
Evaluación de parámetros físico-químicos del agua en el proceso de potabilización del río Subachoque

Assessment of physicochemical parameters of water in the collection and purification processes of the Subachoque river

Nelson Giovanni Rincón-Silva¹

Fecha de recibo: 01/12/2016

Fecha aprobación: 13/02/2017

Resumen

En este estudio se evaluó la calidad del agua del río Subachoque el cual abastece a la planta de tratamiento del municipio de Madrid en Cundinamarca, donde además se determinó si el agua tratada para consumo humano del área urbana en el municipio cumplía con los parámetros físicos, químicos y microbiológicos establecidos en la Resolución 2115 de 2007. Para ello, evaluaron muestras de agua cruda del río y muestras de aguas tratadas por la planta. Se emplearon métodos fotométricos, electrométricos y volumétricos en los respectivos análisis físicos y químicos; para los parámetros microbiológicos se empleó la técnica de filtración por membrana. Los resultados obtenidos evidenciaron que la muestra del río cumple con la mayoría de los parámetros fisicoquímicos excepto algunos como el contenido de sólidos, oxígeno disuelto, entre otros, para el agua tratada se observa que los parámetros mejoraron significativamente; no obstante, aun algunos valores de presencia de metales no cumplieron la norma. Sin embargo, los demás parámetros analizados incluso los microbiológicos cumplieron los parámetros estipulados en la Resolución 2115 de 2007. Se

analizaron algunas fuentes de contaminación del río los cuales son principalmente antropogénicas, no obstante, se evidencia la efectividad de la alcaldía del municipio y de las entidades ambientales para la reducción de la contaminación del río y mejoramiento en el tratamiento y distribución del recurso.

Palabras clave: calidad del agua, agua potable, río Subachoque, parámetros fisicoquímicos, planta de tratamiento de agua, Municipio de Madrid Cundinamarca.

Abstract:

In this study, water quality of the Rio Subachoque which supplies to the treatment plant in the municipality of Madrid in the department of Cundinamarca, where also was determined whether the treated water for human consumption in urban areas in the city, met evaluated physical, chemical and microbiological parameters established by Resolution 2115 of 2007, for this, was evaluated samples of River water and samples of water treated by the plant. Photometric, electrical measuring and volumetric methods were used in the respective physical, chemical

¹Licenciado en Química, Ingeniero Ambiental, Magister en Ciencias-Química.
Universidad de los Andes.
Correo electrónico: giovannyrincons@gmail.com,
ng.rincon10@uniandes.edu.co

analysis and microbiological parameters for the membrane filtration technique were employed. The results showed the sample of the river satisfy the majority of physicochemical parameters except some such as; solids, dissolved oxygen, among others, for treated water is showed that the parameters were significantly improved, even though some values don't comply the standard; specifically presence of some metals. However, the microbiological parameters analyzed satisfy the parameters set out in Resolution 2115 of 2007.

Introducción

En las últimas décadas, la preocupación por el manejo de los recursos naturales ha unido a gobiernos y entidades mundiales, en búsqueda de su uso racional y un desarrollo que no ponga en riesgo la supervivencia en el planeta. Organizaciones como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y Organización de las Naciones Unidas para la Educación y Diversificación, la Ciencia y la Cultura (Unesco del inglés *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*) han realizado importantes planes de investigación para orientar sobre las consecuencias que sobre la salud humana puede traer la contaminación de los recursos del aire, los suelos y especialmente del agua (Quiquinta *et al.* 2003, Segura-Triana 2007, Echarri, 2010). Por esta razón es necesario evaluar los parámetros físicoquímicos de las fuentes de agua, ya que estos determinan cuál es su uso más adecuado, bajo la reglamentación de la legislación colombiana mediante la Resolución 2115 de 2007 y el Decreto 1594 de 1984 (Ministerio de la Protección Social-Colombia, 2007).

Some sources of pollution of the river which are mainly anthropogenic, likewise, there is evidence the effectiveness of the Municipality of Madrid and environmental agencies to reduce the river pollution and improvement in the treatment and distribution of water.

Keywords: Water quality, drinking water, Subachoque River, physicochemical parameters, water treatment plant, Municipality of Madrid-Cundinamarca.

Siguiendo esta perspectiva, es necesario recordar que el agua es una de las sustancias más esenciales para la vida, es vital tanto para el planeta, como para los animales y las plantas; además, resulta fundamental en la supervivencia del ser humano, ya que forma parte del 70 % del peso del cuerpo humano y el hecho de que una persona no la beba le puede significar la muerte en poco tiempo. No obstante, por diversas acciones, entre las que se destacan el desarrollo científico y tecnológico, donde se llevan a cabo actividades industriales, comerciales, domésticas y agropecuarias este recurso está siendo gravemente afectado por la adición de diversos materiales o contaminantes (WHO/Unicef, 2000, Quiquinta *et al.*, 2003, Segura-Triana 2007, Echarri, 2010, Ideam 2014). Dentro de los usos más importantes de este recurso se encuentra el empleo de agua potable, la cual se define como aquella que puede ser consumida por personas y animales sin riesgo de contraer enfermedades; este término se aplica al agua que ha sido tratada para consumo humano según las normas de calidad promulgadas por las autoridades locales e internacionales (American Public Health Association (APHA), 1998, Marin, 2006, Unicef, 2008, Wise y Swaffield, 2004).

En el caso específico de Colombia, este país es reconocido por ser uno de los países más ricos en agua, pues se ha reportado que es el quinto más rico en el mundo y el segundo en América del sur después de Brasil (Behar *et al.*, 1997, Segura-Triana 2007, Echarri, 2010, Samboni *et al.*, 2011); no obstante, debido al acelerado desarrollo industrial del país, diversas fuentes naturales de agua están siendo contaminadas de ahí la importancia de desarrollar buenos sistemas de distribución y tratamiento del recurso. En este sentido, según la Contraloría de Cundinamarca, en los últimos años, la mayor parte de los acueductos en los municipios de Cundinamarca les distribuyen a sus usuarios agua no potable. De los 116 municipios del departamento, el 45 % (52 municipios) no suministran agua apta para el consumo humano, de acuerdo con los valores establecidos en la Resolución 2115 de 2007. De un total de 2.988.600 cundinamarqueses (población proyectada por el DANE durante el año 2014), a cerca de un millón se les está suministrando agua no potable, lo que representa un 33 % de la población total (Ministerio de Ambiente y desarrollo Sostenible, 2012, Consejo Municipal de Bojacá, 2012, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca [CAR], 2015).

