



Revista EIA, ISSN 1794-1237 /
e-ISSN 2463-0950
Año XVII/ Volumen 17/ Edición N.34
Julio-Diciembre de 2020
Reia34019 pág 1-15

Publicación científica semestral
Universidad EIA, Envigado, Colombia

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /
TO REFERENCE THIS ARTICLE /**

Ramos Parra, Y.J.; Pinilla Roncancio, M.V. (2020). Calidad de agua de consumo humano en sistemas de abastecimiento rurales en Boyacá, Colombia. Un análisis infraestructural. Revista EIA, 17(34), Julio-Diciembre, Reia34019. <https://doi.org/10.24050/reia.v17i34.1378>

✉ *Autor de correspondencia:*

Pinilla Roncancio, M. (Mónica): Cra. 7 N 116 – 05. Código postal: 110111. (57 – 1) 3 39 49 49 Ext. 1257. Profesora Asistente, Universidad de los Andes, Bogotá D. C., Colombia. Correo electrónico: mv.pinilla@uniandes.edu.co

Recibido: 03-12-2019
Aceptado: 18-06-2020
Disponible online: 01-11-2020

Calidad de agua de consumo humano en sistemas de abastecimiento rurales en Boyacá, Colombia. Un análisis infraestructural

YADI JOHAIRA RAMOS PARRA¹

✉ MÓNICA VIVIANA PINILLA RONCANCIO²

1. Universidad de Boyacá
2. Universidad de los Andes

Resumen

Objetivo: Analizar la asociación entre la infraestructura de los sistemas de abastecimiento rurales de Boyacá y la calidad del agua de consumo humano distribuida durante el año 2016.

Materiales y métodos: Análisis observacional retrospectivo de datos secundarios de variables independientes en infraestructura de 288 sistemas de abastecimiento rurales, empleando estadísticos descriptivos, bivariados y multivariados, en relación con variable dependiente de calidad de agua de consumo humano nombrada CAT.

Resultados: no contar con un sistema de tratamiento reduce en 0,2 (IC 95% 0,05 - 0,72) los chances de cumplir con CAT en comparación con tener un tratamiento. Así mismo, si un acueducto controla la eficiencia de los procesos de potabilización se incrementan en 4,2 (IC 95% 1,16 - 15,25) chances de no superar CAT, en comparación con los sistemas que no realizan esta actividad operativa.

Conclusión: El abastecimiento de agua no segura en las áreas rurales de Boyacá se asocia con la falta de infraestructura de potabilización y el control de la eficiencia de las unidades de potabilización como actividad rutinaria operativa. Estas variables se relacionan con la presencia de *Escherichia coli* y coliformes en el agua de consumo de estas comunidades.

Palabras Clave: Agua potable, Abastecimiento de Agua, Población Rural, Factores de Riesgo, *Escherichia coli* y Coliformes.

Water Quality for Human Consumption in Rural Supply Systems in Boyacá, Colombia. An Infrastructural Analysis

Abstract

Objective: To analyze the association between the infrastructure of rural supply systems of Boyacá and the quality of water for human consumption distributed during 2016.

Materials and methods: Retrospective descriptive analysis of secondary data of independent variables in infrastructure of 288 rural supply systems, using descriptive, bivariate and multivariate statistics in relation to the dependent variable of water quality for human consumption named CAT.

Results: not having a treatment system reduces in 0.2 (95% CI 0.05 - 0.72) the chances of complying with CAT compared to having a treatment. Likewise, if an aqueduct controls the efficiency of the purification processes, they increase in 4.2 (95% CI 1.16 - 15.25) chances of not exceeding CAT, in comparison with systems that do not perform this operational activity.

Conclusion: The unsafe water supply in the rural areas of Boyacá is associated with the lack of potable water infrastructure and the control of the efficiency of the purification units as a routine operational activity. These variables are related to the presence of *Escherichia coli* and coliforms in the drinking water of these communities.

Key words: Drinking Water, Water Supply, Rural Population and Risk factors, *Escherichia coli* y Coliforms.

1. Introducción

El agua contaminada microbiológicamente causa patologías infecciosas dentro de las cuales se destacan las enfermedades diarreicas agudas (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2015; Ministerio de Salud y Protección Social, 2016). El acceso a agua potable constituye un componente transversal de las políticas en salud (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2017), y es un derecho fundamental para todos los seres humanos (Urquhart Cademartori y Mesquita Leutchuk de Cademartori, 2014; Sutorius y Rodríguez, 2015). Esto implica, que la provisión pública de agua potable debe asegurar que ningún individuo sea privado de la cantidad y calidad de agua que garanticen su vida, su salud y su seguridad alimentaria (Contreras y Acevedo González, 2013; Martínez y Defelippe, 2013; ONU, 2015).

El Objetivo de Desarrollo del Milenio (ODM) número 7, accesibilidad a agua potable y saneamiento básico, fue alcanzado en la mayoría de países del mundo, dado que, para el año 2015, 91% de la población mundial contaba con una fuente mejorada de agua (protegida de contaminación fecal). Pese a esto, aún existen 663 millones de personas que carecen de acceso a fuentes mejoradas de agua, 80% de las cuales viven en áreas rurales (ONU, 2015; OMS, 2017). Igualmente, se evidencian variaciones importantes de cobertura entre zonas urbanas (96%) y zonas rurales (84%) (OMS y UNICEF, 2017). Por lo anterior, el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 6, *Agua Limpia y Saneamiento*, propone garantizar el acceso universal al agua potable segura y asequible para todos en el año 2030 (ONU, 2015; OMS, 2017; OMS y UNICEF, 2017), lo cual plantea un importante reto para diferentes países a nivel mundial.

En Colombia, para el año 2016, 91% de la población consumió agua de una fuente mejorada (Ministerio de Salud y Protección Social, 2016), logrando alcanzar de esta forma el cumplimiento del ODM 7 a nivel nacional. Sin embargo, solo el 73,8% de las personas habitantes de áreas rurales contaban con una fuente protegida de contaminación fecal, evidenciando una marcada inequidad en el acceso a agua potable entre zonas rurales y urbanas (Carrasco, 2016).

