

Efecto de la quema de llantas en la calidad del agua de un tramo de la quebrada Piedras Blancas

• Alba N. Ardila* • Erasmo Arriola •
Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid
*Autor para correspondencia

DOI: 10.24850/j-tyca-2017-05-03

Resumen

Ardila, A. N., & Arriola, E. (septiembre-octubre, 2017). Efecto de la quema de llantas en la calidad del agua de un tramo de la quebrada Piedras Blancas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(5), 39-55.

Se estudiaron los efectos causados sobre la calidad del agua de un tramo de la quebrada Piedras Blancas debido a la quema de llantas. Para ello, se efectuaron dos muestreos en los que se midieron parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para una muestra patrón y una muestra problema. El nivel de contaminación del tramo de la cuenca se evaluó mediante el uso del índice de calidad del agua (ICA), el índice de calidad del agua de la Fundación Nacional de Saneamiento (INSF) y el índice de calidad del agua Dinius. El análisis comparativo de la aplicación de los índices revela un deterioro significativo debido a la quema de llantas llevada a cabo alrededor de su cuenca, presentando calidad entre regular y muy mala, haciendo necesario su tratamiento para la destinación del recurso en consumo humano, e incluso la incorporación de tratamientos específicos para la remoción de contaminantes peligrosos como metales pesados y compuestos fenólicos. Adicionalmente, los valores obtenidos para la mayoría de parámetros de la muestra problema excedieron los límites aceptables reportados en la normatividad ambiental colombiana para la destinación del recurso hídrico para uso humano y doméstico; preservación de flora y fauna, y para fines pecuario y agrícola. Los resultados de este estudio demuestran que las propiedades fisicoquímicas del agua son fuertemente afectadas por los productos de combustión provenientes de la quema de llantas.

Palabras clave: quema de llantas, propiedades fisicoquímicas del agua, quebrada Piedras Blancas, índices de calidad del agua.

Introducción

Las llantas son implementos usados ampliamente en el campo automotor. Presentan una estructu-

Abstract

Ardila, A. N., & Arriola, E. (September-October, 2017). Effects of burning tires on water quality in a section of the Piedras Blancas watershed. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 8(5), 39-55.

The effects of burning tires on water quality in a section of the Piedras Blancas watershed was studied. Two samplings were conducted and their physicochemical and microbiological parameters were measured in order to obtain a pattern sample and a problem sample. The pollution level in the section of the basin studied was evaluated based on the water quality index (ICA, Spanish acronym), the National Sanitation Foundation Index (NSFI), and the Dinius Index. A comparative analysis of the indices demonstrated significant river deterioration from the burning of tires around the basin. The quality ranged from average to very poor, requiring treatment for human consumption and even specific treatment processes to remove hazardous pollutants such as phenolic compounds and heavy metals. In addition, the values of most of the parameters exceeded the acceptable limits established by Colombia's environmental regulations on water for human and domestic use, preservation of wildlife, and livestock and agriculture. The results of this study indicate that the water's physicochemical properties were greatly affected by the products that were generated by burning tires.

Keywords: Tire burning, physicochemical water properties, Piedras Blancas basin, water quality indexes.

Recibido: 08/08/2016
Aceptado: 04/04/2017

ra compleja formada por diversos materiales, como caucho natural y sintético (40-45%); un encordado de acero y negro de carbón (27-33%), vulcanizado con azufre (1.5-2.5%), fibra textil y

algunas sustancias químicas (Roy, 2005; Van de Lindt, Carraro, Heyliger, & Choi, 2008; Gupta, Gupta, Arshi, Shilpi, & Arunima, 2011). La separación de estos materiales en sus componentes originales es un proceso difícil, por lo que el reciclaje de las llantas usadas se ha orientado mayoritariamente a su aprovechamiento en conjunto, aunque ya existen diferentes empresas en el mundo que ofrecen el servicio de manejo de llantas usadas, procesándolas para convertirlas en materia prima para asfalto, pistas atléticas y tapetes, entre otros (Adhikari & Maiti, 2000; Weidong, 2007). Entre las diferentes formas de manejo de las llantas usadas se encuentran su apilamiento, entierro, reúso (reencauchamiento) y reciclaje (en ingeniería civil, regeneración del caucho, generación de energía, producción de asfalto o fabricación de nuevos materiales).