Específicamente, en Madrid (Cundinamarca), este municipio se abastece de agua de una fuente de agua natural; el río Subachoque. El agua proveniente del río es tratada en una planta donde se lleva a cabo el proceso de micro filtrado y cloración y posteriormente por bombeo, llega a los habitantes del municipio, donde la cobertura del servicio de acueducto en el área urbana es del 99 % y beneficia a un total de 77 627 habitantes (Alcaldía de Madrid – Cundinamarca, 2015). Según lo estipulado en el Acuerdo 043 de 2006, de la CAR (Corporación Autónoma Regional de

Cundinamarca) el río Subachoque no cumple con algunos parámetros de calidad de agua de acuerdo con los valores asignados a la calidad del agua en los embalses, las lagunas, los ríos, los humedales y demás cuerpos lenticos de aguas, contenidos en aguas de clase III, ya que en los últimos años, se ha reportado que debido al crecimiento población, el desarrollo urbano y la construcción diversas áreas aledañas al río Subachoque, este está siendo afectado por estas actividades netamente antropogénicas, lo que ha causado serios inconvenientes principalmente en temporada de lluvias (Acosta y Montilla, 2011), por esta razón la alcaldía municipal de Madrid en convenio con la CAR han invertido cerca de 2000 millones de pesos en la descontaminación de este río, que irá a lo largo y ancho de 37.4 km de este afluente hídrico en su paso por Madrid, tanto en la zona urbana como rural (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible, 2015, Alcaldía de Madrid – Cundinamarca, 2015). En la primera fase se ha realizado el retiro de buchón y en la segunda fase se pretende realizar la construcción de obras hidráulicas para la protección de taludes y contra inundaciones, y la remoción de sedimentos, estas obras hacen parte del acuerdo de 2006 de la CAR, por el cual se establecen los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá y las zonas cercanas para que sea logrado hacia el 2020. De esta manera, en este estudio se pretende evaluar la calidad del agua tanto del río como la tratada por la planta de potabilización del municipio. Los métodos analíticos aplicados en la evaluación de los parámetros de calidad de agua se agrupan según sus características físico-químicas:

Propiedades fisicoquímicas del agua

Dentro de las características físicas se pueden nombrar la turbidez, la conductividad y los sólidos

totales; estas son responsables de la calidad organoléptica y se describen a continuación (Romero-Rojas, 1996, American Public Health Association [APHA], 1998, Vernon y Snoeyink, 1999, Colin, 2001, Estupiñan y Avila 2010).

Turbidez

La claridad del agua es importante, en la obtención de productos destinados al consumo humano. La turbidez en el agua es causada por materiales en suspensión tales como arcilla, lodos, partículas de materia orgánica o inorgánica fragmentadas finamente, coloides, compuestos orgánicos coloreados y otros microorganismos (Marin 2006, APHA, 1998, Wise y Swaffield, 2004).

Sólidos totales

Se consideran sólidos todas las sustancias presentes diferentes al agua, materiales suspendidos o disueltos en el agua. Los sólidos afectan la calidad del agua de diferentes formas: aguas con alta concentración de sólidos disueltos; generalmente son de baja potabilidad y pueden inducir reacciones fisiológicas desfavorables en el ser humano. El análisis de los sólidos es importante para el control de procesos de tratamientos físicos y biológicos de aguas residuales y para asegurar el cumplimiento de las normas legales vigentes (APHA, 1998).

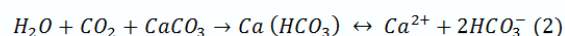
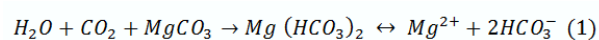
A continuación, se muestran las características químicas como pH, alcalinidad, dureza, indicadores de contaminación por materia orgánica carbonácea (demanda bioquímica de oxígeno [DBO], demanda química de oxígeno [DQO] y oxígeno disuelto [OD]) y determinación de metales pesados son importantes en la calidad del agua:

pH

La medida del pH es una de las pruebas más importantes y frecuentes utilizadas en el análisis químico del agua. Esto se debe a que todas las fases de tratamiento del agua para suministro y residual, como la neutralización ácido-base, suavizado, precipitación, coagulación, desinfección y control de la corrosión dependen del pH. Las aguas naturales tienen normalmente valores de pH de 4 a 9 y la mayoría son ligeramente básicas debido a la presencia de bicarbonatos y carbonatos (APHA, 1998, Cheremisinoff, 2002, Wise y Swaffield, 2004).

Alcalinidad

La alcalinidad de un agua es su capacidad para neutralizar ácidos; este parámetro en la mayor parte de acuíferos naturales es causada por las sales de bicarbonato disueltos, que se forma por la acción del CO₂ sobre los materiales básicos (APHA, 1998, Wise y Swaffield, 2004, Cheremisinoff, 2012): Se puede representar mediante reacciones químicas de la siguiente manera:



Otras sales débiles como silicatos, fosfatos, boratos, también pueden contribuir en pequeñas cantidades a la alcalinidad. Algunos ácidos orgánicos, poco resistentes a la oxidación biológica, forman sales que aumentan la alcalinidad en las aguas contaminadas y en estado anaerobio, se pueden producir sales de ácidos débiles que pueden contribuir a la alcalinidad. En otros casos, los hidróxidos y el amoníaco también pueden contribuir a la alcalinidad, en aguas naturales o tratadas; esta es principalmente una función del contenido de carbonatos, bicarbonatos

e hidróxidos (Cheremisinoff, 2002, Wise y Swaffield, 2004, Torres, 2008, Estupiñán y Ávila 2010).

Dureza

La dureza del agua se define como la suma de las concentraciones de los iones calcio y magnesio. Químicamente, la dureza del agua es una propiedad causada por la presencia de cationes metálicos bivalentes y se manifiesta por su reacción con el jabón para formar precipitados y con ciertos aniones para formar incrustaciones. Los principales iones causantes de la dureza son el calcio y el magnesio. Los iones hierro y aluminio se consideran también causantes de dureza, pero su solubilidad al pH del agua natural es tan limitada, que sus concentraciones se consideran despreciables (APHA), 1998, Cheremisinoff, 2002, Wise y Swaffield, 2004, Estupiñán y Ávila 2010).

Demanda biológica de oxígeno (DBO₅)

La DBO se usa como medida del contenido de la materia orgánica biodegradable; se mide por la cantidad de oxígeno requerido para su oxidación en la muestra de agua y como resultado de la acción de oxidación bioquímica aerobia. La demanda de oxígeno de las aguas residuales es resultado de tres tipos de materiales: (Cheremisinoff, 2002, Wise y Swaffield, 2004, Torres, 2008, Simona *et al.*, 2011)

Materiales orgánicos carbónicos, utilizables como fuente de alimentación por organismos aeróbicos.