Por su parte, en el Departamento de Boyacá para el año 2015, 96% del agua distribuida en las áreas rurales no fue apta para el consumo humano (Gobernación de Boyacá, 2016). Lo anterior, asociado a que 42,9% de la población en el departamento vive en zona veredal desarrollando actividades productivas como: agricultura, ganadería y minería, permite inferir que la calidad del agua es un problema importante que puede afectar la salud pública de las poblaciones y que debe ser un asunto prioritario dentro de las acciones encaminadas al mejoramiento del bienestar integral de la comunidad boyacense (ONU, 2015; Gobernación de Boyacá, 2016; Carrasco, 2016).

La OMS en 2009 publicó las *Guías de Calidad de Agua*, que proponen un marco de seguridad del agua. Este marco busca la implementación de metodologías que apoyen el control de la calidad del agua de consumo humano (OMS, 2009). Este control se sustenta en la identificación y evaluación integral del sistema de abastecimiento (desde el lugar de captación hasta el usuario final). La metodología propuesta por la OMS permite determinar si el sistema se encuentra en la capacidad de suministrar agua que cumpla con las metas orientadas a la protección de la salud de las personas (OMS, 2017).

Teniendo en cuenta lo anterior, este artículo tuvo como objetivo analizar la asociación entre factores con mayor nivel de riesgo en infraestructura y la calidad del agua distribuida en 288 acueductos rurales del departamento de Boyacá. Para esto, se realizó un estudio descriptivo de corte transversal retrospectivo, que permitió la caracterización infraestructural y de calidad del agua de los abastos rurales, valoración del nivel de riesgo y finalmente, el establecimiento de una asociación entre un nivel de riesgo alto y muy alto con la calidad de agua distribuida.

2. Metodología

Con el objetivo de analizar la relación entre la infraestructura catalogada en un nivel de riesgo alto o muy alto y la calidad de agua de consumo, se planteó un estudio descriptivo, de corte transversal que valoró información de los sistemas de abastecimiento de agua en el año 2016. Este estudio fue avalado por el Comité de Ética de la Escuela de Gobierno de la Universidad de los Andes.

Área de Estudio

Boyacá es uno de los 32 departamentos de Colombia. Está situado en la Región Andina en el centro oriente del país, tiene una extensión territorial de 23.189 km² distribuida en un 0,5% (121,9 km²) correspondiente al área urbana y el 99,5% (22.953.6 km²) al área rural. Administrativamente el departamento se divide en 123 municipios, 57,1% de sus habitantes están ubicados en el área urbana y 42,9% en el área rural (Gobernación de Boyacá, 2016). Los sistemas de abastecimiento objeto de análisis se encuentran en las áreas rurales de cada uno de los municipios que componen el departamento e incluyen pequeños y grandes abastos considerando el número de usuarios servidos.

Fuente de Datos

La fuente de información son los datos producidos por la Secretaría de Salud del Departamento de Boyacá para el año 2016. Dichos datos fueron recolectados en inspecciones sanitarias realizadas a 288 acueductos rurales durante 2016. Estos registros se encuentran en el archivo del Programa de Calidad de Agua para Consumo Humano adscrito a la Dirección Técnica de Salud Pública. Estos acueductos fueron seleccionados dado que eran los únicos con registros existentes sobre el estado general de los sistemas de abastecimiento y calidad de agua distribuida. A partir de esta información, se creó una base de datos que relacionaba aspectos infraestructurales de los acueductos y los parámetros básicos del agua distribuida (Resolución 2115, 2007; Gobernación de Boyacá, 2016; Resolución 082, 2009).

Variables

La información de calidad de agua abastecida en cada acueducto fue extraída de 576 resultados de muestras de agua recolectadas en épocas de lluvia y sequía por la autoridad sanitaria en las redes de distribución. Para efectos de este estudio se consideró lo recomendado por la OMS (2017) y lo definido en la Resolución 2115 (2007), priorizando como parámetros de medida de calidad de agua de consumo humano: turbiedad, cloro residual libre, coliformes totales y *Escherichia Coli* (*E. coli*), esto aunado a que son los parámetros de mayor puntuación en el Índice de Calidad de Agua para Consumo Humano (IRCA).

La *variable dependiente* Calidad de Agua Total (CAT) muestra la proporción de acueductos del departamento que cumplan con los parámetros de turbiedad, cloro residual libre, coliformes totales y *E. coli* en el año 2016. Se trató como 1 si el acueducto cumplía los límites máximos permisibles definidos en la norma de calidad de agua en los cuatro parámetros en mención, y 0 cuando no cumplía con los mismos.

Las *variables independientes* fueron seleccionadas a partir del Formulario Único de Inspección Sanitaria, correspondiente al Anexo Técnico 1 de la Resolución 082 del 2009. Este formulario reporta información *in situ* de los sistemas de abastecimiento de agua de consumo en cuanto a unidades de potabilización, instrumentación, red de distribución y operación del sistema. Se consideró que las variables infraestructurales empleadas para el análisis concordaran con los lineamientos establecidos en el Manual para el Desarrollo de Planes de Seguridad del Agua que permitieran realizar una evaluación general de riesgos en abastecimientos de agua de consumo (OMS, 2009). Además, se creó una variable dicotómica tratada como 1 cuando el acueducto tenía sistema de tratamiento, sin importar el tipo, y 0 cuando no contaba con infraestructura de potabilización.

A su vez, se valoraron características generales de la operación de los sistemas de potabilización, tales como, la disponibilidad de trabajadores certificados e índice de continuidad del servicio de acueducto, el cual identificaba la suficiencia de agua distribuida a los usuarios del abasto en horas por día. En cuanto a la red de distribución, se consideró que existirían planos detallados de la red y la sectorización de esta. Estos regresores se han asociado con implicaciones en la calidad de agua distribuida cuando no se conoce las condiciones de los mismos, y por ende su eficiencia, dado que el agua se puede contaminar en cualquier parte del proceso de potabilización o distribución. Estas variables se presentan en la **Tabla 1**. (Mora, 2006; OMS, 2009).

