

Mapa de riesgos para la calidad del agua en sistemas de abastecimiento municipales. Un caso colombiano

Risk map for the water quality of municipal supply systems.
A Colombian case

Blanca R. Arias*, Diana M. Bejarano** y Carlos A. Zafra***

RESUMEN

Satisfacer las exigencias de calidad del agua para consumo humano es uno de los principales retos a los que se enfrentan las empresas prestadoras del servicio de acueducto; debido a la degradación de las fuentes de abastecimiento, al deterioro de las hoyas hidrográficas, y a cambios climáticos que ponen en riesgo los componentes del sistema. El objetivo de este artículo es identificar, analizar y elaborar el mapa de riesgos para la calidad del agua de un sistema de abastecimiento municipal colombiano categorizado con un nivel de complejidad bajo. Se realizó una descripción, análisis y valoración cualitativa de las amenazas y vulnerabilidades identificadas. La valoración del riesgo se realizó a través de dos criterios: (i) estimación de la probabilidad de ocurrencia, e (ii) impacto por la materialización del riesgo. Los resultados muestran que las fuentes de abastecimiento “La Moya” y “Bellavista” presentan riesgos dominantes de tipo antrópico y natural, respectivamente. Adicionalmente, los resultados sugieren que las condiciones de calidad del agua cruda son aptas para consumo humano; no obstante, se requiere garantizar el tratamiento de desinfección en la potabilizadora debido a la presencia de coliformes. Consecuentemente, el índice de riesgo de calidad del agua cruda muestra una clasificación de “alto riesgo”, debido principalmente a la presencia de coliformes y *E. coli*.

Fecha recibido: abril 11 de 2014

Fecha aceptado: mayo 26 de 2014

* Especialización en Agua y Saneamiento Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Manuela Beltrán, Bogotá D.C., Colombia. E-mail: brarias@gmail.com

** Especialización en Agua y Saneamiento Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Manuela Beltrán, Bogotá D.C., Colombia. E-mail: dianamariabejarano@yahoo.es

*** Grupo de Investigación en Sistemas y Recursos Ambientales Sostenibles-SYRAS, Universidad Manuela Beltrán, Bogotá D.C., Colombia. Grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental GIIAUD, Universidad Distrital F.J.C., Bogotá D.C., Colombia. E-mail: czafra@udistrital.edu.co



Palabras clave: Calidad del agua, evaluación del riesgo, potabilización del agua, sistemas de abastecimiento de agua.

ABSTRACT

Meeting the requirements of water quality for human consumption is one of the main challenges faced by companies supplying aqueducts; due to the degradation of the supply sources, the deterioration of the watershed and climate changes threaten the system components. The objective of this paper is to identify, analyze and develop the risk map for the water quality of a Colombian municipal water supply system categorized with a low complexity level. It was realized as a description, analysis and qualitative assessment of the threats and vulnerabilities identified. The risk assessment was carried out through two criteria: (i) estimation of the occurrence probability, and (ii) impact by the risk materialization. The results show that the supply sources “La Moya” and “Bellavista” present dominant risks of the anthropogenic and natural type, respectively. Additionally, the results suggest that the conditions of water quality are suitable for human consumption; however, it is required to ensure the presence of disinfection treatment in the water treatment plant due to the presence of coliforms. Consequently, the water quality risk index shows a classification of “high risk”, mainly due to the presence of coliforms and *E. coli*.

Keywords: Water quality, risk assessment, water purification, water supply sy

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua de consumo humano debido a la exposición con contaminantes de tipo biológico y químico es una de las mayores causas de morbilidad y mortalidad en una población [1]. Las evidencias demostraron que la intrusión de contaminantes externos dentro de los sistemas de abastecimiento puede ser más frecuente y de una mayor importancia a lo sugerido previamente por los organismos de control del recurso hídrico [1]. En este sentido, el problema de intrusión de contaminantes externos fue más grave en países en vías de desarrollo debido a que las fuentes de contaminación se entrelazaron con los sistemas de abastecimiento de agua, y la intermitencia en el suministro fue más frecuente [2], [3].

A partir de lo anterior, se ha reportado un problema significativo con respecto al suministro intermitente producto de la materialización de los riesgos en los sistemas de abastecimiento, el cual ha sido frecuentemente ignorado por las empresas prestadoras del servicio en pequeñas

comunidades; éste fue el alto nivel de contaminación asociado con el agua en aducciones, conducciones o redes de distribución con una baja o nula presión producto de emergencias en el sistema. Esta problemática conduce a mayores riesgos de salud pública por contaminación con patógenos, debido a la intrusión de cuerpos de aguas circundantes a través de las juntas y grietas de las tuberías deterioradas [3]-[5].

Adicionalmente, a nivel nacional son escasos los reportes con respecto a la elaboración de mapas de riesgo de la calidad del agua en sistemas de abastecimiento con un nivel socio-económico bajo. La poca información disponible está dispersa y, con frecuencia, no es compartida entre las distintas instituciones, por lo que la duplicación de esfuerzos es común. Al respecto, gran parte de las experiencias exitosas se hacen difícilmente replicables por la falta de registro sistemático y evaluación técnica.

Por lo tanto, satisfacer las exigencias de calidad de agua para consumo humano es uno de los principales retos a los que se enfrentan las em-

presas prestadoras del servicio de acueducto en pequeñas comunidades [6]. Lo anterior, probablemente debido a la creciente degradación de las fuentes de abastecimiento, al deterioro de las hoyas hidrográficas (p.ej. del suelo y la vegetación), y a los cambios climáticos que traen consigo alteraciones en la distribución temporal y espacial de la precipitación y eventos extremos que pueden poner en riesgo los componentes del sistema de abastecimiento de agua.

Desde una perspectiva de calidad, el agua de consumo humano fue definida como aquella adecuada para la ingesta y todo uso doméstico habitual, incluida la higiene personal [7]. No obstante, la calidad del agua no es suficiente para asegurar beneficios sobre la salud pública; además es necesario que se satisfagan tres criterios: (i) cantidad, (ii) continuidad y (iii) costo razonable [8]. Al respecto, este último criterio fue de gran importancia en los sistemas de abastecimiento debido a que los elevados costos en el suministro de agua estuvieron principalmente asociados al consumo eléctrico en las plantas de potabilización [9].