Nitrógeno oxidable, derivado de la presencia de nitritos, amoníaco y, en general, de compuestos orgánicos nitrogenados que sirven como alimentación para bacterias específicas.

Compuestos químicos reductores (iones ferrosos, sulfitos, sulfuros) que se oxidan por oxígeno

disuelto.

Demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO es una medida del oxígeno equivalente al contenido de materia orgánica de una muestra que es susceptible a oxidación por un oxidante químico fuerte. La oxidación bajo ciertas condiciones de acidez, temperatura y tiempo, transforma la materia orgánica en dióxido de carbono y agua (Cheremisinoff, 2002, Wise y Swaffield, 2004, Simona *et al.*, 2011, Jouanneau *et al.*, 2014). Una de las limitaciones de DQO es la de oxidar la materia orgánica del desecho sin importar su biodegradabilidad oxidando completamente todos los compuestos en reacción.

Oxígeno disuelto (OD)

El OD es la cantidad de oxígeno que está disuelto en el agua y es esencial para riachuelos y lagos saludables. El nivel de OD puede ser un indicador de cuán contaminada está el agua y cuán bien puede dar soporte esta agua a la vida vegetal y animal. Generalmente, un nivel más alto de OD indica agua de mejor calidad. Si los niveles de OD son demasiado bajos, algunos peces y otros organismos no pueden sobrevivir (Cheremisinoff, 2002, Wise y Swaffield, 2004, Simona *et al.*, 2011, Jouanneau *et al.*, 2014).

La determinación del OD sirve de base para el análisis de la DBO, así la determinación del OD y la DBO son considerados como indicadores para medir el grado de contaminación de las aguas residuales domésticas e industriales (Cheremisinoff, 2002, Wise y Swaffield, 2004, Simona *et al.*, 2011, Jouanneau *et al.*, 2014).

Determinación de metales

La presencia de metales en agua potable, aguas residuales, y en los cuerpos de aguas receptores, constituye un serio problema, ya que su toxicidad

afecta adversamente a los seres vivos que consumen agua, a los sistemas de tratamiento de aguas residuales y a los ecosistemas (Wang *et al.*, 2014).

Microbiología

La calidad microbiológica del agua viene determinada por la diversidad, y el número, de poblaciones de microorganismos presentes y está indisolublemente ligada al uso a que ella está destinada. Por ello, las aguas pueden clasificarse de acuerdo con su utilización, que es la que determina los requisitos de calidad microbiológica exigibles a cada una de ellas.

En las aguas naturales están presentes una gran diversidad de microorganismos, muchos de ellos como microbiota de tránsito, que han llegado a estas a través de diferentes vías. El aislamiento y la caracterización de cada una de las entidades presentes, con vistas a la evaluación de la calidad microbiológica de esta agua sería un proceder complejo y altamente costoso. Por ello, para efectuar esta evaluación, se recurre a los indicadores de calidad sanitaria del agua.

Materiales y métodos

Descripción del área de captación

El primer muestreo se realizó en el río Subachoque, ubicado en Cundinamarca (Colombia), como se presenta en la figura 1, el cual nace en las montañas al occidente de la cuenca del río Frío y desemboca en el río Bogotá recorriendo aproximadamente 12 km antes de entrar en los límites del municipio Madrid (ver figura 2); este abastece a la planta de tratamiento de agua potable del municipio.



Figura 1. Rio Subachoque: lugar de toma de muestra.

Fuente: elaboración propia.

Dentro de la vegetación que se encuentra en su recorrido hay bosques y matorrales nativos de laderas altas, dominados por *Weinmannia* y *Brunellia*. En cuanto a la vegetación acuática en zanjas y pequeños pantanos se encuentra *Juncus*, *Ciperáceas* y *Ludwigia* (Acosta y Montilla, 2011).

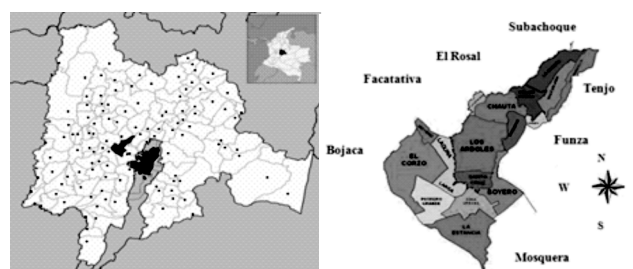


Figura 2. Mapa general y político del municipio de Madrid, departamento de Cundinamarca, Colombia

Fuente: Alcaldía de Madrid. Editado por autores.

Los focos de contaminación que se identificaron en su trayecto son: desechos de construcción, desechos industriales, heces de animales y desechos urbanos (ver figura 3).



Figura 3. Desechos industriales y urbanos en algunas secciones del trayecto del río. Colombia
Fuente: elaboración propia.

El segundo muestreo se tomó posterior al proceso de potabilización que realiza la empresa de acueducto, alcantarillado y aseo de Madrid, el cual consiste en: eliminación de sólidos suspendidos, aglomeración, decantación de los coloides, desinfección de organismos patógenos mediante coagulación (ver figura 4), ablandamiento, eliminación de hierro y manganeso, eliminación de olor y sabor, sedimentación, filtración, control de corrosión, evaporación y desinfección.



Figura 4. Etapa de dosificación en el proceso de coagulación-floculación

Fuente: Autores elaboración propia.

Muestreo: la muestra se tomó lo más lejos de la orilla y se evitó no remover el fondo y las zonas de estancamiento, para ello se usó un frasco de 1000 ml sujetado por el fondo en posición invertida; se sumergió completamente y se dio la vuelta en sentido contrario a la corriente, una vez lleno se procedió a taponarlo manteniéndolo dentro del río. Finalmente, se mantuvo bajo refrigeración hasta que se llevaron a cabo los análisis. Las muestras se tomaron de acuerdo con la metodología establecida por la Norma Técnica Colombiana (NTC) 813, incluida en las normas oficiales para la calidad del agua en Colombia (Icontec, 2015).

Turbidez: se empleó un turbidímetro con un dispositivo de lectura exterior que indica la intensidad de la luz dispersada a 90 ° de la dirección del haz de luz incidente. Este método está basado en una comparación de la intensidad de la luz desviada por la muestra bajo condiciones definidas, con la intensidad de la luz desviada por una suspensión estándar de referencia, bajo las mismas condiciones. A mayor intensidad de la luz desviada mayor será la turbidez (APHA), 1998, Forero *et al.*, 2013).