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS INFRAESTRUCTURALES DE LOS ACUEDUCTOS RURALES DE BOYACÁ RELACIONADAS COMO VARIABLES INDEPENDIENTES. LAS VARIABLES DE INFRAESTRUCTURA SE ADAPTARON A PARTIR DEL ANEXO TÉCNICO 1 RESOLUCIÓN 082 DE 2009, EL CUAL ESTIMA EL ÍNDICE DE RIESGO DE ABASTECIMIENTO POR PERSONA PRESTADORA DEL SERVICIO DE ACUEDUCTO EN ÁREAS RURALES

Característica	Tipo de Variable	Valoración
Infraestructura del Sistema de Tratamiento		
Tipo de Fuente de Abastecimiento	Dicotómica	0: Subterránea 1: Superficial
Caudal Tratado (L/s)	Continua	Valor reportado 0: si no hay información reportada
Suscriptores Atendidos (SA)	Discreta	Número de puntos de agua que pagan por el servicio
Población Atendida: (Habitantes)	Discreta	SA*4
Longitud de la red de distribución	Continua	Valor en Kilómetros reportado
Sistema de Tratamiento	Categórica	0: Compacto 1: Convencional 2: No tiene Sistema 3 :FIME
Trabajadores certificados en competencias laborales	Dicotómica	1: Certificado 0: No Certificado
Índice de continuidad del servicio de acueducto	Discreta	Horas día de servicio de acueducto
Medición del caudal de ingreso	Dicotómica	1: Se tiene/ mide 0: No se tiene/ mide
Medición de caudal de salida		
Sistema de registro y archivo de la información.		
Manuales de operación y mantenimiento.		
Laboratorio para el control de la calidad de agua de consumo		
Realizan los ensayos fisicoquímicos y microbiológicos de conformidad con la Res. 2115 de 2007		
Se controla la eficiencia de las unidades de potabilización		
Planos de la red de distribución detallados		
Red de distribución sectorizada		
Fugas y daños son atendidos oportunamente.		
Tanques y otras estructuras del sistema de distribución se limpian y desinfectan periódicamente.		
Equipos portátiles para controlar Cloro Residual Libre y pH.		

Análisis de Datos

Se utilizaron estadísticos descriptivos para caracterizar la infraestructura de los 288 acueductos y el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en cada época del año para establecer aquellos que superaron los límites máximos

permisibles establecidos en la legislación colombiana. En este proceso se vincularon descriptivos relacionados con los interrogantes: ¿Cuáles son los parámetros físico-químicos y microbiológicos de mayor incumplimiento en los acueductos rurales de Boyacá? y ¿Qué características infraestructurales son las de menor frecuencia en los acueductos rurales objeto de estudio?

Posteriormente, de cada variable infraestructural se estimó el nivel de riesgo empleando una matriz semicuantitativa de puntuación del riesgo. Primero, se estimó la probabilidad de ocurrencia del riesgo en una escala de 1 a 5. Donde dada la frecuencia en los sistemas de abastecimiento, se categorizó 1 como raro (0% a 20%), 2 Improbable (21% a 40%), 3 moderado (41% a 60%), 4 probable (61% a 80%) y 5 casi certeza (81% a 100%). Luego, se valoró la gravedad de las consecuencias de cada riesgo en salud pública, en una escala de 1 a 5, siendo 1 Insignificante y 5 Catastrófico. Esto considerando la implicación del incumplimiento de las características físicoquímicas y microbiológicas del agua suministrada y la insuficiencia del sistema de potabilización o distribución en la protección de la salud de los usuarios de los acueductos, a corto, mediano y largo plazo. Posteriormente, se clasificó el nivel de riesgo de cada una de las variables infraestructurales, a partir de la puntuación del riesgo, como, Bajo (<6), Medio (6-9), Alto (10-15) y Muy Alto (≥ 16) (OMS, 2009; OMS, 2017; Amézquita - Marroquín, Pérez - Vidal, y Torres - Lozada, 2014).

Con las características infraestructurales generales y aquellas que reportaron un nivel de riesgo alto y muy alto se realizó un análisis bivariado para observar diferencias en las medias y proporciones de la variable dependiente CAT a partir de las variables independientes. Finalmente, se explicó la asociación entre la variable CAT y las características infraestructurales de interés, estructurando un modelo de regresión logística, con el objeto de responder el interrogante ¿Cómo se asocian los factores de mayor riesgo en infraestructura con calidad de agua de los acueductos rurales del departamento de Boyacá para el año 2016?

El modelo creado tenía como variables independientes: número de suscriptores, caudal tratado, personal capacitado, no tener un sistema de tratamiento, medición del caudal de ingreso y salida, sistema de registro y archivo de la información, manuales de operación y mantenimiento, laboratorio para el control de la calidad de agua de consumo, realizar los ensayos físicoquímicos y microbiológicos de conformidad con la Res. 2115 de 2007, control de eficiencia de las unidades de potabilización y equipos portátiles para controlar Cloro Residual Libre y pH. El software empleado para el desarrollo de la investigación fue Stata 14.0.

3. Resultados

Caracterización de los sistemas de abastecimiento de agua de consumo

Los acueductos suministraban a 244.216 habitantes aproximadamente, correspondiente al 19% de la población del departamento de Boyacá, representado 44% de las personas que habitan en el área rural. 4% de los acueductos atienden menos de 100 personas, 41% entre 100 y 500, 31% entre 500 y 1.000 y un 24% más de 1.000 habitantes. La principal fuente de abastecimiento es de tipo superficial, es decir, un río, quebrada o nacimiento (253 acueductos).

El caudal a tratar que ingresa a las unidades de potabilización en promedio era de $2 \text{ L/s} \pm 3,3$, con un valor máximo de $6,7 \text{ L/s}$; 59% de los acueductos no estiman la cantidad de agua que ingresa al sistema de potabilización, 15% de los acueductos abastecen 50 usuarios o menos, 2,4% cuentan con más de 1000 usuarios, con una media de 212 usuarios por sistema de abastecimiento. En cuanto a la longitud de la

red de distribución, se puede mencionar que, existen 22 acueductos que desconocen el número de kilómetros de la red que componen el sistema de distribución, en promedio cada acueducto cuenta con 11 Km \pm 3,7 de tubería y se observa un valor máximo de 32,6 Km. Las demás características infraestructurales de los acueductos se describen en la **Tabla 2**.

TABLA 2. PROPORCIÓN DE ACUEDUCTOS RURALES EN BOYACÁ QUE TIENEN INFRAESTRUCTURA EXISTENTE Y DISPONIBLE PARA OPERACIÓN POR VARIABLE INDEPENDIENTE DEFINIDA (N = 288). SE ESTIMA PORCENTAJE DE EXISTENCIA DE INFRAESTRUCTURA A PARTIR DEL TOTAL DE ACUEDUCTOS EVALUADOS.