La importancia del agua y del ambiente sano, y su incidencia sobre la salud y el desarrollo de la población están plenamente reconocidos por la Constitución Política de Colombia. De esta manera, se estableció que todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano y se afirmó que la vida y la salud son derechos fundamentales [10].

A partir de lo anterior, los mapas de riesgos de calidad del agua se constituyen en el instrumento que define las acciones de inspección, vigilancia y control del riesgo asociado a las condiciones de calidad de las cuencas abastecedoras de los sistemas de agua para consumo humano, y las características físicas, químicas y microbiológicas del agua de las fuentes superficiales o subterráneas de una determinada región; que puedan generar riesgos graves a la salud humana si no son adecuadamente tratadas, independientemente si provienen de contaminación por eventos naturales o antrópicos [11].

El objetivo principal del artículo es identificar, analizar y elaborar el mapa para los riesgos en la calidad del agua de un sistema de abastecimiento municipal colombiano categorizado con un nivel socioeconómico o de complejidad bajo: Gachalá (Cundinamarca). Lo anterior, a partir de la categorización establecida por el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico de Colombia (RAS-2000) [12]. Finalmente, es importante mencionar, que por reserva de la empresa prestadora del servicio de potabilización se excluyó del análisis de riesgo la información correspondiente al agua tratada.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La Figura 1 presenta el diagrama de flujo para la metodología aplicada durante el desarrollo del presente estudio.

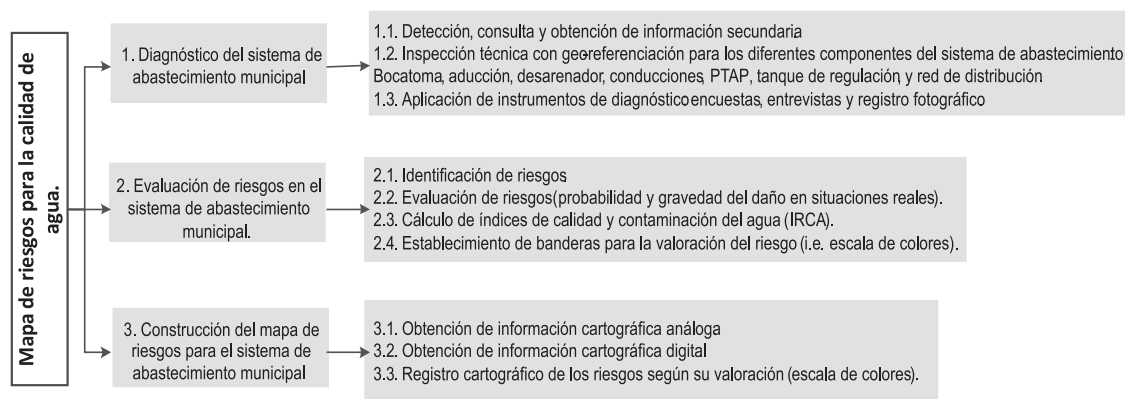


Figura 1. Diagrama de flujo para la metodología aplicada en la construcción del mapa de riesgos.



Figura 2. Localización del municipio de Gachalá (Colombia).

2.1 Descripción del área de estudio

El municipio de Gachalá se ubica al sur-oriental del departamento de Cundinamarca, y geográficamente está situado dentro de las coordenadas $04^{\circ} 41' 57''$ N y $73^{\circ} 31' 22''$ E. El área de estudio posee en promedio una elevación de 1712 m.s.n.m., una temperatura de 19°C y una extensión de 436 km^2 (Fig. 2).

Finalmente, el municipio contó con una población urbana de 1476 habitantes para el año 2012. Esta población es la servida por el sistema de abastecimiento en investigación.

2.2 Sistema de recolección de información

Se realizó una inspección técnico-sanitaria con geo-referenciación para los diferentes componentes del sistema de abastecimiento: (i) bocatoma Quebrada La Moya, (ii) bocatoma Quebrada Bellavista, (iii) aducciones, (iv) conducciones, (v) planta potabilizadora (PTAP), (vi) tanques de regulación, y (vii) red de distribución. Además, se evaluó y registró la situación real de cada uno

de los componentes mediante datos cualitativos; lo anterior, para identificar los riesgos del sistema de abastecimiento municipal. Al respecto, se utilizaron los formularios de inspección sanitaria establecidos por la legislación colombiana: Resolución 082 de 2009 [13].

Por otra parte, se desarrolló y utilizó un formato de buenas prácticas sanitarias para el registro de la información en la planta de potabilización de agua (PTAP); el cual incluyó los siguientes criterios de evaluación: (i) estado y pertinencia de las instalaciones, (ii) instrumentación en la PTAP, (iii) seguridad industrial y salud ocupacional, (iv) gestión de la información y comunicaciones, y (v) laboratorio de control de procesos y calidad del agua. Adicionalmente, se desarrolló y utilizó un formato para el registro de la información en los demás componentes del sistema de abastecimiento; el cual incluyó los siguientes criterios de evaluación: (i) estado operativo, (ii) programa de mantenimiento, y (iii) control de calidad del agua. Finalmente, se realizaron entrevistas informales a los funcionarios administrativos de la empresa de acueducto y a los técnicos de tratamiento de la PTAP.

2.3 Análisis de calidad del agua cruda (índices)

Para el análisis de la calidad del agua en las fuentes superficiales de abastecimiento: Quebradas La Moya y Bellavista, se acudió a los análisis fisicoquímicos y microbiológicos realizados por la Corporación Autónoma Regional del Guavio (CORPOGUAVIO) y la oficina de servicios públicos municipales. A partir de la información anterior, se evaluaron las condiciones actuales del sistema de abastecimiento con respecto al riesgo en la calidad del agua cruda para consumo humano.