Determinación sólidos totales: los sólidos totales (ST) se determinaron llevando la muestra directamente a evaporación a una temperatura de 105 °C por un periodo de 4 horas, estos sólidos incluyen el residuo retenido por un filtro (sólidos suspendidos) y el residuo que pasa a través del filtro (sólidos disueltos) (APHA), 1998).

pH: la medida de pH se realizó en un equipo HANNA Instruments H12221 Calibration Check pH/ORP meter (APHA), 1998, Forero, Forero *et al.*, 2013).

Alcalinidad: se tomaron 20 ml de la muestra a la cual se le adicionaron 2 gotas de fenolftaleína (color rosa) y se tituló con una solución de H₂SO₄ de 0,02 N hasta incoloro. Luego se adicionaron 2 gotas de indicador mixto (color azul) y se continuó la titulación hasta observar un color rosa (APHA), 1998, Estupiñán y Ávila, 2010, Forero *et al.*, 2013).

Dureza total: se tomaron 20 ml de la muestra se adicionaron 0.2 g de indicador Negro de Eriocromo T (NET) se ajustó hasta pH 10 con NH₃ y se tituló con EDTA 0.01 M hasta color azul. Para la determinación de dureza cálcica se siguió el anterior procedimiento, pero en este caso se utilizó 0.2 g de indicador Murexide y se ajustó hasta un pH de 12 con NaOH se tituló con EDTA hasta color rosa (APHA) 1998 Estupiñán y Ávila, 2010).

Determinación de oxígeno disuelto (OD) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), Método Winkler: se tomó un frasco Winkler previamente lavado y purgado con la muestra, este se sumergió horizontalmente permitiendo el acceso de la muestra hasta su máxima capacidad; una vez este estuvo lleno se

procedió a tapar manteniéndolo dentro del lugar de muestreo. Este mismo procedimiento se siguió para la determinación de DBO₅ pero en este caso la muestra se dejó incubando por un periodo de 5 días. Para fijar el oxígeno se agregaron 2 mL ml de solución de MnSO₄ y 2 ml de solución alcalino yoduro nitrato se agito por 2 minutos y se dejó decantar durante 5 minutos. Para disolver el precipitado se adicionaron 2 ml de H₂SO₄ concentrado luego se transfirieron 203 ml de la solución a un Erlenmeyer de 500 ml se valoró con una solución Na₂S₂O₃ de 0.02 N hasta observar un cambio de color amarillo claro, luego se adicionaron 3 gotas de almidón y se continuo la titulación hasta incoloro (APHA), 1998).

Determinación demanda química de oxígeno (DQO), Método Espectrofotométrico:

- Preparación de patrones: se pesó 0.085 g de Biftalato de Potasio y se llevó a un volumen de 100 ml (solución stock de 1000 ppm), se prepararon soluciones de 50, 100, 150, 200 y 300 ppm de DQO.
- Blanco: 1.7 ml de agua des ionizada.
- Muestra: en tres tubos de ensayo se adicionaron 0.5, 1 y 1.7 ml de la muestra y se llevaron a un volumen de 1.7 ml con agua desionizada.

Posterior a los patrones, blanco y muestras se adicionaron 0.8 ml de K₂Cr₂O₇ y 2.5 ml de H₂SO₄ concentrado y se llevó a digestión por 20 minutos a 150 °C dejando enfriar y se leyó en un espectrofotómetro Uv-Vis (Spectronic Genesys SN, Milton Roy Co., Pont-Saint-Pierre, Francia) a una longitud de onda máxima de 440 nm (APHA), 1998).

Determinación de metales por espectroscopia de absorción atómica

La absorción atómica se basa en la atomización del analito en matriz líquida y que utiliza comúnmente un nebulizador pre-quemador (o cámara de nebulización) para crear una niebla de la muestra y un quemador con forma de ranura que da una llama con una longitud de trayecto más larga, en caso de que la transmisión de energía inicial al analito sea por el método *de llama*. La niebla atómica queda desolvatada y expuesta a una energía a una determinada longitud de onda emitida, ya sea por la llama específica, o por una lámpara de cátodo hueco construida con el mismo analito a determinar o una Lámpara de Descarga de Electrones (EDL) (Skoog *et al.*, 2007).

Por este método se detectaron los metales: cadmio, cromo, hierro, plomo, níquel y cobre. La cuantificación se llevó a cabo a partir de la preparación de diferentes curvas de calibración empleando diferentes sales grado reactivo analítico Merck de estos metales como patrones y rango de concentración. Estas medidas se llevaron a cabo en un equipo Perkin Elmer Analyst 300 utilizando como oxidante y combustible una mezcla aire-acetileno 10:2 con un flujo de 10 L min⁻¹ (APHA), 1998, Duruibe *et al.*, 2007, Wang *et al.*, 2014, Nazeera *et al.*, 2014, Verma y Gupta, 2015).

Microbiología

Se llevó a cabo la determinación de Coliformes totales y *Escherichia coli* (*E. coli*), con las recomendaciones del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, se empleó la técnica de filtración por membrana (APHA), 1998, Liévano-León, 2012).

Resultados y discusión

Los datos obtenidos del análisis fisicoquímico de la muestra del agua de río cruda y con tratamiento se presentan en la tabla 1, es importante mencionar que en el área cercana al río aún existen algunas fuentes de materiales contaminantes las cuales se mencionaron parcialmente en la caracterización del lugar de muestreo, cuyo principal origen es debido a las empresas constructoras las cuales algunas no arrojan los residuos como lo establece la legislación. De esta manera, cerca al caudal del río se observaron diferentes tipos de contaminantes como: materiales de construcción (cemento, bloques, arena, etc.) materia orgánica (diferentes plantas como buchón, algunos animales en descomposición, etc.) basura doméstica, entre otros, todas estas sustancias son provenientes de actividades antropogénicas como: construcción de edificios para el desarrollo de la infraestructura del municipio, empresas cementeras, actividades agrícolas, domésticas, entre otras. Por lo anterior, en el agua proveniente del río se encontraron valores por fuera del margen normal de acuerdo con la legislación colombiana, es decir, del Acuerdo 043 descrito en el 2006 que establece los objetivos de calidad del agua para la cuenca de los ríos cercanos a Bogotá (CAR, 2012).