El problema del manejo y la disposición de las llantas usadas en América Latina y en el mundo en general en la actualidad es un tema de gran interés, que concierne no sólo a las autoridades ambientales sino también a la comunidad en general. La disposición final de las llantas usadas representa un problema estético, técnico, económico, ambiental y de salud pública (Rowley, Husband, & Cunningham, 1984; Shulan, Tuoliang, & Lian 2011). El almacenamiento de las llantas en grandes cantidades presenta el inconveniente de que ocupan mucho espacio, además son difíciles de compactar en un relleno sanitario, haciendo este proceso costoso y poco viable (Bulent, Yusuf, & Paki, 2009). La alta demanda de estos implementos y la dificultad que se tiene para su almacenamiento y disposición ha llevado a que parte del manejo que se realiza con las llantas consiste en la quema incontrolada e inconsciente de este residuo, liberando gases tóxicos al ambiente, como monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂) y compuestos orgánicos volátiles (COV's), entre otros (Shakya *et al.*, 2008, Oguzhan, Bahattin, & Büilent, 2012), al igual que contaminantes peligrosos, como hidrocarburos policíclicos aromáticos (HAP's), dioxinas, furanos, ácido clorhídrico, benceno, bifenilos policlorados (PCB's) (Marek, 2009;

Prashant, Sarin, Rengarajan, & Darshan, 2011), y metales pesados como arsénico, cadmio, níquel, cinc, cromo y vanadio, entre otros (Edward, Mui, & Cheung, 2010), los cuales, al hacer parte del agua, suelo y aire generan impactos negativos considerables al medio ambiente, y afectan la salud de las personas y la estabilidad de los ecosistemas en general (Van de Lin *et al.*, 2008; Search & Ctvrtnicek, 1976; Tingting *et al.*, 2011).

En estudios realizados por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial sobre llantas en Colombia (Resolución núm. 1457, 2010) se concluyó que gran parte de las llantas, luego de su uso, son almacenadas en depósitos clandestinos, techos o patios de casas y viviendas, y espacios públicos (lagos, ríos, calles y parques), con graves consecuencias en términos ambientales, económicos y sanitarios. Las llantas usadas se convierten en el hábitat ideal para vectores como ratas y mosquitos, que transmiten enfermedades como dengue, fiebre amarilla y encefalitis equina. Cuando las llantas usadas se disponen en botaderos a cielo abierto contaminan el suelo y los recursos naturales renovables, y afectan el paisaje. Además, generan dificultades en la operación en los rellenos sanitarios. De igual forma, algunos subsectores utilizan las llantas usadas como combustible en sus procesos productivos en forma inadecuada. Asimismo, grupos informales que forman parte de la cadena de llantas usadas, las queman a cielo abierto para extraer el acero, generando problemas de contaminación atmosférica. Por ejemplo, de acuerdo con un estudio realizado por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá en 2007 (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2008), en Colombia, y específicamente en algunos municipios del Valle de Aburrá, como Barbosa, Guarne, Envigado y Medellín, se encontraron casos en los que cierto porcentaje ($\leq 21\%$) de las llantas generadas luego de su uso eran entregadas a recolectores informales, los cuales finalmente las quemaban a cielo abierto (Cantanhede & Monge, 2002).

De acuerdo con la regulación ambiental colombiana, las llantas son consideradas un residuo peligroso (RESPEL); así, se han

tomado medidas destinadas a proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la prevención de la generación o reducción de los posibles impactos adversos de la generación y manejo inadecuado de llantas usadas; por ello, en la Resolución 1457 del 29 de julio de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial se establecieron los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas y se adoptaron otras disposiciones. Sin embargo, a la fecha estos residuos continúan siendo dispuestos en andenes, calles y zonas verdes, donde luego son recogidos por personas que los acumulan en predios no autorizados, como botaderos a cielo abierto, para quemarlos al aire libre de forma ilegal, a fin de obtener el acero de su estructura, para luego comercializarlo como chatarra. Un caso específico de esta actividad se presenta en una zona cercana a la quebrada Piedras Blancas, ubicada al extremo oriente del municipio de Medellín, en el departamento de Antioquia, Colombia. Allí, personas desconocidas queman llantas constantemente a cielo abierto, lo que representa un serio impacto negativo a la salud y medio ambiente.