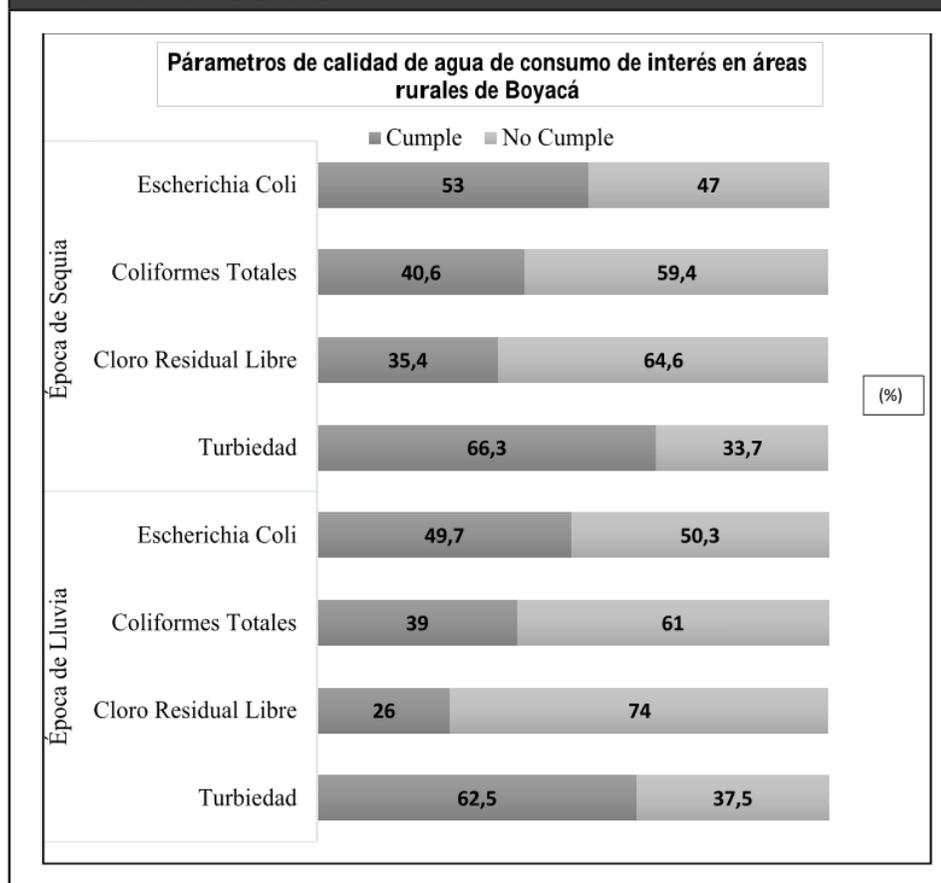
Característica del sistema de Abastecimiento	(%)	
Tipo de Fuente de Abastecimiento	Superficiales	93
	Subterráneas	7
Sistema de Tratamiento	Compacta	37
	Convencional	6
	FIME	14
	No tiene Sistema de Tratamiento	43
Trabajadores certificados en competencias laborales	Certificado	5
Índice de Continuidad del Servicio de Acueducto (Horas)	0 – 10	8
	10 a 23.9	18
	24	74
Medición del caudal de ingreso	Se mide	13
Medición del caudal de salida	Se mide	16
Sistema de registro y archivo de la información	Se tienen registros	19
Manual de operación y mantenimiento	Se tiene documentado	32
Laboratorio para el Control de la calidad de agua de consumo	Si tiene infraestructura y equipos	14
Realizan los ensayos fisicoquímicos y microbiológicos de conformidad la Res. 2115 de 2007	Si	11
Se controla la eficiencia de unidades de potabilización		8
Equipo para el control de pH y Cloro Residual Libre en red de distribución		22
Planos de la red de distribución		28
Red de distribución sectorizada		66
Fugas y daños son atendidos oportunamente		84

Calidad de agua distribuida en las áreas rurales de Boyacá

Los resultados de los parámetros de calidad de agua para las muestras analizadas se presentan en la figura 1. Alrededor de 60% de los acueductos no cumplen con el valor máximo permisible de coliformes totales de 0 UFC (Unidades Formadoras de Colonias) /100 cm³, consecuentemente, 50% reportan *E. coli* (0 UFC/100 cm³). Cerca de 60% de los sistemas de abasto no cumplen con el rango de 0,3 a 2,0 mg/L Cl₂ de desinfectante libre en red de distribución. Se observa que tanto en época de lluvias como de sequía más de 60% de los acueductos cumplen con el límite máximo permisible de 2 Unidades Nefelométrías de Turbiedad (NTU) para el parámetro de turbiedad.

Por otro lado, hay un aumento entre 1,6% y 9,4% en el número de abastos que cumplieron con los parámetros de turbiedad, *E. coli*, coliformes totales y cloro residual libre de las muestras recolectadas en época de sequía con respecto a la de lluvias. Cabe mencionar que tan solo 13,6% de los sistemas de tratamiento cumplen con los límites máximos permisibles en los parámetros microbiológicos, de cloro residual libre y turbiedad, definidos en la norma de calidad de agua.

Figura 1. Parámetros de calidad de agua de consumo diferenciados por épocas de sequía o de lluvias. Se analizaron 576 muestras de agua recolectadas por la autoridad sanitaria del departamento de Boyacá y el correspondiente porcentaje de cumplimiento teniendo en cuenta la Resolución 2125 de 2007.



Valoración del riesgo infraestructural con Matriz Cuantitativa

Se estimó el nivel de riesgo de las variables infraestructurales objeto de análisis. Como se observa en la **Tabla 3**, se calculó la probabilidad de ocurrencia de cada variable como *probable* o *casi certeza*, esto dado porque los acueductos no tenían la infraestructura de interés con una frecuencia entre 60% y 80%. Luego, se estimó la gravedad en las consecuencias en salud pública, valorándose como *graves* o *catastróficas*, haciendo referencia a que se incumple con la reglamentación en cuanto a agua potable, lo cual podría repercutir en la salud de los usuarios de estos acueductos, a corto o largo plazo, generando una insuficiencia parcial o total del sistema o del servicio de agua potable mayor a 12 horas. Con estas valoraciones se reportaron 9 variables con 10 a 25 puntos definiendo un nivel de riesgo alto o muy alto.