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos estudiados para la muestra de agua cruda y tratada proveniente del río Subachoque de Madrid (Cundinamarca)

Parámetro de análisis	Agua Cruda	Agua tratada	Valor límite Para agua potable ^a
Color (UPC)	100	10	15
Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	956.6	362.8	1000
Turbidez (NTU)	66.8	2.5	2
Alcalinidad total (mg L^{-1})	475.2	156.8	200
Dureza total (mg L^{-1})	90	154.4	300
DBO ₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno) (mg L^{-1})	47.5	6.3	-
DQO (demanda Química de Oxígeno) (mg L^{-1})	65.2	10.9	-
Oxígeno disuelto (mg L^{-1})	6	8.0	-
pH (Unidades de pH)	5.62	8.02	6.5-8.5
Material Flotante (N/A)	Presente	Ausente	Ausente
Sólidos totales (mg L^{-1})	141.1	16.3	200 (expresado en norma como mg dm^{-3})
Sólidos suspendidos totales (mg L^{-1})	84.7	7.70	10
Metales (mg L^{-1})			
Cadmio	0.02	0.001	0.003
Cromo total	0.1	0.01	0.05
Zinc	5	3.4	3
Plomo	0.2	0.01	0.01
Níquel	1	0.03	0.02
Cobre	10	1.3	1
Calcio	55.0	75.0	60

^aResolución n.º 2115 (22 de junio de 2007).

A continuación, se explican cada uno de los parámetros fisicoquímicos estudiados para el agua cruda del río, que se presentaron en la tabla 1.

Color

La muestra de agua proveniente del río presenta un valor de 100 UPC, valor relacionado con la gran cantidad de materia orgánica e inorgánica que arrastra el río de forma natural; así mismo, este valor aumenta debido a la carga de contaminantes por efectos antropogénicas lo que hace que el valor aumente hasta seis veces del permitido por la norma, seguido al proceso de tratamiento se evidencia una significativa reducción del 90 %, con lo que el tratamiento cumple adecuadamente la norma (APHA, 1998, Estupiñán y Ávila 2010).

Turbidez

De acuerdo con los resultados obtenidos se

encontró en la etapa de pretratamiento un valor de 66.8 Unidades de Turbidez Nefelométricas - (por sus siglas en inglés UNT) este alto valor se debe al elevado caudal que tiene el río lo que causa un gran arrastre de material como: arcilla, limo y desechos industriales y se evidencia por la presencia de materia flotante en el agua. Cuando hay alta turbidez, es decir, partículas en suspensión estas absorben calor de la luz del sol, haciendo que este tipo de aguas incrementen su temperatura y reduzcan así la concentración de oxígeno.

En el proceso de pos tratamiento se encontró una reducción del 96.2 % (2.5 UNT), si bien este parámetro disminuyó considerablemente, no puede estipularse como óptimo, ya que la normatividad menciona que para el agua tratada el valor de turbidez debe ser igual o menor a 2 UNT, ya que las partículas suspendidas ayudan a la adhesión de metales pesados, compuestos orgánicos tóxicos y pesticidas y, por lo tanto, es necesario que se cumpla el valor estipulado (APHA, 1998, Estupiñán y Ávila 2010).

Sólidos totales

Los resultados obtenidos muestran una correlación con la turbidez para el agua cruda, debido a la presencia de diferentes tipos de sólidos entre los que se encuentran desechos industriales y urbanos teniendo el mismo efecto en la reducción de oxígeno disuelto. En los procesos que se llevan a cabo en la planta de tratamiento denominados: coagulación-floculación, sedimentación y filtración, se observa la efectividad de estos por los valores obtenidos de ST y SST. Asimismo, Así mismo, en el agua tratada se encuentra concentraciones de ST (16.3 mg/l) y SST (7.70 mg/l), los cuales no están por fuera de la resolución 2115, pero se observan valores

considerables que pueden deberse a la baja frecuencia en la que se lavan los filtros y a los trayectos entre procesos de tratamiento en los que se llevan a cabo en cielo abierto (APHA, 1998).

Conductividad

Para la conductividad del agua cruda se obtuvo un valor de 956.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$, magnitud relacionada con la presencia de diversos iones provenientes de sales como CaCO_3 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , y diversos metales como níquel, sodio, calcio magnesio, plomo, cadmio, entre otros, cuya presencia se discutirá más adelante. Después del tratamiento se esperaba que este valor descendiera, lo cual efectivamente ocurrió, ya que como descendió el valor de alcalinidad y de los metales, se esperaba que el de la conductividad también lo hiciera, así, el valor después de tratamiento fue de 362.8, es decir, hubo un descenso del 62.5 %, el cual no es significativamente alto y se relaciona con el aumento de cal, para el control de pH (APHA, 1998, Estupiñán y Ávila 2010).

pH

El valor obtenido para la muestra del río fue de 5.62, valor, que está dentro del rango normal para los valores asignados a la calidad de los embalses, lagunas, humedales y demás cuerpos de aguas (5 a 9), está cerca del límite inferior, y no representa ningún peligro para la posible vida acuática dentro del río. Este valor se debe a los procesos ácido-base del sistema CO_2 proveniente de la atmosfera como de la descomposición anaerobia de materia orgánica. Sin embargo, este valor como agua de consumo humano no es adecuado, según el Decreto 1594 de 1984. Por esta razón se lleva a cabo un tratamiento con cal en la planta potabilizadora con el fin de aumentar el pH hasta un valor de 8.02, valor que cumple con la norma exigida (6.5-8.5). La adición de este tipo de

compuestos para regular el pH debe ser estricta, ya que si este aumenta considerablemente y hay presencia de nitratos se puede producir nitrógeno amoniacal gaseoso el cual es tóxico, provocando efectos nocivos en el consumidor. Adicionalmente, este parámetro es un factor importante para que se lleven a cabo otros procesos consecutivos como, por ejemplo, en la desinfección con cloro que tiene lugar en un rango de pH entre 6.5 y 8.0 (APHA, 1998, Estupiñán y Ávila 2010).

Alcalinidad y dureza

Para el parámetro de la alcalinidad se encontró un valor de 475.2 mg l^{-1} para el agua cruda, aspecto relacionado con el contenido de bicarbonatos, carbonatos o hidróxidos, y en menor grado por boratos, fosfatos y silicatos, que pueden estar presentes en la muestra, por sustancias inorgánicas, provenientes de los materiales de residuos de construcción arrojados al río. El contenido de dureza es de 90 mg/l , lo cual clasifica la muestra como agua dura, probablemente causado por la presencia de material mineral en el río, tal vez piedra caliza o sustancias provenientes de la construcción como, por ejemplo, cemento ($\text{CaCO}_3 \geq 75$ % en masa, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , entre otros). Para el agua tratada la alcalinidad bajó hasta valores de 156.8; esta disminución fue causada por los floculantes adicionados, los cuales forman un floc, compuesto por diferentes sustancias entre ellas diferentes especies que contribuyen a la alcalinidad.