Por lo tanto, a partir del Decreto 1575 de 2007 [14] y la Resolución No. 2115 de 2007 [15] se determinó el índice de riesgo de calidad del agua cruda para consumo humano (IRCA). Al respecto, en el cálculo del índice se asignó el puntaje de riesgo presentado en la Tabla 1; lo anterior, a partir de las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua. Adicionalmente, se determinaron los siguientes índices de calidad y contaminación del agua [16], [17]: (i) índice de contaminación por mineralización (ICOMI), (ii) índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO), (iii) índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS), (iv) índice de contaminación trófico (ICOTRO), (v) índice biológico (IB), e (vi) índice de calidad del agua (ICA).

Tabla 1. Puntaje de riesgo para la evaluación de calidad del agua [14].

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Color aparente	6	Dureza total	1
Turbiedad	15	Sulfatos	1
pH	1,5	Hierro total	1,5
Cloro residual libre	15	Cloruros	1
Alcalinidad total	1	Nitratos	1
Calcio	1	Nitritos	3
Fosfatos	1	Aluminio (Al3+)	3
Manganeso	1	Fluoruros	1
Molibdeno	1	COT	3
Magnesio	1	Coliformes totales	15
Zinc	1	Escherichia Coli	25
Puntaje total		100	

2.4 Identificación y evaluación de riesgos para la calidad del agua (componentes del sistema de abastecimiento)

Identificación del riesgo

La investigación se basó fundamentalmente en la metodología propuesta por la Organización Mundial de la Salud [18] y las modificaciones realizadas por Bartram et al. [19]. En este sentido, se identificaron cinco criterios para los eventos peligrosos (Tabla II), y éstos fueron clasificados en dos categorías: (i) naturales (criterio: ambiental), y (ii) antrópicos (criterio: vertimiento líquido y sólido, asentamientos, y sanitario). Posteriormente, se seleccionaron los eventos pertinentes para cada uno de los componentes identificados en el sistema de abastecimiento: (i) bocatoma, (ii) aducción, (iii) desarenador, (iv) conducciones, (v) PTAP, (vi) tanque de regulación, y (vii) red de distribución.

Tabla 2. Criterios para la identificación y evaluación del riesgo [14], [18] – [21]

Criterio	Descripción
Vertimiento líquido	(i) Domésticos, agrícolas, pecuarios, e (ii) industriales.
Vertimiento sólido	(i) Mineros, (ii) agrícolas, (iii) pecuarios, (iv) industriales, y (v) tóxicos y peligrosos.
Asentamientos	(i) Conflictos por uso del suelo, (ii) desconocimiento de servidumbres, (iii) sabotaje, y (iv) procesos erosivos.
Ambiental	(i) Cantidad y (ii) continuidad de la fuente de abastecimiento, y (iii) riesgos relacionados con eventos naturales (remoción en masa, sismos, caudales máximos y sequías).
Sanitario	Operacional y funcional: (i) grado de tratabilidad y potabilización (cualitativo), (ii) estado físico de los componentes del sistema, y (iii) calidad del agua mediante el índice IRCA.

Valoración del riesgo

El riesgo se calculó como el producto de la amenaza (i.e., probabilidad de ocurrencia) y la vulnerabilidad (i.e., impacto por la materialización del riesgo), y fue expresado en porcentaje. Al respecto, se procedió a asignar valores de probabilidad e impacto de los eventos peligrosos en una escala de 0 a 100% [14], [18] - [21]. Es importante mencionar, que cuando fue posible, la probabilidad e impacto se basaron en datos de campo e información estadística, tales como la probabilidad de ocurrencia de sismos y el impacto de la contaminación microbiana en las fuentes de agua cruda; si estos criterios no eran aplicables, los valores asignados se basaron en criterios propios y sugerencias del personal de la empresa prestadora del servicio público.

Posteriormente, el riesgo fue clasificado en tres categorías según la siguiente escala: (i) riesgo bajo (0-30%), (ii) riesgo medio (31-65%), y (iii) riesgo alto (66-100%). Finalmente, la anterior evaluación cualitativa fue incorporada en una matriz de colores (i.e., banderas) con el objeto de visualizar la magnitud de los riesgos en el producto cartográfico correspondiente: (i) alto, color rojo; (ii) medio, color amarillo; y (iii) bajo, color verde.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis de riesgos para la calidad del agua (componentes del sistema de abastecimiento)

Riesgos de origen natural

A continuación se presenta el análisis realizado a los siguientes componentes del sistema de abastecimiento de las quebradas La Moya y Bellavista: (i) bocatoma, (ii) aducción, (iii) conducción, (iv) desarenador, (v) planta de tratamiento de agua potable-PTAP, (vi) tanque de regulación, y (vii) red de distribución.

(i) *Movimientos en masa - pendiente*: La totalidad del municipio de Gachalá se encuentra localizado en una zona catalogada como de alto riesgo sísmico [22]. Por lo tanto, los deslizamientos de tierra existentes podrían ser intensificados por un

sismo y probablemente afectarían la bocatoma, la aducción, el desarenador y las conducciones localizadas en las hoyas hidrográficas de las quebradas La Moya y Bellavista (ver Fig. 3). Por otro lado, la inspección técnica de los suelos aledaños permitió observar inestabilidad, especialmente, en el perímetro urbano de la municipalidad. De esta manera, la PTAP, el tanque de regulación y la red de distribución probablemente estarían afectados por movimientos sísmicos (i.e., materialización del riesgo) (Tabla 3).

Por otro lado, la pendiente promedio de las hoyas hidrográficas en investigación fue del 18,3%. Sin embargo, existen terrenos a lo largo del sistema de abastecimiento que pueden alcanzar pendientes de hasta el 70% y en las riveras de las fuentes de abastecimiento hasta del 300% (Fig. 3). A partir de lo anterior, se presentan sectores de alta pendiente en la bocatoma, aducción y en tramos de la conducción; igualmente, en los componentes cercanos al perímetro urbano de la localidad como la PTAP, el tanque de regulación y en algunos tramos de la red de distribución. Al respecto, se ha reportado que el tipo de material y la topografía (i.e., el ángulo de la pendiente) fueron los factores más importantes que originaron los deslizamientos, cuando otros factores fueron relativamente uniformes [23].