El presente trabajo es un diagnóstico sobre la calidad del recurso hídrico de la parte alta de la quebrada “Piedras Blancas”, ubicada en la zona rural de los municipios de Medellín (Corregimiento de San Elena), Copacabana (Vereda Cabuyal) y Guarne (Vereda Piedras Blancas), en el departamento de Antioquia, Colombia. El estudio comprende la evaluación fisicoquímica del agua de áreas perturbadas y no perturbadas por la quema incontrolada de llantas en una zona cercana a la microcuenca. Es importante aclarar que dicha microcuenca representa una de las principales fuentes de aprovisionamiento de agua para uso humano y doméstico para la ciudad de Medellín (EPM, 1988). La quebrada Piedras Blancas abastece el embalse de Piedras Blancas, el cual, a su vez, suministra al sistema interconectado de las Empresas Públicas de Medellín (EPM) a través de las plantas de tratamiento de Villa Hermosa y La Montaña. El recurso hídrico se destina en un 99.29% para uso doméstico, 0.05% para uso agropecuario, 0.22%

para uso minero industrial, 0.34% para uso comercial y 0.10% para uso oficial (Convenio 397 de 2009 Subdirección Ambiental, 2011), con un caudal de 910 l/s de calidad aceptable conforme al índice empleado (ICA-GLOBAL, reportado en 2011) (Benjumea-Hoyos *et al.*, 2012). Además de ser un parque natural, donde miles de personas usan el recurso hídrico con fines recreativos (Instituto Mi Río, 1995).

Debido a lo anterior, se estudió el efecto de la quema de llantas en la calidad de un tramo de la quebrada Piedras Blancas. Para ello se efectuaron dos muestreos, en los que se midieron parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para una muestra patrón y una muestra problema. El nivel de contaminación de la cuenca se evaluó mediante el uso del índice de calidad del agua (ICA), el índice de calidad del agua de la Fundación Nacional de Saneamiento (INSF) y el índice de calidad del agua Dinius. En el estudio también se analizó la conveniencia o no de la destinación del recurso hídrico para consumo humano y doméstico, preservación de flora y fauna, y uso con fines recreativos, pecuario y agrícola de acuerdo con los criterios establecidos en la normatividad colombiana.

Materiales y métodos

Zona de estudio

La zona de estudio comprendió sólo un sector de la parte alta de la cuenca Piedras Blancas, que abarcó un área aproximada de 1 200 m². La Cuenca Piedras Blancas se ubica dentro del Parque Ecológico Piedras Blancas (6° 18' 0.9" N, 75° 30' 12.3" O), entre los 2 200 y 2 600 msnm sobre la Cordillera Central, al extremo oriente del municipio de Medellín, en el departamento de Antioquia, Colombia (figura 1). El área total de la cuenca es de 41.87 km² y se clasifica como Cuenca Superior Tipo A. Posee en su cabecera tres ramales de importancia: a) quebrada el Rosario o el Perico, y quebrada el Salado; b) quebradas Piedras Blancas Sur, las Ánimas o Velásquez, el Soldado o Palo Santo, y el Atajo; c) quebradas el Salado, Ávila, Guruperita, Gurupera, Matasano Sur o Chorro Clarín, Matasano

Norte o Matasanito, Tiburcio, Quebraditas, Chirrillos, Salinas y Piedras Negras. En la cuenca predominan suelos no saturados, ácidos, con alto contenido de materia orgánica y buenas propiedades físicas desarrolladas a partir de cenizas volcánicas. En su mayoría son suelos arcillosos y franco-arcillosos, con un pH entre 5.0 y 6.5, y muy pobres en fósforo y nitrógeno asimilables, por lo que no son aptos para la agricultura (EPM, 1988; Instituto Mi Río, 1995; Posada, Roldan, & Ramírez, 2000).

El foco de contaminación correspondió a un incendio que se presentó en un tiradero de llantas usadas a cielo abierto, que cubría un área de unos 500 m², ubicado a 200 m de la zona de estudio de la Cuenca Piedras Blancas. Allí, recolectores informales y desconocidos incendiaron un gran número de llantas usadas y aunque desafortunadamente no fue posible obtener datos que permitieran establecer el número exacto de llantas quemadas, el fenómeno afectó un área terrestre de unos 400 m². De acuerdo con el seguimiento hecho en el lugar, el incendio intenso duró un día, y después de un periodo de aproximadamente tres semanas, el incendio se apagó.