Por otra parte, el valor de dureza subió hasta un valor de 154.4 mg l^{-1} , este comportamiento se esperaba, ya que al adicionar cal para el control de pH, aumentó el contenido de calcio y, por lo tanto, aumentó el valor de dureza; el aumento de este parámetro no tiene implicaciones en los

consumidores a nivel biológico, pero sí puede representar mayores costos, ya que esta se puede incrustar en las tuberías, causando problemas a nivel de distribución, por tal motivo es muy importante lograr una efectiva remoción (APHA0, 1998, Estupiñán y Ávila 2010).

Metales

En esta investigación se estudió el contenido total de cadmio, cromo, hierro, plomo y níquel, en la muestra de agua. Es necesario mencionar que algunos de estos pueden categorizarse como metales pesados, si se parte que no hay una definición única de estos que permitan clasificarlos y enumerarlos. Por esta razón se pueden utilizar criterios como densidad relativa mayor de 4 o 5, su toxicidad, etc., esta categorización es muy importante, ya que los metales pesados tienen implicaciones importantes en la salud de los seres humanos, pues muchos de estos pueden ser cancerígenos y de ahí la importancia que no exceden el nivel permitido por las organizaciones de salud y de control ambiental (Soto-Lozano *et al.*, 2004, Duruibe *et al.*, 2007).

Entre estos podemos encontrar el plomo, cadmio y cromo. El contenido de cadmio y plomo es bajo, aspecto esperado ya que se trata de una fuente natural hídrica, que, si bien tiene contaminantes externos, no alcanza a tener presencia significativa de estos metales pesados, pero supera el parámetro establecido por la norma. Estos metales son reconocidos por sus efectos sobre la salud humana, por ejemplo; los síntomas del envenenamiento por plomo incluyen, irritabilidad, insomnio, erupciones, letargo o hiperactividad, pérdida de apetito, dolores de cabeza. Altos contenidos pueden provocar daños del sistema nervioso encefalitis y hasta la muerte. Para el caso de envenenamiento con cadmio, este

se acumula en los riñones, originando un daño en el mecanismo de filtración, esto causa la excreción de proteínas esenciales y azúcares del cuerpo y el consecuente daño de los riñones. Además, dura bastante tiempo antes de que el cadmio que ha sido acumulado en los riñones sea excretado del cuerpo humano. Así mismo, otros efectos sobre la salud que pueden ser causados por el cadmio son: diarreas, dolor de estómago y vómitos severos, fractura de huesos, daño al sistema nervioso central, daño al sistema inmune, desórdenes psicológicos, posible daño en el ADN o desarrollo de cáncer (Duruibe *et al.*, 2007, Nazeera *et al.*, 2014, Verma y Gupta, 2015).

El contenido de cromo total en la muestra de agua también es bajo y no excede el valor permitido por la norma, este contenido puede ser proveniente de rocas, plantas, suelos, que se han lixiviado hasta el río. El cromo se manifiesta en el medio ambiente más comúnmente como trivalente (cromo (III)), hexavalente (cromo VI) y en la forma metálica (cromo (0)). El cromo III llega al río de forma natural por algunos vegetales, el cromo (VI) y el cromo (0) son generalmente producidos mediante procesos industriales, que pueden llegar al río, debido al mal manejo de residuos de las constructoras del municipio de Madrid (Duruibe *et al.*, 2007, Wang *et al.*, 2014, Nazeera *et al.*, 2014, Verma y Gupta, 2015).

Las fuentes principales de cromo (VI) son descargas de fábricas de acero y celulosa, y la erosión de depósitos naturales de cromo (III). En el río, los compuestos de cromo han sido diseminados mediante filtraciones, pobre almacenaje, o prácticas inadecuadas de disposición. Además, estos compuestos son persistentes en el agua en forma de sedimentos, algunos estudios indican que este metal puede ser

cancerígeno (Duruibe *et al.*, 2007, Verma y Gupta, 2015).

Por otro lado, el contenido de níquel en la muestra de agua de río, excede el límite de la norma para agua potable, ya que está por encima de 0.02 mg l^{-1} , por lo tanto, debe removerse. Este metal produce problemas en la salud: la inhalación de compuestos de níquel es cancerígeno para el ser humano al igual que el níquel metálico. Sin embargo, no hay pruebas sobre riesgo carcinógeno derivado de la exposición al níquel por vía oral. La dermatitis alérgica de contacto es el efecto más frecuente de la exposición al níquel en la población en general. Posiblemente, el valor del contenido de níquel proviene de materiales arrojados al río por las constructoras o residuos domésticos, ya que puede proceder de materiales metálicos que presentan aleaciones o recubrimientos electrolíticos de este metal, por ejemplo, láminas de acero, herramientas de construcción, etc. (Duruibe *et al.*, 2007, Wang *et al.*, 2014, Nazeera *et al.*, 2014). Luego del tratamiento este metal desciende considerablemente peor aún no cumple el parámetro exigido por la norma.

La concentración de zinc se encuentra sobre el nivel permitido por norma, encontrándose en el agua del río un valor de 5 mg l^{-1} . Este metal no representa riesgo sobre la salud humana, pero sí representa posibles problemas en las tuberías, luego de tratamiento disminuye su concentración, pero se incumple la reglamentación.

El contenido de cobre inicial excede el valor de la norma con un valor de 10 mg l^{-1} ; este metal puede provenir de minerales presentes en el río o de contaminantes inorgánicos proveniente de la construcción. Este metal está presente de manera

natural en todos los entornos acuáticos, incluidos los sedimentos. Los organismos acuáticos necesitan del cobre para funcionar correctamente, pero para agua potable el valor máximo permitido es de 1 por lo que se hace necesario removerlo.

Después del proceso de potabilización se observa que descendió considerablemente hasta 1.3, pero aún no se encuentra en el límite de la norma por lo que es necesario profundizar en su remoción (Duruibe *et al.*, 2007, Wang *et al.*, 2014, 2014, Nazeera *et al.*, 2014, Verma y Gupta, 2015). Al analizar los contenidos de metales después del tratamiento se observa claramente que el metal que aumenta considerablemente es el calcio, aspecto relacionado directamente con el pH y con la dureza, ya que como se mencionó anteriormente este aumento, se debe al tratamiento con cal el cual se usa para regular el pH. Este es un referente importante en la normatividad para que el agua tratada pueda ser consumida por seres humanos (pH), mientras que el contenido de calcio es un indicativo más referente en términos económicos que de salubridad (Wang *et al.*, 2014, Nazeera *et al.*, 2014, Verma y Gupta, 2015).