Adicionalmente, se evaluaron (ii) *riesgos hidrológicos por caudales máximos* y (iii) *sequía* en las dos fuentes superficiales de abastecimiento. Al respecto, los resultados evidenciaron que la que-



Figura 3. Deslizamiento de tierra en la fuente de abastecimiento La Moya.

Tabla 3. Riesgos naturales y antrópicos identificados en el sistema de abastecimiento de agua.

FUENTE QUEBRADA LA MOYA			
Riesgo	Componente del sistema	Valoración (%)	Bandera
Natural			
Movimiento en masa - pendiente	Bocatoma, aducción, conducción, PTAP, tanque de regulación y red de distribución	Alto (66-99)	Rojo
Hidrológico (caudales máximos)	PTAP, tanque de regulación y red de distribución	Bajo (0-30)	Verde
Sequias	Fuente superficial de abastecimiento	Medio (31-65)	Amarillo
Antrópico			
Vertimiento de residuos líquidos y sólidos	Fuente superficial de abastecimiento	Alto (66-99)	Rojo
Conflictos por uso de suelo	Bocatoma, aducción y conducciones	Alto (66-99)	Rojo
Desconocimiento de servidumbres	Bocatoma y aducción	Alto (66-99)	Rojo
Sabotaje	Bocatoma, aducción, conducción, PTAP, tanque de regulación y red de distribución	Medio (31-65)	Amarillo
Procesos erosivos	Fuente superficial de abastecimiento	Alto (66-99)	Rojo
Operacional y funcional	PTAP y tanque de regulación	Alto (66-99)	Rojo
Contaminación de muestras de control del agua potable	Puntos urbanos de muestreo	Alto (66-99)	Rojo
FUENTE QUEBRADA BELLAVISTA			
Riesgo	Componente del sistema	Valoración (%)	Bandera
Natural			
Movimiento en masa - pendiente	Bocatoma, aducción, conducción, PTAP, tanque de regulación y red de distribución	Alto (66-99)	Rojo
Hidrológico (caudales máximos)	PTAP y red de distribución	Bajo (0-30)	Verde
Sequias	Fuente superficial de abastecimiento	Medio (31-65)	Amarillo
Antrópico			
Vertimiento de residuos líquidos y sólidos	Fuente superficial de abastecimiento	Bajo (0-30)	Verde
Conflictos por uso de suelo	Bocatoma, aducción y conducciones	Alto (66-99)	Rojo
Desconocimiento de servidumbres	Bocatoma y aducción	Alto (66-99)	Rojo
Sabotaje	Bocatoma, aducción, conducción, PTAP, tanque de regulación y red de distribución	Medio (31-65)	Amarillo
Procesos erosivos	Fuente superficial de abastecimiento	Alto (66-99)	Rojo
Operacional y funcional	PTAP y tanque de regulación	Alto (66-99)	Rojo
Contaminación de muestras de control del agua potable	Puntos urbanos de muestreo	Alto (66-99)	Rojo

brada Bellavista estuvo alimentada por pequeños tributarios perennes que permitieron derivar un caudal promedio anual de 10 L/s. Por otra parte, la quebrada La Moya permitió derivar un caudal promedio anual de 5 L/s.

Es importante resaltar, que los reportes de la autoridad ambiental (i.e., Corpoguavio) indicaron que en años anteriores se han presentado perio-

dos de sequía, los cuales han forzado a racionar el recurso durante las contingencias. Lo anterior, teniendo en cuenta que no existieron fuentes superficiales alternas de abastecimiento para la localidad en investigación [24]. Finalmente, la Tabla III presenta los resultados definitivos de la evaluación de riesgos naturales identificados en el sistema de abastecimiento de la municipalidad en estudio.

Riesgos de origen antrópico

A continuación se presenta la evaluación realizada a los siguientes componentes del sistema de abastecimiento de las quebradas La Moya y Bellavista: (i) bocatoma, (ii) aducción, (iii) conducción, (iv) desarenador, (v) planta de tratamiento de agua potable-PTAP, (vi) tanque de regulación y (vii) red de distribución.

Bocatoma, aducción y desarenador. Inicialmente, es importante mencionar que la inspección técnica permitió definir los siguientes componentes como de alta vulnerabilidad en las dos fuentes de abastecimiento de agua: bocatoma, aducción y desarenador; lo anterior, asociado con riesgos de origen antrópico como por ejemplo: (i) sabotaje (i.e., ausencia de vigilancia y control), (ii) colapso por fallas estructurales (i.e., falta de mantenimiento), y (iii) período de diseño (i.e., vida útil excesiva) (ver Fig. 4 y 5).



Figura 4. Bocatoma fuente de abastecimiento Bellavista.



Figura 5. Aducción fuente de abastecimiento La Moya.

A continuación se exponen los principales riesgos de origen antrópico detectados en la bocatoma, aducción y conducción del sistema de abastecimiento de agua municipal.

(i) *Riesgo de contaminación por aguas residuales domésticas:* La inspección técnica de campo permitió evidenciar contaminación por aguas servidas. Al respecto, se detectaron pequeños usuarios rurales que realizaron descargas sin tratamiento sobre las fuentes superficiales de abastecimiento.

(ii) *Riesgo por conflictos de uso del suelo:* La evaluación del sistema evidenció un uso inadecuado del suelo en las zonas cercanas a la bocatoma, aducción y conducciones. Por ejemplo, se detectaron actividades agrícolas y pecuarias en los terrenos aledaños a los sistemas en evaluación, que probablemente generaron contaminación de tipo puntual o difusa (p.ej. riesgo de intrusión patógena en el sistema).

Adicionalmente, se evaluaron los siguientes riesgos: (iii) *desconocimiento de servidumbres* (i.e., principalmente en la aducción y conducciones), (iv) *sabotaje* (i.e., ausencia de vigilancia y control), y (v) *procesos erosivos de origen antrópico*.