TABLA 3. VALORACIÓN DEL NIVEL DE RIESGO DE VARIABLES INFRAESTRUCTURALES INDEPENDIENTES EN ACUEDUCTOS RURALES DE BOYACÁ. SE CALCULÓ EL NIVEL DE RIESGO DE CADA VARIABLE INDEPENDIENTE SEGÚN LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA Y LA POSIBLE INCIDENCIA EN SALUD PÚBLICA. LAS VARIABLES RESULTANTES EN UN NIVEL DE RIESGO ALTO O MUY ALTO SE EMPLEARON PARA LOS ANÁLISIS BIVARIADO Y MULTIVARIADOS

Característica	Probabilidad de ocurrencia del riesgo	Gravedad de las consecuencias en salud pública	Valoración del Riesgo	Nivel de Riesgo
Medición del caudal de Ingreso	Casi certeza	Grave	20	Muy Alto
Medición de caudal de salida	Casi certeza	Moderado	15	Alto
Sistema de registro y archivo de la información.	Casi certeza	Leve	10	Alto
Manuales de operación y mantenimiento.	Probable	Grave	16	Muy Alto
Laboratorio para el control de la calidad de agua de consumo	Casi certeza	Grave	20	Muy Alto
Realizan todos los ensayos físicos, químicos y microbiológicos de conformidad con el capítulo V de la Res. 2115 de 2007	Casi certeza	Catastrófico	25	Muy Alto
Se controla la eficiencia de las unidades de potabilización	Casi certeza	Catastrófico	25	Muy Alto
Planos de la red de distribución detallados	Probable	Grave	16	Muy Alto
Red de distribución sectorizada	Improbable	Grave	8	Medio
Fugas y daños son atendidos oportunamente.	Raro	Catastrófico	5	Medio
Tanques y otras estructuras del sistema de distribución se limpian y desinfectan periódicamente.	Improbable	Grave	8	Medio
Equipos portátiles para controlar Cloro Residual Libre y pH.	Probable	Grave	16	Muy Alto

Análisis bivariado

Los resultados del análisis bivariado se presentan en la **Tabla 4**. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas en cuatro variables de la infraestructura general de los abastos, entre los acueductos que cumplen los límites máximos permisibles en parámetros de calidad de agua definidos en CAT, en comparación con aquellos que no logran cumplirlos. Las variables son, disponibilidad de trabajadores certificados (diferencia [diff] -0,147; Intervalo confianza (IC) del 95% [IC 95%], -0,269- -0, 025), número de suscriptores atendidos (diff -112,43; IC 95%, -194,3- -30, 6), contabilizar el caudal tratado (diff -5,505; IC 95%, -7,522- -3,488) y no tener un sistema de tratamiento (diff 0,405; IC 95%, 0,301-0,509).

Por otro lado, se estimaron diferencias de proporciones en las variables infraestructurales que presentan riesgo alto o muy alto. Los resultados revelan que hay diferencias estadísticamente significativas entre los acueductos que cumplen con los parámetros de calidad de agua de CAT y los abastos que no lo hacen, cuando se tiene una infraestructura de laboratorio para el control de la calidad de agua de consumo (diff -0,221; IC 95%, -0,374- -0,068). Así mismo, en realizar los ensayos físicos,

químicos y microbiológicos con la periodicidad requerida según la norma de calidad de agua (diff -0,231; IC 95%, -0,379- -0,083), al controlar la eficiencia de las unidades de potabilización en un acueducto (diff -0,323; IC 95%, -0,475- -0,171) y cuando se tienen equipos para controlar en red de distribución cloro residual libre y pH (diff -0,391; IC 95%, -0,553- -0,229).

Adicionalmente, se encontraron diferencias estadísticamente significativas cuando, el acueducto calcula el caudal de ingreso del agua (diff -0,27; IC 95%, -0,43- -0,11) o de salida al sistema de tratamiento (diff -0,19; IC 95%, -0,33- -0,06), se tiene un sistema de registro y archivo de información de las actividades diarias del operario (diff -0,31; IC 95%, -0,44- -0,18) y se documenta el manual de operación y mantenimiento del sistema de potabilización (diff -0,20; IC 95%, -0,30- -0,11), entre los subgrupos de la variable dependiente CAT.

TABLA 4. RESULTADOS ANÁLISIS BIVARIADO. COMPARACIÓN SUBGRUPOS DE VARIABLE DEPENDIENTE RESPECTO DE VARIABLE INDEPENDIENTES RESULTANTES DE LA VALORACIÓN DEL NIVEL DE RIESGO. EL ANÁLISIS BIVARIADO SE ESTIMÓ CONSIDERANDO LA NATURALEZA DE LA VARIABLE INDEPENDIENTE, POR LO CUAL, SE REALIZÓ PARA EL CASO EN QUE APLICÓ DIFERENCIA DE MEDIA O DE PROPORCIONES.

Variable Independiente	Diferencia	Intervalo de Confianza 95%	
Diferencia de Proporciones			
Tipo de fuente de abastecimiento	-0,009	-0,098	0,080
No tener sistema de tratamiento	0,405	0,301	0,509
Trabajadores certificados	-0,147	-0,269	-0,025
Medición caudal de ingreso	-0,263	-0,418	-0,108
Medición del caudal de salida	-0,226	-0,382	-0,070
Sistema de archivo y registro de información	-0,406	-0,568	-0,244
Manual de operación y mantenimiento	-0,376	-0,536	-0,216
Laboratorio para el control de la calidad de agua de consumo	-0,220	-0,374	-0,068
Realizan los ensayos fisicoquímicos y microbiológicos de conformidad con la Res. 2115 de 2007	-0,231	-0,379	-0,083
Se controla la eficiencia de las unidades de potabilización	-0,323	-0,475	-0,171
Planos de la red de distribución detallados	-0,116	-0,278	0,047
Equipos portátiles para controlar Cloro Residual Libre y pH.	-0,391	-0,554	-0,229
Diferencia de Medias			
Caudal Tratado	-5,505	-7,522	-3,488
Suscriptores Atendidos	-112,438	-194,278	-30,598
Longitud de Red Distribución	-1,648	-9,720	6,423
Índice de Continuidad del Servicio	-1,692	-3,896	0,512

Análisis Multivariado

Los resultados obtenidos evidencian que no contar con un sistema de tratamiento reduce en 0,2 (IC 95% 0,05-0,72) los chances de cumplir con CAT en comparación

con tener un tratamiento de tipo compacto, convencional o FIME. Es decir, hay una asociación positiva significativa en los acueductos que no tienen un sistema de potabilización respecto de cumplir los límites máximos permisibles de los parámetros de calidad de agua definidos en la variable dependiente.