Los valores de níquel y cobre después del tratamiento presentan cambios significativos, pero no cumplen con la norma, por lo que la planta de tratamiento debe mejorar en la disminución de estos dos metales sobre todo el valor de cobre, el cual puede tener un efecto adverso sobre la salud. Así mismo, el valor de zinc después de tratamiento es de 3.4 mg l^{-1} menor que el exigido por norma, aunque este metal no tiene gran implicación ambiental ni en la salud, no se ha removido adecuadamente por el tratamiento de la planta lo que puede generar problemas económicos en relación a las tuberías de

distribución (Duruibe *et al.*, 2007, Wang *et al.*, 2014, Verma y Gupta, 2015).

Determinación de oxígeno disuelto (OD) y demanda química y bioquímica de oxígeno (DBO₅)

Al analizar el parámetro de demanda química de oxígeno (DQO), se encontró un valor de 65.2 mg l⁻¹, debido a la presencia de materia orgánica, proveniente de las aguas negras que probablemente se lixivian hasta el río, aumentando la carga orgánica de este y favoreciendo la proliferación de microorganismos. Esto sin mencionar los residuos orgánicos provenientes de las construcciones en las cercanías, los cuales generan además desechos inorgánicos como sulfitos, tiosulfatos, nitritos y hierro ferroso los cuales son oxidados por el dicromato incrementando el valor de DQO. Otro aspecto que está correlacionado con el resultado anterior es la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), en el cual se obtuvo un valor de 47.5 mg l⁻¹, se espera que la DQO sea aproximadamente igual a la DBO, pero este comportamiento no se dio en este estudio, ya que la DQO supera la DBO₅ en un 27.1 %, aspecto causado posiblemente por la presencia de residuos industriales en la fuente de la muestra del agua, ya que, tal vez los contenidos industriales arrojados al río contenían compuestos como; sulfuros, sulfitos, tiosulfatos o nitritos que pueden ser oxidados por el dicromato y aumentar el DQO, tal como ocurre en este caso (Wise y Swaffield, 2004, Simona *et al.*, 2011, Jouanneau *et al.*, 2014).

Después del tratamiento el parámetro de DQO disminuyó hasta un valor de 10.9, si bien la resolución 2115 de 2007 no hace referencia a este, se puede tomar como consideración la normatividad de la Unesco la cual indica que en

grandes concentraciones de DQO hay gran cantidad de contaminación y valores por debajo de 20 indicarían ausencia de contaminantes, por lo cual se puede afirmar que el proceso de tratamiento de agua por parte de la planta de tratamiento es adecuado, ya que se removió el 83 % lo cual es satisfactorio para la planta de tratamiento y para la distribución del recurso a la población. El valor de DBO que está muy relacionado con el anterior, se encuentra en 6.3 mg L⁻¹ después del tratamiento, es decir que el porcentaje de remoción fue del 86.7 %, valor de remoción que concuerda con la DQO, en este parámetro ocurre algo similar con los valores de norma. Finalmente, se evidencia que el oxígeno disuelto aumentó después del tratamiento y está en el intervalo de aguas adecuadas para la vida de la gran mayoría de especies de peces y otros organismos acuáticos. Así mismo, es importante mencionar que este parámetro tiene mayor implicación en fuentes hídricas naturales que en el proceso de potabilización (Wise y Swaffield, 2004, Simona *et al.*, 2011, Jouanneau *et al.*, 2014).

Coliformes totales y E. coli

No se presentó crecimiento de Coliformes totales ni *E. coli*, en las muestras analizadas tratadas por la planta de tratamiento por lo que se evidencia un buen proceso como se ha mencionado anteriormente (APHA, 1998, Liévano-León, 2012).

Conclusiones

Se determinó que el proceso de descontaminación del río Subachoque llevado a cabo en común acuerdo entre la alcaldía del municipio de Madrid y la CAR se refleja en la buena calidad de agua de la fuente natural, ya que cumple en su mayoría con los parámetros de la legislación colombiana. Así mismo, se determinó que el tratamiento del agua

para una población aledaña a la capital de Bogotá (Madrid- Cundinamarca) por parte de la planta de tratamiento y alcantarillado del municipio, cumple, en general, con los parámetros exigidos por el ministerio de salud y protección social, estipulados en el Decreto 1594 de 1984. Así, se concluye que la calidad del recurso es eficiente, no obstante, se requieren algunas mejoras, especialmente en la remoción de algunos metales. Se determinó específicamente que los coagulantes y el tratamiento en general empleado por la planta de tratamiento permitieron disminuir la alcalinidad en la muestra de agua cruda removiendo específicamente iones bicarbonatos. Sin embargo, como subproducto de las reacciones de los coagulantes de hierro utilizados se produjo CO_2 , alterando así el pH del agua, por lo que se debe suministrar cal para controlar este parámetro.

Se le recomienda a la alcaldía del municipio de Madrid y en conjunto con la gobernación de Cundinamarca y el gobierno nacional, seguir mejorando el proceso de tratamiento de agua de las plantas, renovando los equipos de tratamiento y añadiendo equipos con técnicas de purificación más avanzadas como la ozonización o membranas semipermeables, para que la planta abastezca a toda la población del municipio de una mejor manera.

La necesidad de este recurso siempre es latente y se incrementa en la medida en que aumenta la población del municipio de Madrid y las diferentes actividades comerciales, pues genera una demanda mayor que debe ser suplida con un excelente sistema de suministro por lo que se les recomienda a las constructoras, comerciantes y pobladores en general tener sumo cuidado con el río Subachoque.

Finalmente, es necesario destacar la importancia de realizar pruebas periódicas sobre los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua de río y la tratada, dado que los valores pueden variar significativamente de una temporada a otra, debido a procesos naturales, así mismo, los valores pueden cambiar dependiendo de la cantidad de cuerpos adicionados al agua por actividades domésticas e industriales.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de los Andes, específicamente al departamento de química. También agradecen ampliamente a la Universidad Pedagógica Nacional donde se llevaron a cabo diversas pruebas fisicoquímicas y especialmente a la profesora Dora Luz Aguilar. También se agradece considerablemente a los técnicos de la planta de tratamiento del municipio de Madrid los cuales permitieron observar sus instalaciones, demostraron los procesos que realizan y permitieron toma de muestras amablemente.