Planta de potabilización-PTAP y tanque de regulación. A continuación se exponen los principales riesgos de origen antrópico detectados en la planta potabilizadora.

(i) *Riesgo operacional y funcional:* La visita a las instalaciones de la PTAP evidenció la falta de personal técnico en potabilización de aguas; lo anterior, para una correcta operación de cada una de las unidades de tratamiento. Al respecto, se implementó un formato de buenas prácticas sanitarias con el objeto de realizar una evaluación cualitativa detallada de la instalación de potabilización (Tabla IV).

Red de distribución de agua potable. (i) *Riesgo por ruptura de tuberías:* La inspección técnica evidenció que las actividades de excavación urbana para la instalación de redes de alcantarillado y gas natural representan un riesgo potencial para la red de distribución de agua potable en el área urbana. Igualmente, las actividades de mantenimiento y construcción de vías representan un riesgo potencial, principalmente durante

las operaciones de compactación de las capas inferiores del pavimento (i.e., por cargas excesivas sobre las tuberías); lo anterior, cuando las tuberías no están localizadas a las profundidades indicadas según el reglamento de agua potable y saneamiento básico (RAS-2000) [12]. Finalmente, existen tramos expuestos a la intemperie que pueden generar un deterioro de las tuberías plásticas (PVC). En este sentido, el tipo de material de la red de distribución en estos tramos la hace vulnerable ante los efectos de los rayos solares; las cuales se vitrifican y, por lo tanto, se quiebran rápidamente.

A partir de lo anterior, existirá la probabilidad de generar interrupciones en la prestación del servicio de acueducto en el casco urbano de la municipalidad por la materialización del riesgo y, por lo tanto, se conducirá a mayores riesgos de salud pública por contaminación con patógenos; debido a la intrusión de cuerpos de aguas circundantes a través de las juntas y grietas de las tuberías por una baja o nula presión en el sistema.

Puntos urbanos de muestreo para el control de la calidad del agua. (i) *Riesgo por contaminación durante la toma de muestras de agua potable:* La inadecuada manipulación durante la toma de muestras de control debido a la ausencia de un protocolo, y los prolongados tiempos de entrega de los análisis de laboratorio, representan un riesgo para el control de la calidad del agua en la municipalidad. Adicionalmente, es importante resaltar, que en los puntos urbanos de control se observó contaminación por residuos sólidos comunitarios; sugiriendo posibles alteraciones en los análisis fisicoquímicos y microbiológicos para el control de la calidad del agua (ver Fig. 6).

La Tabla 3. presenta los resultados definitivos de la evaluación de los riesgos antrópicos identificados en el sistema de abastecimiento de la municipalidad en investigación.

Finalmente, se construyó el mapa de riesgos para la calidad del agua de la municipalidad en estudio: fuentes de abastecimiento (i) La Moya y (ii) Bellavista; lo anterior, a partir de los riesgos de origen natural y antrópico identificados, y de la valoración cualitativa con banderas (i.e., escala colores) implementada para la presente investigación (ver Fig. 7 y 8).



Figura 6. Puntos urbanos de control de la calidad del agua.

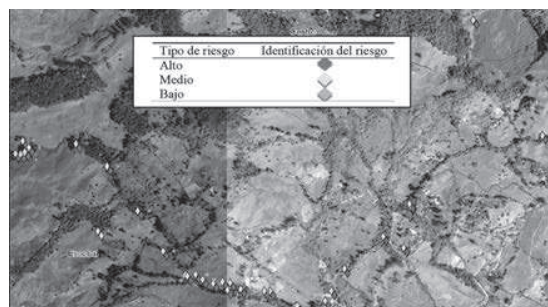


Figura 7. Mapa de riesgos para la fuente hídrica La Moya.

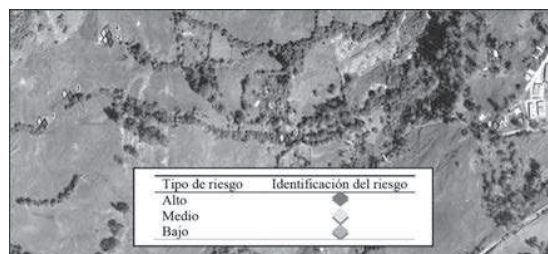


Figura 8. Mapa de riesgos para la fuente hídrica Bellavista

Evaluación del riesgo en la calidad del agua cruda (índices)

Análisis del agua cruda

En cuanto a los análisis de agua cruda realizados por la Corporación Autónoma Regional del Guavio (CORPOGUAVIO) en el año 2011, las fuentes hídricas La Moya y Bellavista en la municipalidad de investigación evidencian la presencia de bajas concentraciones de coliformes totales y fecales; lo anterior, probablemente debido a que son corrientes superficiales que circulan por la

- Mapa de riesgos para la calidad del agua en sistemas de abastecimiento municipales. Un caso colombiano •

Tabla 4. Formato de evaluación de buenas prácticas sanitarias para la PTAP.