Jornada de muestreo

De inicio se llevaron a cabo tres visitas al parque ecológico Piedras Blancas, comprendidas entre los meses de enero y marzo, con una frecuencia mensual. La primera visita, el 16 de enero de 2010, se efectuó como a una semana de iniciado el incendio; se hizo una caracterización general del lugar y se seleccionaron los puntos para la toma de las muestras de agua de la quebrada cerca de la zona afectada (muestra problema) y en la zona no afectada (muestra patrón); esta última zona se eligió unos 2 km aguas arriba antes de llegar a la zona afectada, cercana al foco de contaminación. Por otra parte, se desconoce la frecuencia con que ocurrieron estos eventos debido a que esta actividad era clandestina. Para recolectar las muestras de agua hubo dos jornadas de aforo, cada una con su respectivo plan de muestreo, a fin de obtener muestras

representativas; además, todas las muestras se conservaron y vigilaron de manera adecuada para garantizar la integridad y la cadena de custodia de las mismas. El primer muestreo se llevó a cabo el 13 de febrero (segunda visita) y el segundo el 13 de marzo (tercera visita) del mismo año. En cada muestreo se recolectaron dos muestras integradas de agua (patrón y problema); cada una formada por diez submuestras puntuales, tomadas de modo simultáneo en 10 puntos diferentes a la misma altura de la quebrada (sección transversal, figura 1), para obtener un volumen total de cuatro litros por muestra.

Las muestras se tomaron con base en las normas establecidas por la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Resolución núm. 4305, 2001), en las cuales se establecen el protocolo para la toma y preservación de muestras de agua. Cada muestra se identificó con la información necesaria, se rotuló como patrón o problema, y se llevó al laboratorio para su respectivo análisis.

Medición de parámetros fisicoquímicos

En el cuadro 1 se relacionan los parámetros fisicoquímicos evaluados y el método utilizado para su medición, de los cuales el oxígeno disuelto, temperatura, pH, color, turbiedad y conductividad fueron medidos *in situ*, el resto de parámetros se analizaron *ex situ*, en un laboratorio acreditado de la ciudad de Medellín, siguiendo las normas de APHA, AWWA y WEF para el análisis de aguas superficiales y aguas residuales. Los equipos usados para la medición de parámetros *in situ* fueron:

- Color: colorímetro marca Hanna, modelo HI 93727, dotado con una celda de vidrio de 10 ml.
- Turbiedad: turbidímetro marca Hanna, modelo LP 2000-11, dotado con una celda de vidrio de 10 ml.
- Conductividad: conductivímetro marca Hanna, modelo EC 214, dotado con un electrodo HI 76303.