Referencias

Acosta M. M. y Montilla J. X. (2011). *Evaluación de la contaminación por cadmio y plomo en agua, suelo, y sedimento y análisis de impactos ambientales en la subcuenca del río balsillas afluente del río Bogotá* (tesis de pregrado Ingeniería Ambiental y Sanitario). Bogotá: Universidad Libre. Recuperado de <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14892/T41.11%20A72e.pdf?sequence=1>

Alcaldía de Madrid (Cundinamarca) (s. f.). *Sitio desarrollado en el marco de la Estrategia de Gobierno En Línea del orden Territorial (GELT) Federación Colombiana de Municipios.*

Recuperado en diciembre de 2015, de <http://madrid-cundinamarca.gov.co/index.shtml#5>

American Public Health Association (APHA) (1998). *Standard methods for examination of water and wastewater* (20th ed.). Washington, D. C.: American Public Health Association/American Water Works, Association/Water Environment Federation.

Behar, R. G., Zuñiga, M. C. y Rojas, C. O. (1997). Análisis y valoración del índice de calidad de agua de la NSF: Caso Ríos Cali y Meléndez. *Ingeniería y Competitividad*, 1 (3), 17-27.

Cheremisinoff, N. P. (2002). *Handbook of water and wastewater treatment and technologies*. Boston: Ed. Pollution Engineering. Oxford Auckland Johannesburg Melbourne New Delhi.

Colin, B. (2001). *Química ambiental*. Ontario: Ed. Reverte, University of Western Ontario.

Consejo Municipal de Bojacá Cundinamarca. (2012). Bojacá. Acuerdo N° 012/04. Por el cual se adopta el Plan de desarrollo municipal.

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) (2012). Acuerdo 43 de 2012. Recuperado en noviembre de 2015, de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal.jsp?i=22067>

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) (2015). Acuerdo 05 de 2015. Recuperado de diciembre de 2015, de <https://www.car.gov.co/index.php?idcategoria=52044&download=Y>

Duruibe, J. O., Ogwuegbu, M. O. C. & Egwurugwu, J. N. (2007). Heavy metal pollution

and human biotoxic effects Duruibe. *International Journal of Physical Sciences*, 2 (5), 112-118.

Echarri, L. (2010). *Contaminación del agua*. Pamplona: Universidad de Navarra.

Estupiñán Torres, S. M. y Ávila de Navia, S. L. (2010). Calidad físico-química y microbiológica del agua del municipio de Bojacá, Cundinamarca. *Nova*, 8 (14), 206-212.

Forero, A. M., Reinoso, G. y Gutiérrez, C. (2013). Evaluación de la calidad del agua del río Opía (Tolima - Colombia) mediante macroinvertebrados acuáticos y parámetros físico-químicos. *Caldasia*, 35 (2), 371-387.

Icontec (s. f). Norma Técnica Colombiana 813, Normas oficiales para la calidad del agua en Colombia. Bogotá, Icontec.

Ideam (2014). Estudio Nacional del Agua. Calidad del agua superficial en Colombia. Bogotá. Recuperado de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf

Jouanneau, S., Recoules, L., Durand, M. J., Boukabache, A., Picot, V., Primault, Y. Lakel, A., Sengelin, M., Barillon, B. y Thouand G. (2014). Methods for assessing biochemical oxygen demand (BOD): A review. *Water Research*, 4, 62-82.

Liévano-León, A. (2012). Calidad Biológica de las Aguas Superficiales de la cuenca del Río Apulo. *Revista de Tecnología*, 12 (2), 60-71.

Marín, R. (2006). *Fisicoquímica y microbiología de los medios acuáticos: tratamiento y control de calidad de aguas*. Madrid: Díaz de Santos.

Ministerio de Ambiente y desarrollo Sostenible (2012). Resolución 2114 del 28 de noviembre de 2012. Recuperado en diciembre de 2015, de https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/resoluciones/2012/res_2104_2012.pdf

Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2007). Resolución 2115 de 2007. *Diario Oficial No. 46.679*.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible, hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2007). Resolución CAR No. 266 de 2007.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible, hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2010). Decreto 3930 (Compilado Decreto 1076 de 2015).

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible, hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (1993). Ley 99.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible, hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2005). Resolución 2145 de 2005.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible, hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2012). Decreto 2667.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible, hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2004). Decreto 1433.

Nazeera, S., Hashmib, M. Z. y Malika R. N. (2014). Heavy metals distribution, risk assessment and water quality characterization by water quality index of the River Soan, Pakistan.

Ecological Indicators, 43, 262-270.

Quiquinta, W. M., Suárez Rueda N. y García Terrazas C. (2003). *Contaminación del agua e impactos por actividad hidrocarburífera*. La Paz: Edición fortaleza.

Romero-Rojas, J. A. (1996). *Acuquímica. Escuela Colombiana e ingeniería*, Bogotá: Editorial Presencia.

Samboni, N. E., Reyes, A. T. y Carvajal E. Y. (2011). Aplicación de los indicadores de calidad y contaminación del agua en la determinación de la oferta hídrica neta. *Ingeniería y Competitividad*, 13 (2), 49-60.

Segura-Triana, L. (2007). *Estudio de antecedentes sobre contaminación hídrica en Colombia* (trabajo de postgrado en Ciencias Políticas y Administrativas). Bogotá: Escuela de Administración Pública ESAP.

Simona, X. F. Penrua, Y., Guastallia, A.R., Llorensa, J. y Baig, S. (2011). Improvement of the analysis of the biochemical oxygen demand (BOD) of Mediterranean seawater by seeding control. *Talanta*, 85, 527-532.

Skoog, D. A. Holler, F. J. y Crouch, S. R. (2007). *Principles of Instrumental Analysis* (6° ed.). California: Ed. Solutions, Stanford University.

Soto-Lozano, T., Barbarín, J. y Alcalá, M (2004). Remoción de metales pesados en aguas residuales mediante agentes químicos. *Ingenierías*, 7 (23), 46-51.

Torres, D. P. (2008). Diagnóstico de la Calidad del Agua de la Microcuenca Sancotea Socorro

—Santander. *Revista Ingenio*, 7(6), 54-66.

Vernon L. y Snoeyink, D. J. (1999). *Química del Agua, Ciudad de México* (5ª ed.). México: Editorial Limusa.

Verma, R. y Gupta, B. D. (2015). Detection of heavy metal ions in contaminated water by surface plasmon resonance based optical fibre sensor using conducting polymer and chitosan. *Food Chemistry*, 166, 568-575.

WHO/Unicef (World Health Organization/ United Nations Children Fund) (2000). *Global Water Supply and Sanitation Assessment. Report*. Nueva York.

Wang, Z., Yao, L., Liu G. y Liu W. (2014). Heavy metals in water, sediments and submerged macrophytes in ponds around the Dianchi Lake, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 107, 200-206.

Wise A. F., Swaffield J. A. *Water, Sanitary & Waste service for building*. (2004). New York: Ed. Longman Scientific and Butterworth (5th ed). Transferred to Taylor & Francis as of 2012.