Así mismo, hay una asociación positiva significativa si un acueducto controla la eficiencia de los procesos de potabilización en comparación con los sistemas que no realizan esta actividad operativa. Esto implica un incremento en 4,2 (IC 95% 1,16-15,25) chances de cumplir con los requerimientos normativos en los parámetros de calidad de agua de interés.

Los resultados revelaron que existe una asociación positiva significativa cuando el abasto tiene un equipo para controlar el pH y cloro residual libre en la red de distribución, respecto de los acueductos que no tienen disponible este equipamiento. Por esto, los acueductos que disponen del equipo tienen 2,62 (IC 1,064-6,373) más chances de no superar los límites máximos permisibles de los parámetros relacionados en la variable dependiente.

Las demás características infraestructurales generales y aquellas valoradas en un nivel de riesgo alto y muy alto incluidas en el modelo de regresión no reportaron significancia. Los resultados de análisis multivariado se detallan en la **Tabla 5**.

TABLA 5. RESULTADOS REGRESIÓN LOGÍSTICA MULTIVARIADA VARIABLE DEPENDIENTE CAT. LAS VARIABLES INDEPENDIENTES QUE REFIRIERON SIGNIFICANCIA ESTADÍSTICA INDICARON UN VALOR P > 0.05

Variable Infraestructura	OR	[IC 95%]
Caudal de Tratamiento (L/s)	1,1	0,988 – 1,196
Suscriptores Atendidos	1,0	0,998 – 1,002
Trabajadores Certificados	1,6	0,521 – 5,154
No sistema de tratamiento	0,2	0,053 – 0,718
Medición del caudal de Ingreso	0,5	0,159 – 1,865
Medición del caudal de Salida	1,0	0,351 – 2,982
Sistema de registro y archivo	2,1	0,767 – 5,829
Manuales de operación y mantenimiento	1,4	0,529 – 3,658
Laboratorio para el control de la calidad de agua de consumo	0,6	0,214 – 1,702
Realizan los ensayos fisicoquímicos y microbiológicos de conformidad con la Res. 2115 de 2007	0,9	0,251 – 3,066
Se controla la eficiencia de las unidades de potabilización	4,2	1,163 – 15,253
Equipos portátiles para controlar Cloro Residual Libre y pH	2,6	1,064 – 6,373

4. Discusión

El agua potable es un derecho humano fundamental, favorece la erradicación de la pobreza, el hambre y se considera un componente transversal en las políticas de protección de la salud de las personas (Contreras y Acevedo Gonzalez, 2013; Murillo Chávarro, 2014). Bajo esta premisa, la no provisión de agua segura en más de 80% de los acueductos rurales de Boyacá es una inequidad que limita la posibilidad de estas comunidades de tener un servicio público continuo y de calidad. La contaminación

microbiológica es el mayor riesgo en salud asociado al agua de consumo, dado que en 60% de los acueductos rurales de Boyacá se detectó contaminación microbiológica, esto se presenta como un factor de riesgo de sufrir enfermedades infecciosas ocasionadas por el consumo de agua no segura (OMS, 2017).

El agua no segura que se abastece en las áreas rurales del Departamento se asocia con la falta de sistemas de tratamiento y con el control de las unidades de potabilización. Esto se relaciona con el hecho de que no contar con un sistema de tratamiento reduce la probabilidad de asegurar la calidad de agua de consumo, debido a que no se reduce la posible contaminación fisicoquímica o microbiológica (OMS, 2017). Adicionalmente, un acueducto que controla la eficiencia de las unidades de potabilización como una actividad operativa rutinaria, incrementa su posibilidad de abastecerse con agua sin contaminación microbiológica (Klug, Cronk, Shields, y Bartram, 2018). El alto porcentaje de acueductos en el área veredal de Boyacá sin ningún tipo de sistema de tratamiento es un aspecto que pone en riesgo la salud de la población. Por lo cual, se requiere priorizar inversiones en infraestructura de agua potable, para garantizar la inocuidad del agua servida, de fácil operación y mantenimiento considerando el contexto de la comunidad rural.

Se logró establecer que en 50% de los acueductos que indican abastecerse de un río, lago, nacimiento, entre otros, se detectó *E. coli*, estos resultados son comparativos con Khan et al. (2017), quienes determinaron que el abastecimiento de fuentes superficiales presenta una mayor prevalencia de contaminación fecal, principalmente aguas arriba del lugar de captación. Este es un aspecto relevante para definir el tipo de sistema de tratamiento, así como las sustancias químicas que se emplearían en la potabilización, lo cual podría representar una dificultad mayor para asegurar inocuidad en el agua de consumo (Kostyla, Bain, Cronk, y Bartram, 2015), no obstante, en el estudio de Khan et al., (2017) la presencia de *E. Coli* se dio en cerca de 97% de las 58 muestras analizadas.

Por otro lado, se evidenció que el control de las unidades de potabilización es una actividad rutinaria fundamental para asegurar la calidad de agua de consumo (OMS, 2017). Este control se puede ver afectado por diferentes variables tales como, disponibilidad de personal operativo con el conocimiento y la capacidad técnica para establecer si el tratamiento es eficiente, apoyados en la disposición de equipos y materiales de laboratorio para el control de parámetros básicos de calidad de agua (Wright et al., 2014). Esto también es validado por Klug et al., (2018) en donde se categorizaron una serie de variables que determinaban la falla o funcionalidad de un abasto rural, dentro de las que se incluyeron el manejo de los acueductos, representados en la idoneidad del personal para realizar el correcto tratamiento del agua de consumo y la administración integral del sistema. Klug et al., (2018), establecieron que aquellos acueductos rurales que tenían una administración robusta, podían garantizar inocuidad en el agua de consumo, considerando el control diario a los procesos unitarios de potabilización, entre otros.