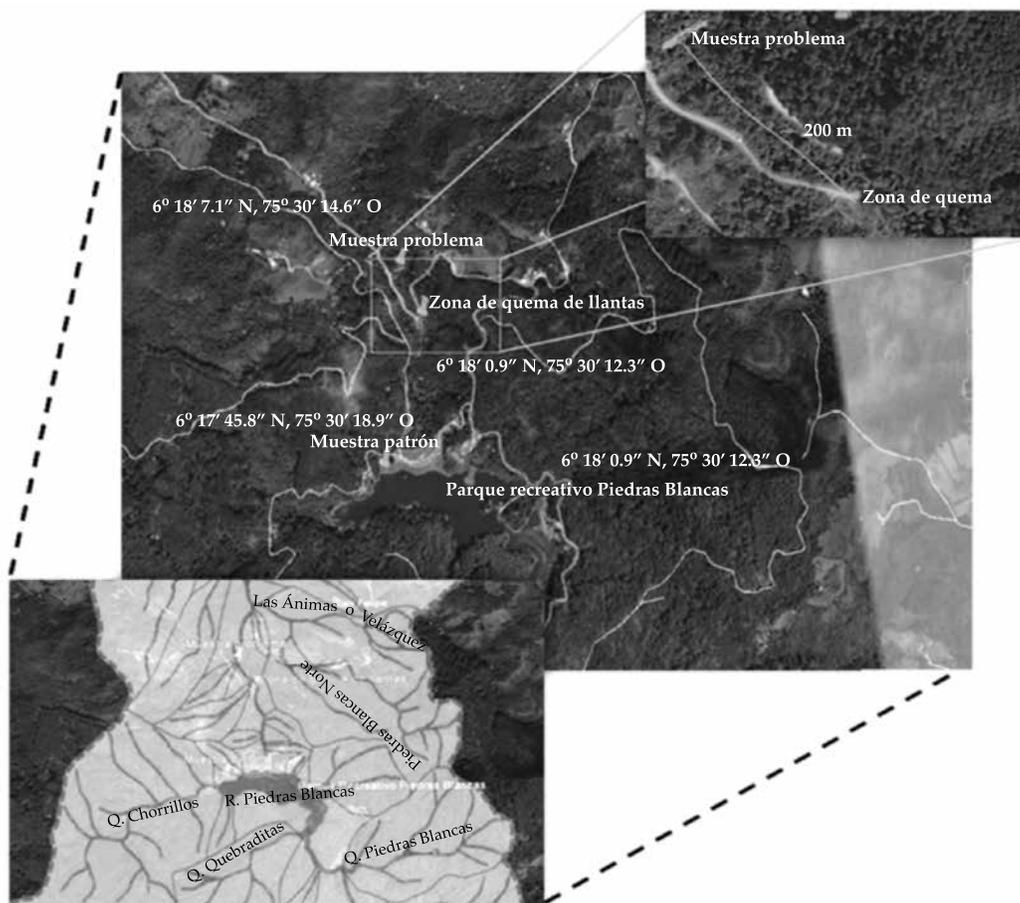


Figura 1. Localización del parque Piedras Blancas y puntos de muestreo. Parque Piedras Blancas: 6° 17' 42.41" N, 75° 30' 8.26" O. Zona de quema (6° 18' 0.88" N, 75° 30' 12.27" O). Muestra problema: 6° 18' 7.10" N, 75° 30' 14.58" O. Muestra patrón: 6° 17' 45.80" N, 75° 30' 18.93" O. Imagen tomada desde Google Earth y adaptada de Empresas Públicas de Medellín (1988).

- pH: peachímetro marca Thermo Scientific, OrionStar, serie BI9092, dotado con un electrodo Orion 9272BN.
- Oxígeno disuelto: marca Hanna, modelo HI 2400, dotado con una sonda HI 76407/2.

Todos los análisis se hicieron por triplicado y para cada variable se obtuvo un valor medio basado en los dos muestreos realizados. Como medidas de dispersión absoluta y relativa entre los dos muestreos efectuados se usaron la desviación estándar (S) y el coeficiente de variación relativa de Pearson (CV), respectivamente.

Evaluación de la calidad del recurso hídrico y del impacto ambiental causado por la quema de llantas

La evaluación de la calidad de las corrientes superficiales se realizó mediante el cálculo de los siguientes índices de calidad del agua:

Índice de calidad del agua en corrientes superficiales (ICA, 2014)

Corresponde a una expresión numérica agregada y simplificada, proveniente de la sumatoria aritmética equiponderada de los valores que

Cuadro 1. Parámetros fisicoquímicos evaluados y método aplicado.