	¿Cumple las BPS?		
	SI	Pa	NO
Estado y pertinencia de las instalaciones			
1. Vía(s) de acceso está(n) en buen estado.		x	
2. Alrededores de las instalaciones de la planta libres de obstáculos.		x	
3. Planta tiene cerramiento.		x	
4. Aseo interior eficiente.		x	
5. Instalaciones de almacenamiento adecuadas.		x	
6. Zonas para el descanso y consumo de alimentos.			x
7. Servicios sanitarios en cantidad suficiente.			x
8. Estado físico de las edificaciones.			x
Instrumentación de la PTAP			
1. Medición de caudal de ingreso.			x
2. Medición de caudal de salida.			x
3. Medición o estimación de caudal para el agua de lavado de filtros y sedimentadores.			x
4. Medición de niveles en los tanques.	x		
5. Control para determinar el momento del lavado de filtros.			x
Seguridad industrial y salud ocupacional			
1. Manual o protocolo de higiene y seguridad industrial.			x
2. Programa de salud ocupacional.			x
3. Señalización y demarcación de las áreas de trabajo.			x
4. Operarios visten uniformes dotados para el trabajo.			x
5. Elementos de protección y seguridad.			x
6. Elementos de control local de emergencias.			x
Sistema de registro y archivo de la información			
1. Reportes de autocontrol disponibles para supervisión a cargo de la autoridad sanitaria.			x
2. Manuales de operación y mantenimiento.			x
3. Manual de funciones.			x
4. Supervisión y asesoría.			x
5. Sistema de comunicaciones.			x
Laboratorio(s) para control de procesos y calidad del agua para consumo humano distribuida			
1. Brinda(n) las condiciones de localización, espacio y distribución que deben cumplirse en estas instalaciones.			x
2. Equipos de seguridad propios de estas instalaciones.			x
3. Realizan todos los ensayos físicos, químicos y microbiológicos de control en la red de distribución, de acuerdo a las condiciones establecidas en el Capítulo V de la Resolución 2115 de 2007 o la norma que la modifique, adicione o sustituya.		x	
4. Efectúan periódicamente la caracterización del agua cruda y su tratabilidad.		x	
5. Hacen periódicamente el control de los procesos que llevan a cabo: floculación, sedimentación, filtración, desinfección y ajuste final de pH.			x
6. Llevan reportes de control al día.			x
7. Sistema de gestión para el aseguramiento de la calidad de los resultados físicos, químicos y microbiológicos del agua para consumo humano.			x
8. Instalaciones siguen técnicas de aseo y asepsia para los análisis.			x

Nota. *: parcialmente

parte más elevada de la hoya hidrográfica y, por lo tanto, son de menor acceso para la población asentada en la zona. De esta manera, se sugiere una reducción en la entrada de microorganismos a estos cuerpos de agua. Las concentraciones promedio de coliformes totales y fecales para las fuentes La Moya y Bellavista fueron 110 y 2 NMP/100 ml, y 40 y < 1,8 NMP/100 ml, respectivamente (ver Tabla 5).

Es importante mencionar, que los coliformes totales se encuentran en el suelo y en los excrementos de todos los animales y del hombre; su incremento está relacionado con la concentración de los sólidos en suspensión, principalmente, asociados con la materia orgánica que se constituye en una fuente de carbono y junto con las fuentes de fósforo y nitrógeno favorecen el crecimiento de los microorganismos [25].

Por otra parte, las concentraciones de fósforo total (< 0,1 mg/L) y nitrógeno total KJELDAHL (< 0,54 mg/L) son bajas, y se encuentran por debajo de los límites de detección de los métodos utilizados para su determinación analítica. El comportamiento de la DBO evidenció que existe una baja concentración de materia orgánica en las dos fuentes superficiales (La Moya: < 2 mg/L; Bellavista: < 2 mg/L), estos resultados sugirieron la escasa existencia de actividades con un aporte significativo de materia orgánica. Adicionalmente, la turbiedad en las fuentes de abastecimiento fue muy baja (< 4,5 mg/L); esta evidencia se complementa con los resultados promedios obtenidos para los sólidos suspendidos totales en el agua cruda: < 5,0 mg/L.

Finalmente, a partir del estudio realizado por CORPOGUAVIO se evidencia que las condiciones del agua cruda son aptas para uso doméstico mediante la implementación de sistemas de tratamiento y desinfección para los parámetros monitoreados: (i) coliformes fecales, (ii) coliformes totales, (iii) pH, (iv) nitratos, (v) nitritos, (vi) saturación de oxígeno y (vii) turbiedad; así mismo, se pudo determinar la aptitud del agua cruda para uso agrícola y pecuario. Por último, el agua cruda fue apta para uso recreativo; sin embargo, se observó que el porcentaje de saturación se encontró por debajo de los límites establecidos en la legislación colombiana [20].

Análisis preliminar para el agua potable

Como se mencionó en la introducción del manuscrito, por reserva de la empresa prestadora del servicio de potabilización se excluyó del análisis de riesgo la información correspondiente al agua tratada. Por lo tanto, a continuación se presente un análisis preliminar para el agua potable a partir de los registros obtenidos para el agua cruda. Lo anterior, con el fin de evaluar preliminarmente su aptitud para el consumo humano.

Las condiciones de calidad de agua potable se evaluaron a partir de lo establecido en el Decreto 1575 de 2007 [20] y la Resolución 2115 de 2007 [15]. Es decir, a partir de los resultados obtenidos en los muestreos realizados en las dos bocatomas que derivan el agua cruda hacia el municipio de investigación, quebradas La Moya y Bellavista (ver Tabla 5).

Las muestras correspondientes a estas fuentes de abastecimiento de agua fueron tomadas en puntos anteriores a la bocatoma, es decir, no pasaron por ninguna unidad de tratamiento. A partir de lo anterior, se observó que en términos generales las condiciones de calidad del agua son aptas para consumo humano; no obstante, se requiere un tratamiento previo (i.e., de desinfección) debido a que en los puntos monitoreados existió presencia de coliformes totales y fecales, y el recuento de mesófilos aerobios sobrepasó los límites establecidos por la resolución 2115 de 2007 [15] (ver Tabla 5). Adicionalmente, no se cumplió con los requisitos de calidad fijados para la turbiedad, ya que en los lugares de muestreo se superó el límite de 2 UNT (ver Tabla 5). Por lo tanto, los resultados sugieren un tratamiento previo convencional para reducir y cumplir con este parámetro de calidad del agua: (i) coagulación, (ii) floculación, (iii) sedimentación y (iv) filtración.

A partir de la información de caracterización del agua cruda, se procedió a determinar los siguientes índices de calidad y contaminación en las fuentes de abastecimiento de la municipalidad: (i) índice de contaminación por mineralización (ICOMI), (ii) índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO), (iii) índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS), (iv) índice de contaminación trófico (ICOTRO), (v) índice biológico (IB), (vi) índice de calidad del

Tabla 5. Calidad del agua cruda en las fuentes de abastecimiento municipales.