Si bien la variable concerniente a la disponibilidad de personal certificado no fue significativa, explicado por la poca variación de la misma, es de suma importancia para el análisis, teniendo en cuenta que en un marco de seguridad del agua es indispensable que el operador del sistema de abastecimiento tenga los conocimientos y la experticia necesaria, con lo cual, se garantice una adición de químicos correcta, estimación periódica de la eficiencia de las unidades de potabilización y manejo adecuado de la red de distribución (Pérez - Vidal, Amézquita - Marroquín, y Torres - Lozada, 2012; Amézquita - Marroquín et al., 2014; Setty et al., 2017). Futuros estudios deberán explorar las posibles causas por las cuales en los acueductos rurales de Boyacá esta variable no tiene una asociación con CAT.

Otro aspecto que apoya el control de la eficiencia de las unidades de potabilización es la disponibilidad de un laboratorio o equipos básicos para el control de las características de calidad de agua durante el tratamiento y posterior distribución (OMS, 2017). En 89,2% de los acueductos rurales de Boyacá no se cuenta con los equipos necesarios para el control de la calidad de agua durante el proceso de potabilización. Por lo cual, la información disponible de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos se limita únicamente a las muestras de agua realizadas por vigilancia de la autoridad sanitaria, esto implica que no se cuenta con información diaria de la calidad del agua cruda ni tratada, circunstancia que incide en el desconocimiento de la posible presencia de coliformes totales y *E. coli*.

Estudios como los de Wright et al., (2014) determinaron que la falta de acceso a una infraestructura fija de laboratorio en Colombia, con los equipos y protocolos definidos para la estimación de los parámetros de calidad de agua de consumo, impide caracterizar periódicamente el agua cruda o tratada, principalmente en áreas rurales o en comunidades con poblaciones menores a 2500 habitantes. Esto imposibilita efectuar controles periódicos de la eficiencia de las unidades de potabilización, generando incertidumbre en la operación del sistema de abastecimiento (Wright et al., 2014; OMS, 2017).

Finalmente, se observa que la falta de infraestructura de laboratorio para el control de las unidades de potabilización también incide en que no se pueda monitorear las características microbiológicas del agua. Esto incrementa el riesgo de contaminación microbiológica, teniendo en cuenta que no se puede estimar la cantidad de cloro que se debe adicionar para mantener el residual libre de desinfectante en la red de distribución, además, no se puede identificar si se eliminó el patógeno microbiano en las unidades de potabilización y distribución (Wright et al., 2014).

Limitaciones del estudio

Pese a las limitantes, los resultados de esta investigación son de gran importancia en el análisis del estado general de la infraestructura de los acueductos rurales del departamento de Boyacá. Adicionalmente, la investigación presenta una aproximación real al estado operativo de estos acueductos y, asocia la deficiencia en procesos rutinarios como el control de las unidades de potabilización a la imposibilidad de suministrar agua segura en Boyacá.

Dentro de las principales limitantes del estudio se encuentran que la recolección de información estuvo sujeta al criterio técnico de los ingenieros sanitarios adscritos a la autoridad sanitaria y la valoración de los diferentes ítems puede variar dependiendo del profesional. Esto asociado a la naturaleza del instrumento utilizado en la inspección sanitaria de recolección de información *in situ*, no hace posible obtener información directa de aspectos relevantes del sistema de abastecimiento como son la existencia de protección en la fuente captación y el tipo y cantidad de sustancias químicas empleadas en las unidades de potabilización. Así mismo, se desconocen las partes o fases del tratamiento que operan con regularidad dependiendo del tipo de planta de potabilización y detalles de la instrumentación de la red de distribución.

Otro aspecto a considerar es la baja proporción de acueductos con infraestructura de potabilización, esto genera poca variación en las variables independientes considerando que la disponibilidad de la infraestructura de interés no superaba entre 10% y 30%. Si bien la teoría asocia las variables empleadas en este estudio como determinantes para proveer agua segura, de los 11 regresores empleados en el análisis multivariado únicamente tres fueron significativos. Pese a esto, las pruebas de robustez realizadas al modelo de regresión no evidenciaron problemas de multicolinealidad entre las variables independientes. Futuros estudios deberán incluir una muestra más amplia de acueductos para así corroborar los hallazgos de este estudio.

5. Conclusión

Se analizó la infraestructura del sistema de abastecimiento de agua para consumo humano de 288 acueductos rurales del departamento de Boyacá, Colombia. Alrededor de 60% de los abastos presentan contaminación microbiológica, coliformes totales y *E. coli*, cerca de 40% superan los límites máximos permisibles de turbiedad y más de 70% no cumplen con el rango de concentración de residual libre de desinfectante. Se valoró el nivel de riesgo de 13 variables infraestructurales que apoyan la operación diaria del sistema de abastecimiento, 11 reportaron riesgo alto o muy alto, considerando la ausencia de estas en el acueducto y su gravedad en la protección de la salud de los individuos que se abastecen de estos suministros.

El abastecimiento de agua no segura en las áreas rurales de Boyacá se asocia con la falta de infraestructura de potabilización y el control de la eficiencia de las unidades de potabilización como actividad rutinaria operativa. Estas variables se relacionan con la contaminación microbiológica existente en el agua de consumo de estas comunidades. Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario gestionar integral y particularmente cada acueducto a partir de metodologías que garanticen la seguridad del agua abastecida en estas comunidades con miras al cumplimiento de las metas de protección de la salud. Futuros estudios podrían focalizarse en determinar cómo los factores socioeconómicos y demográficos de Boyacá, además de la calidad de agua servida, se asocian con los índices de morbilidad de enfermedades infecciosas ocasionadas por el consumo de agua no potable

