	27.727,65

*Amperométrico Fuente: Elaboración propia

De manera general, de ser implementada la propuesta del sistema para tratamiento de las aguas para consumo humano en las comunidades de Balsa en Medio, Julián y Severino ubicadas en la parte alta de la microcuenca del río Carrizal, se estaría proporcionando incremento significativo de la calidad de vida de las tres comunidades bajo estudio, particularmente las subpoblaciones más vulnerables como niños, niñas y adultos mayores, cuyas dolencias se asocian a la ingestión y contacto con agua de consumo contaminada.

Conclusiones

En el proceso de filtración propuesto se evidenció que las variables DBO₅; sólidos totales; coliformes fecales y turbiedad, durante el proceso de filtrado por arenas+gravas alcanzaron niveles permitidos de acuerdo a las normas establecidas para el agua de consumo humano en el Ecuador.

El uso de las zeolitas del tipo clinoptilolita y/o mordenita como procedimiento para complementar el proceso de filtración, redujeron de manera significativa los tenores de cobre, plomo, hierro, aluminio, cobalto y cromo, siendo la mordenita la más eficiente.

El uso del tratamiento con cloro después del filtrado redujo en 87% la presencia de coliformes fecales en el agua. Tales niveles están dentro de los rangos permitidos para el consumo humano.

El sistema de tratamiento es de fácil operación y mantenimiento, sus costos son aceptables y los insumos requeridos para su implantación están disponibles en el Ecuador.

Referencias bibliográficas

- Acuerdo N° 97-A. (2015). *Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua*. Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente.
- Acuerdo Ministerial, N. 061. (2015). *Instructivo al Reglamento de Aplicación de los Mecanismos de Participación Social establecido en el Decreto Ejecutivo, 1040*. Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente.
- APHA; AWWA; WPCF. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water*. 22th ed. New York, U.S.A: Ed. McGraw Hill.
- Autie, M. A.; Blanco, A.; Autie, G. y Serafin, R. (2011). Carbones activados a partir de anamú (*Petiveria alliacea* L.). Sus Características como adsorbente. Parte I. Adsorción de CO₂ y NH₃. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 42, 17-23.
- Barrios, C.; Torres, R.; Lampoglia, T. y Agüero, R. (2009). *Guía de Orientación en Saneamiento Básico para Alcaldías de Municipios Rurales y Pequeñas Comunidades*. Lima: Asociación Servicios Educativos Rurales – SER .
- Chulluncuy, N. C. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. *Ingeniería Industria*, Issue 29, 153-170.
- Córdova-Rodríguez, V.; Tito-Ferro, D.; Rodríguez-Iznaga, I.; Acosta-Chávez, R. M., y Quintana-Puchol, R. (2015). Caracterización de la zeolita natural de Palmarito de Cauto y su valoración como intercambiador iónico. *Minería & Geología*, 30(4), 1-20.
- Cuchimaque, C.; Vargas, L. Y. y Ríos, C. (2013). Remoción de Fe y Mn en aguas naturales por adsorción-oxidación sobre clinoptilolita. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, Issue 66: 24-44.
- Francisca, F. y Carro, M. E. (2014). Remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación-floculación. *Rev. Int. Contam. Ambie*, 30(2), 177-190.
- Gutiérrez, O.; Scull, I. y Oramas, A. (2006). Zeolita natural para la reducción de la dureza del agua. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 40(2): 191-192.
- Lucas, L. R. y Carreño, A. L. (2018). Calidad de agua de consumo humano en las comunidades Balsa en Medio, Julián y Severino de la microcuenca Carrizal, Ecuador. *Revista IIGEO*. Vol. 21 (En impresión).
- Mayorga, O. y Mayorga, J. (2016). Propuesta de tratamiento del agua de consumo humano en pequeñas comunidades. Caso: sector Santa Rosa-La Hechicera (Mérida, Venezuela). *Revista INGENIERÍA UC*, 23(3), 376-380.
- Metcalf y Eddy, Inc. (1996). *Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. Madrid, España: Ed. McGraw Hill.

Mishuél, E.; Hernández, M. y González, J. (2012). Remoción de arsénico de agua para uso y consumo humano empleando arcillas y zeolitas mediante diferentes materiales de adsorción. (Tesis Maestría en Ingeniería Ambiental). Universidad Nacional Autónoma De México.

Morag, L. (2002). Mechanisms of Arsenic Uptake from Aqueous Solution by Interaction with Goethite. *Environ. Sci. Technol.*, Volumen 36, 1757-1762.

NTE INEN 1108. (2014). Agua potable. Requisitos. s.l.:Norma Técnica Ecuatoriana.

NTE INEN 2200. (2017). Agua purificada envasada. Requisitos, s.l.: Norma Técnica Ecuatoriana.

Olivas, E.; Márquez, F.; Pedro, J.; Di Giovanni, G. D.; Corral Díaz, B., y Osuna Avila, P. (2013). Contaminación fecal en agua potable del Valle de Juárez. *Terra Latinoamericana*, 31(2), 135-143.

OMS (2003). *La cantidad de agua domiciliaria, el nivel del servicio y la salud*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.

OMS (2008). *Guías para la calidad del agua potable*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.

ONU (2014). *Agua y salud. Nota informativa*. Ginebra. Programa de ONU-Agua para la Promoción y la Comunicación en el marco del Decenio (UNW-DPAC) .

OPS (2005). *Guía para diseño de sistemas de tratamiento de filtración en múltiples etapas*. Lima: Organización Paramericana de la Salud.

Pereira, E.; Rosa, L.; Medri, R. y Sánchez, I. (2013). Evaluación del desempeño de filtración en múltiples etapas usando carbón activado granular y mantas sintéticas no tejidas. *Interciencia*, 38(10), 726-732.

PNUMA (2012). *GEO-5: Perspectivas del Medio Ambiente Mundial. Medio ambiente para el futuro que queremos*. Roma. Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Prada, A.; Velásquez, L. y Matta, L. (2009). Identificación de elementos que impactan la consolidación de procesos de potabilización del agua en planteles educativos suburbanos y rurales de Villavicencio y Acacias, Meta, Colombia. *Orinoquia*, 13(2), 147-160.

Russell, D. (2015). *Tratamiento de Aguas Residuales*. México D.F.: Ed. McGraw – Hill Interamericana.

Sánchez, L.; Latorre, J. y Valencia, V. (2009). Mejoramiento de la calidad del agua de riego por filtración en múltiples etapas (FiME). *Agronomía Colombiana*, 3(27), 107-115.

Valencia, V.; Sánchez, L. y Aponte, A. (2009). Evaluación de la filtración lenta en arena como tratamiento terciario de agua residual doméstica con fines de reúso agropecuario y piscícola. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, Issue 8, 39-49.

Veliz, E.; Llanes, J. G.; Fernández, L. A. y Bataller, M. (2016). Coagulación-floculación, filtración y ozonización de agua residual para reutilización en riego agrícola. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(1), 17-34.

Vera, I.; Rojas, M.; Chávez, W. y Arriaza, B. (2015). Evaluación de materiales filtrantes para el reúso en agricultura de aguas residuales tratadas provenientes de zonas áridas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 26(1), 5-19.

Wang, S. y Peng, Y. (2010). Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 156, 11-24.