Parámetro	Unidad	Bocatoma La Moya	Bocatoma Bellavista	Res. 2115/07
Aluminio	mg/L Al	<0,01	<0,01	0,2
Alcalinidad-T	mg/L CaCO ₃	46	22	200
Calcio	mg/L Ca	82,2	9,79	60
Cloruros	mg/L Cl-	<4	<4	250
Coliformes-F	NMP/100ml	2	<1,8	0
Coliformes-T	NMP/100ml	110	40	0
Color	UPC	7	<5	15
Dureza total	mg/L CaCO ₃	180	48	300
Fosfatos	mg/L PO ₄	<0,10	<0,10	0,5
Hierro total	mg/L Fe	0,84	0,17	0,3
Caudal	L/s	1,611	1,769	-
Conductividad	μS/cm	371	94,8	1000
O ₂ -disuelto	mg/L O ₂	4,91	5,13	-
pH	Unidades	6,85	6,78	6,5-9,0
Temperatura	°C	16,6	17,4	-
Nitratos	mg/L N	<0,1	<0,1	10
Nitritos	mg/L N	<0,005	<0,005	0,1
Olor	-	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Mesófilos-Ae.	UFC/100ml	560000	530000	100
Sabor	-	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Saturación-O ₂	%	61,8	60,5	-
Sulfatos	mg/L SO ₄	120,5	20,3	250
Turbiedad	UNT	4,5	4	2

agua (ICA), e (vi) índice de riesgo de calidad del agua (IRCA).

La Tabla 6. presenta los resultados obtenidos para cada índice en consideración. En lo relacionado con el índice ICOMI (i.e., concerniente con conductividad, dureza y alcalinidad) se consideró un agua de mediana calidad. Con respecto al índice ICOMO (i.e., relacionado con DBO y coliformes totales) se presentaron buenas características en el agua. En la escala del índice ICOSUS (i.e., relacionado con sólidos suspendidos totales) se presentaron muy buenas características durante los muestreos; mientras que en la escala del índice ICOTRO (i.e., relacionado con la concentración de fósforo) se demostró que el fósforo es el causante de eutrofización. Es de aclarar, que el límite de detección para este parámetro fue de 0,1 mg/L, por lo cual las concentraciones pueden ser menores.

Por otra parte, con respecto al índice ICA la clasificación recibida fue de “Buena”; pero es de precisar, que las características son cercanas a la

categoría de calidad media. De esta manera, se consideró al agua cruda como capaz de poseer una elevada diversidad acuática, permitiendo el contacto humano directo sin inconvenientes. Finalmente, el índice de riesgo de calidad del agua cruda (IRCA) muestra una clasificación de riesgo alto, puesto que se presentan valores de coliformes totales y E. coli que la apartan de los valores aceptables desde el punto de vista fisicoquímico y microbiológico según la resolución 2115 del 2007 [15].

Tabla 6. Índices de calidad y contaminación del agua cruda.

Índice	La Moya	Bellavista
ICOMI	0,67	0,09
ICOMO	0,18	0,19
ICOSUS	0,0	0,0
ICOTRO	Eutrofia	Eutrofia
ICA	74,4 (Buena)	75,5 (Buena)
IRCA	Alto	Alto

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos durante la presente investigación muestran que la fuente de abastecimiento La Moya presenta un riesgo dominante (i.e., alto riesgo) de tipo antrópico por (i) vertimiento de residuos líquidos y sólidos, (ii) conflictos por uso de suelo, (iii) desconocimiento de servidumbres, (iv) procesos erosivos, (v) condicionantes operacionales y funcionales, y (vi) contaminación de muestras de control del agua potable. Por otro lado, la fuente de abastecimiento presenta un riesgo dominante de tipo natural por (i) movimientos en masa.

La fuente de abastecimiento Bellavista presenta un riesgo dominante tipo natural (i.e., alto riesgo) por (i) movimientos en masa. Por otro lado, la fuente de abastecimiento presenta un riesgo dominante de tipo antrópico por (i) conflictos de uso del suelo, (ii) desconocimiento de servidumbres, (iii) procesos erosivos, (iv) condicionantes operacionales y funcionales, y (v) contaminación de muestras de control del agua potable. Sin embargo, para las dos fuentes de abastecimiento se deben tener en cuenta los siguientes riesgos de tipo antrópico y natural identificados: (i) sabotaje (riesgo medio), (ii) caudales máximos (riesgo bajo), y (iii) sequía (riesgo medio).

Por otro lado, los análisis preliminares sobre el agua cruda sugieren que las condiciones de calidad podrán ser aptas para el consumo humano mediante la implementación de un tratamiento de desinfección en la PTAP; lo anterior, debido a la presencia de coliformes y a que el recuento de mesófilos aerobios sobrepasa los límites establecidos por la legislación colombiana. Adicionalmente, el agua cruda no cumple con los requisitos fijados para la turbiedad del agua potable, evidenciando la necesidad de garantizar los procesos de tratamiento de tipo convencional en la PTAP: (i) coagulación, (ii) floculación, (iii) sedimentación, y (iv) filtración.

La valoración de la calidad del agua cruda mediante el uso del índice ICA muestra una categorización de "Buena" (ICA: 75). De esta manera, se considera que el agua cruda es capaz de poseer una elevada diversidad acuática, permitiendo el contacto humano directo sin inconvenientes.

Por otra parte, el índice de riesgo de calidad del agua cruda (IRCA) muestra una clasificación de riesgo alto, debido principalmente a la presencia de valores elevados de coliformes totales y *E. coli* (i.e., se requiere desinfección para consumo humano).

El desarrollo del presente trabajo plantea los siguientes retos de investigación para el futuro: (i) estudiar la efectividad de las unidades de tratamiento en la PTAP para evaluar el riesgo en la calidad del agua tratada de la municipalidad; y (ii) desarrollar y validar una metodología unificada para la evaluación y construcción de mapas de riesgo en sistemas de abastecimiento de pequeñas comunidades (i.e., en un nivel de complejidad bajo).