Referencias

- Amézquita-Marroquín, C. P.; Pérez-Vidal, A.; Torres-Lozada, P. (2014). Evaluación del riesgo en sistemas de distribución de agua potable en el marco de un plan de seguridad del agua. *Revista EIA*, 11 (21) enero-julio, pp.157–169.
- Carrasco, W. (2016). Estado del arte del agua y saneamiento rural en Colombia. *Revista de Ingeniería*, 44, pp. 46-53. [Online] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.16924%2Fria.v0i44.923>. [Consultado 20 de septiembre de 2017].
- Colombia. Ministerio de Salud y Protección Social. Resolución 082 de 2009. Por medio de la cual se adoptan unos formularios para la práctica de visitas de inspección sanitaria a los sistemas de suministro de agua para consumo humano. (2009). [Online] Disponible en: https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/Resolución_0082_de_2009.pdf. [Consultado 08 de diciembre de 2018].
- Colombia. Ministerio de Salud y Protección Social. Resolución 2115 de 2007. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. (2007) [Online] Disponible en: https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/Resolución_2115_de_2007.pdf. [Consultado 18 de noviembre de 2018].
- Contreras, M. Y.; Acevedo-González, K. (2013). El acceso al agua para consumo humano en Colombia. *Revista Economía Institucional*, 15 (29) julio-diciembre, pp.125-148.
- Gobernación de Boyacá, 2016. Análisis de situación en salud con el modelo de los determinantes sociales de la salud, Boyacá 2016. [Online] Disponible en: https://www.boyaca.gov.co/SecSalud/images/Documentos/asis2016/asis_departamental_2016.pdf. [Consultado 09 de septiembre de 2019].
- Khan, K.; Lu, Y.; Saeed, M. A.; Bilal, H.; Sher, H.; Khan, H.; Ali, J.; Wang, P.; Uwizeyimana, H.; Baninla, Y.; Li, Q.; Liu Z.; Nawab, J.; Zhou, Y.; Su, C.; Liang, R. (2017). Prevalent fecal contamination in drinking water resources and potential health risks in Swat, Pakistan. *Journal of Environmental Sciences*, 72, pp. 1-12. [Online] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.12.008>. [Consultado 18 de septiembre de 2017].
- Klug, T.; Cronk, R.; Shields, K. F.; Bartram, J. (2018). A categorization of water system breakdowns: Evidence from Liberia, Nigeria, Tanzania, and Uganda. *Science of the Total Envi-*

- ronment, 619-620, pp. 1126-1132. [Online] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.183>. [Consultado 10 de octubre de 2017].
- Kostyla, C.; Bain, R.; Cronk, R.; Bartram, J. (2015). Seasonal variation of fecal contamination in drinking water sources in developing countries: A systematic review. *Science of the Total Environment*, 514, pp. 333-343. [Online] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.018>. [Consultado 10 de febrero de 2017].
- Martínez, A. N.; Defelippe, O. E. (2013). Derecho humano al agua y control de convencionalidad. *Derecho PUCP*, 70, pp. 105-120. [Online] Disponible en <revistas.pucp.edu.pe/index.php/derechopucp/article/view/6746> [Consultado 25 de abril de 2018].
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2016). Informe Nacional de la Calidad del Agua para Consumo Humano INCA 2016, Colombia, 2016, [Online] Disponible en: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SNA/ssa-inca-2016.pdf> [Consultado 16 de septiembre de 2017]
- Mora, D. (2006). Evolución de las guías microbiológicas de la OMS para evaluar la calidad del agua para consumo humano: 1984-2004. *Revista Costarricense de Salud Pública*, 15, pp. 44-54.
- Murillo-Chávarro, J. (2014). The right to water in the case-law of the inter-american court of human rights. *ACDI - Anuario Colombiano de Derecho Internacional*, 7, pp. 39-68. [Online] Disponible en: <https://doi.org/dx.doi.org/10.12804/acdi.7.2014.02>. [Consultado 16 de noviembre de 2017].
- OMS y UNICEF. Organización Mundial de la Salud y Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia. (2017). Progresos en materia de agua potable, saneamiento e higiene: informe de actualización de 2017 y línea de base de los ODS. [Online] Disponible en: <http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/260291/9789243512891-spa.pdf;jsessionid=209F1912BB6663943465DE778A056489?sequence=1>. [Consultado 18 de noviembre de 2018].
- OMS. Organización Mundial de la Salud. (2009). Manual para el desarrollo de planes de seguridad del agua. *International Water Association*. [Online] Disponible en: http://whqlibdoc.who.int/publications/2009/9789243562636_spa.pdf. [Consultado 22 de agosto de 2019].
- OMS. Organización Mundial de la Salud. (2017). Guías para la calidad del agua potable cuarta edición. [Online] Disponible en: <http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/254637/9789241549950-eng.pdf;jsessionid=3E38523F8DFA94817F3F8F435036C519?sequence=1>. [Consultado 10 de mayo de 2019].
- ONU. Organización de las Naciones Unidas. (2015). IV foro mundial del agua (35). [Online] Disponible en: <HTTP://WWW.IISD.CA/YMB/WORLDWATER4/>. [Consultado 07 de febrero de 2018].
- Pérez-Vidal, A.; Amézquita-Marroquín, C. P.; Torres-Lozada, P. (2012). Identificación y priorización de peligros como herramientas de la gestión del riesgo en sistemas de distribución de agua potable. *Ingeniería y Universidad*, 16(2) julio-diciembre, pp. 449-469.
- Setty, K. E.; Kayser, G. L.; Bowling, M.; Enault, J.; Loret, J.F.; Serra, C. P.; Martin-Alonso, J.; Pla-Mateu, A.; Bartram, J. (2017). Water quality, compliance, and health outcomes among utilities implementing Water Safety Plans in France and Spain. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 220, pp. 513-530. [Online] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheh.2017.02.004>. [Consultado 12 de marzo de 2018].
- Sutorius, M.; Rodríguez, S. (2015). La fundamentalidad del derecho al agua en Colombia. *Derecho del Estado*, 35(9), pp. 243-265. [Online] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.18601/01229893.n35.09>. [Consultado 16 de febrero de 2018].
- Urquhart-Cademartori, S.; Mesquita-Leutchuk de Cademartori, D. (2014). El agua como un derecho fundamental y el derecho al agua potable como un derecho humano fundamental. *Jurídicas*, 1(11), 117-137.
- Wright, J.; Liu, J.; Bain, R.; Pérez - Vidal, A.; Crocker, J.; Bartram, J.; Gundry, S. (2014). Water quality laboratories in Colombia: A GIS-based study of urban and rural accessibility. *Science of the Total Environment*, 485-486 julio, 643-652. [Online] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.127>. [Consultado 10 de mayo de 2018].