Parámetro	Unidades	Método
Temperatura	°C	AWWA-4500H ⁺
Oxígeno disuelto (OD)	mg O ₂ /l	AWWA-4500O C
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg O ₂ /l	AWWA-5220 D
Demanda bioquímica de oxígeno total (DBO ₅)	mg O ₂ /l	AWWA-5210 B
Carbono orgánico total (COT)	mg O ₂ /l	AWWA-5310 B
Sólidos totales	mg/l	AWWA-2540 B
Sólidos totales volátiles	mg/l	AWWA-2540 E
Sólidos suspendidos totales	mg/l	AWWA-2540 D
Cobre total	mg Cu/l	AWWA-3500 Cu
Cromo ⁶⁺	mg Cr ⁶⁺ /l	AWWA-3500-Cr ⁶⁺ D
Cadmio total	mg Cd/l	AWWA-3500 Cd
Plomo total	mg Pb/l	AWWA-3500 Pb
Níquel total	mg Ni/l	AWWA-3500 Ni
Zinc total	mg Zn/l	AWWA-3500 Zn
Hierro total	mg Fe/l	AWWA-3500Fe-D
Mercurio total	mg Hg/l	AWWA-3112 B
Cobalto total	mg Co/l	AWWA-3111 B
Estaño total	mg Sn/l	AWWA-3111 D
Alcalinidad total	mg CaCO ₃ /l	AWWA-2320 B
Acidez total	mg CaCO ₃ /l	AWWA-2310 B
Color	UCP	AWWA-2120
Dureza total	mg CaCO ₃ /l	AWWA-2340 C
pH	Unidades de pH	AWWA-4500H ⁺
Conductividad	μS/cm	AWWA-2510 B
Turbiedad	UNT	AWWA-2130 B
Cloro residual libre	mg Cl ₂ /l	AWWA-4500-Cl B
Calcio total	mg Ca/l	AWWA-3500-Ca D
Fosfatos	mg PO ₄ ³⁻ /l	AWWA-4500-PO ₄ ³⁻ D
Manganeso total	mg Mn/l	AWWA-3500-Mn B
Molibdeno total	mg Mo/l	AWWA-3500-Mo B
Magnesio total	mg Mg/l	AWWA-3500-Mg B
Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ /l	AWWA-4500-SO ₄ ²⁻ E
Cloruros	mg Cl ⁻ /l	AWWA-4500-Cl ⁻ B
Nitratos	mg NO ₃ ⁻ /l	AWWA-4500-NO ₃ ⁻ B
Nitritos	mg NO ₂ ⁻ /l	AWWA-4500-NO ₂ ⁻ B
Aluminio (Al ³⁺)	mg Al ³⁺ /l	AWWA-3500-Al ³⁺ D
Fluoruros	mg F ⁻ /l	AWWA-4500-F ⁻ C
Coliformes totales (con colilert), nmp	NMP/100 ml	AWWA-9223 B
Coliformes fecales (con colilert), nmp	NMP/100 ml	AWWA-9223 B
<i>Escherichia coli</i> (con colilert), nmp	NMP/100 ml	AWWA-9223 B
Surfactantes	mg SAAM/l	AWWA-5540 C
Fenoles	mg Fenoles/l	AWWA-5530 B, D
Arsénico total	mg As/l	AWWA-3114 C
Plata total	mg Ag/l	AWWA-3111 B

se obtienen al medir la concentración de cinco variables fisicoquímicas básicas (oxígeno disuelto, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno, conductividad y pH) en una estación de monitoreo, para evaluar la calidad del agua en corrientes superficiales. Los valores calculados del indicador se compararon con los establecidos en tablas de interpretación, permitiendo clasificar la calidad del agua de forma descriptiva en una de cinco categorías (buena, aceptable, regular, mala o muy mala), que a su vez se asocia con un determinado color (azul, verde, amarillo, naranja y rojo, respectivamente). El ICA se calculó usando la ecuación (1), donde W_i es el peso relativo asignado a la variable de calidad i ; I_{ikjt} el valor calculado de la variable i , y 5 es el número de variables de calidad involucradas en el cálculo del indicador (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, 2013):

$$ICA_{njt} = \left(\sum_{i=1}^5 W_i \times I_{ikjt} \right) \quad (1)$$

Índice de calidad del agua de la fundación nacional de saneamiento (INSE, 1978)

Utilizado para supervisar la calidad de los ríos a través del tiempo y comparar aguas de abastecimiento en Estados Unidos y muchos países del mundo (Samboni, Carvajal, & Escobar, 2007). El INSE se calculó usando la ecuación (2), donde SI_i es la escala de calidad del subíndice de la variable i y W_i es el peso ponderado del subíndice i . Las curvas para la determinación del valor del subíndice SI_i se tomaron de Fernández y Solano (2005):

$$INSE = \left(\sum_{i=1}^9 SI_i \times W_i \right) \quad (2)$$

Índice de calidad del agua de Dinius (1987)

El índice de calidad de Dinius está orientado al análisis de aguas destinadas a ser empleadas como fuente de captación para consumo humano. Considera cinco usos del recurso: consumo

humano, agricultura, pesca y vida acuática, industrial y recreación (Castro, Almeida, Ferrer, & Díaz, 2014; Dinius, 1987). Las funciones de los subíndices y ponderaciones de los parámetros del índice de Dinius se tomaron de Dinius (1987). Este índice se determinó con base en la ecuación (3), donde I_i es la escala de calidad del subíndice de la variable i (un número entre 0 y 100) y W_i es el peso ponderado de la variable i (un número entre 0 y 1, y $\sum_{i=1}^{12} W_i = 1$):

$$Dinius = \prod_{i=1}^{12} I_i^{W_i} \quad (3)$$

En el cuadro 2 se muestran las variables involucradas en el cálculo de cada índice y la ponderación respectiva dentro de la fórmula de cálculo. Además, en el cuadro 3 se describen los intervalos de calidad y las señales de alerta (colores) establecidos para la interpretación general de cada índice de calidad del agua.