Finalmente, la investigación permite ampliar el conocimiento acerca de la evaluación de riesgos en sistemas de abastecimiento de agua para poblaciones con un nivel de complejidad bajo. Además, es de utilidad para los organismos públicos y privados involucrados en la gestión de la salud pública, es decir, de vigilar y controlar la calidad del agua, y de diseñar e implementar prácticas de control de la contaminación en pequeñas comunidades. Por lo tanto, el presente manuscrito se constituye en un documento de apoyo para vislumbrar opciones en la toma de decisiones para la gestión de la calidad del agua y la operación de sistemas de abastecimiento en pequeñas comunidades.

REFERENCIAS

- [1] M.W. LeChevallier, "Case for maintaining a disinfectant residual", *American Water Works Association Journal*, vol. 91, pp. 86-94, 1999.
- [2] M.W. Rosegrant, X. Cai and S.A. Cline, *Global water outlook to 2025: averting an impending crisis*, Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI), 2002.
- [3] K. Vairavamoorthy, Jimin Yan, M. G. Harshal and D. G. Sunil, "IRA-WDS: A GIS-based risk analysis tool for water distribution systems", *Environmental Modelling & Software*, vol. 22, pp. 951-965, 2007.
- [4] M.W. LeChevallier, R.W. Gullick, M.R. Karim, M. Friedman and J.E. Funk, "The potential for health risks from intrusion of contaminants into the distri-

- bution system from pressure transients”, *Journal of Water and Health*, vol. 1, pp. 3-13, 2003.
- [5] G.R. Boyd, H. Wang, M.D. Britton, D.C. Howie, D.J. Wood, J.E. Funk and M.J. Friedman, “Intrusion within a simulated water distribution system due to hydraulic transients I: Description of test rig and chemical tracer method”, *Journal of Environmental Engineering*, vol. 130, pp. 774-777, 2004.
- [6] J.A. Foster and A.T. McDonald, “Assessing pollution risks to water supply intakes using geographical information systems (GIS)”, *Environmental Modelling & Software*, vol. 15, pp. 225-234, 2000.
- [7] OMS, *Guías para la calidad del agua potable*, Washington D.C.: Organización Panamericana de la Salud, 1985.
- [8] R. Rojas, *Guía para la vigilancia y control de la calidad del agua para consumo humano*, Lima: CEPIS/OPS, 2002.
- [9] C. A. Zafra, L. H. Castillo y S.A. Rico, “Pre-factibilidad técnica en la generación de energía eólica para plantas convencionales de potabilización de agua: un caso regional colombiano”, *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica*, vol.16, pp. 223-233, 2013.
- [10] R. E. Flores y G. D. C. N. Guerrero, “El agua y el saneamiento como un derecho humano”, *Revista legislativa de estudios sociales y de opinión pública*, vol. 4, pp. 89-114, 2011.
- [11] *Resolución 4716: mediante la cual se reglamenta el artículo 15 del decreto 1575 de 2007, sobre elaboración de mapa de riesgo de la calidad del agua*, Bogotá D.C.: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de la República de Colombia, 2010.
- [12] *Resolución 1096: Por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico*, Bogotá D.C.: Ministerio de Desarrollo Económico de la República de Colombia, 2000.
- [13] *Resolución 082: 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*, Bogotá D.C.: Ministerio de la Protección Social de la República de Colombia, 2009.
- [14] *Decreto 1575: Por el cual se establece el sistema para la protección y control de la calidad del agua para consumo humano*, Bogotá D.C.: Ministerio de la Protección Social de la República de Colombia, 2007.
- [15] *Resolución 2115: 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*, Bogotá D.C.: Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de la República de Colombia, 2007.
- [16] M. A. Jiménez y M. V. Vélez, “Análisis comparativo de indicadores de la calidad del agua superficial”, *Revista Avances en Recursos Hidráulicos*, vol. 14, pp. 53-69, 2007.
- [17] L. A. Quintero, “Determinación de indicadores para la calidad de agua, sedimentos y suelos, marinos y costeros en puertos colombianos”, *Gestión y Ambiente*, vol. 13, pp. 51-64, 2010.
- [18] OMS, *Guías para la calidad del agua potable*, Ginebra, Suiza: Organización Mundial de la Salud, 2006.
- [19] J. Bartram, L. Corrales, A. Davison, D. Deere, D. Drury, B. Gordon, G. Howard, A. Rinehold, y M. Stevens, *Manual para el desarrollo de planes de seguridad del agua. Metodología pormenorizada de gestión de riesgos para proveedores de agua de consumo*, Ginebra, Suiza: Organización Mundial de la Salud, 2009.
- [20] *Resolución 4716: Por medio de la cual se reglamenta el parágrafo del artículo 15 del Decreto 1575 de 2007*, Bogotá D.C.: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de la República de Colombia, 2010.
- [21] N. M. Victoria, *Mapa de riesgos de calidad de agua para consumo humano de las fuentes abastecedoras de los sistemas de suministro de agua en áreas urbanas y rurales para el departamento de Arauca*, Arauca: Unidad Administrativa Especial de Salud de Arauca, 2011.
- [22] *Decreto 926: Por el cual se establecen los requisitos de carácter técnico y científico para construcciones sismo-resistentes NSR-10*, Bogotá D.C.: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de la República de Colombia, 2010.
- [23] W. Vargas y J. Garro, “El ángulo crítico de la pendiente y la susceptibilidad a deslizamientos de laderas naturales”, en *IX Seminario Nacional de Geotecnia, IV Encuentro Centroamericano de Geotecnistas*. 2006.
- [24] CORPOGUAVIO, *Monitoreo de la calidad del agua y cantidad de las áreas de drenaje de la jurisdicción Corpoguavio*, Gachalá: Corporación Autónoma Regional del Guavio, 2011.
- [25] L. A. Q. Rendón, E. A. Agudelo, Y.A.Q. Hernández, S.A.C. Gallo, y A.F.O. Arias, “Determinación de indicadores para la calidad de agua, sedimentos y suelos, marinos y costeros en puertos colombianos”, *Gestión y Ambiente*, vol. 13, pp. 51-64, 2010.