Para determinar el grado del impacto ambiental producido por la quema de llantas sobre las propiedades fisicoquímicas del agua de la quebrada, primero se compararon los valores obtenidos para la muestra patrón con la muestra problema; luego, los valores obtenidos para la muestra problema se confrontaron con los valores máximos aceptables reportados en la normatividad ambiental colombiana para la destinación del recurso hídrico para uso humano y doméstico, preservación de flora y fauna, y uso con fines recreativos, pecuario y agrícola de acuerdo con los criterios de calidad admisibles establecidos en el Decreto 1594 del 26 de junio de 1984, Decreto 3930 del 25 octubre de 2010 y la Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015.

Resultados y discusión

En el cuadro 4 se muestra el valor medio obtenido después de realizar el análisis para cada una de las variables fisicoquímicas evaluadas para la muestra patrón y la muestra problema. Además, se encuentran los valores máximos aceptables contemplados por la normatividad

Cuadro 2. Variables y ponderación para cada uno de los índices de calidad del agua.

Parámetro	Dinius (1987)	INSF (1978)	ICA (2014)
Temperatura	0.077	0.10	
Oxígeno disuelto (OD)	0.109	0.17	0.2
Demanda química de oxígeno (DQO)	0.097	0.11	0.2
Sólidos totales		0.07	
Sólidos suspendidos totales			0.2
Alcalinidad total	0.063		
Color	0.063		
Dureza total	0.065		
pH	0.077	0.11	
Conductividad	0.079		0.2
Turbiedad		0.08	
Fosfatos		0.1	
Cloruros	0.074		
Nitratos	0.09		
Coliformes totales (con colilert)	0.09		
Coliformes fecales (con colilert)		0.16	
<i>Escherichia coli</i> (con colilert)	0.116		

Cuadro 3. Intervalos de calidad y las señales de alerta establecidos para la interpretación general de cada índice de calidad del agua.

Dinius (1987)		INSF (1978)		ICA (2014)		Señal de alerta
Categoría	Calidad	Categoría	Calidad	Categoría	Calidad	
91-100	Excelente	91-100	Excelente	0.91-1.00	Buena	Azul
81-90	Buena	71-90	Buena	0.71-0.90	Aceptable	Verde
51-80	Regular	51-70	Regular	0.51-0.70	Regular	Amarillo
41-50	Mala	26-50	Mala	0.26-0.50	Mala	Naranja
0-40	Muy mala	0-25	Muy mala	0.00-0.25	Muy mala	Rojo

ambiental colombiana para la destinación del recurso para uso humano y doméstico (HD^a: que para su potabilización requiere sólo tratamiento convencional; HD^b: que para su potabilización requiere sólo desinfección); preservación de flora y fauna (FF), y fines agrícola (AG) y pecuario (PC). Los valores obtenidos para la desviación estándar y el coeficiente de variación en la mayoría de los parámetros fisicoquímicos evaluados en los dos muestreos tanto para la muestra patrón como para la muestra problema fueron $S \leq 4.5$ y $CV \leq 3.2\%$, respectivamente. Estos bajos valores reflejan que no hubo cambios

muy significativos entre los dos muestreos realizados. No obstante, para la dureza, turbiedad, conductividad y color, los valores obtenidos para la desviación estándar y el coeficiente de variación superaron el 7 y 6%, respectivamente. El comportamiento disímil en estas variables se pudo deber al arrastre de sedimentos ocasionado por la precipitación que aumentó en el mes de marzo (segundo muestreo) con respecto al mes de febrero (primer muestreo).

En el cuadro 5 se muestran los valores promedio obtenidos para los índices de calidad del agua evaluados. Se observa que de acuerdo con

Cuadro 4. Valores medio para los parámetros físicoquímicos evaluados en la muestra patrón y la muestra problema. NC: parámetro no contemplado en la norma; ND: parámetro no detectable; S: desviación estándar; CV: coeficiente de variación relativa de Pearson.

Parámetro/unidad	Muestra patrón	Muestra problema	S (%)	CV (%)	Valor máximo aceptable según su uso				
					HD ^a	HD ^b	FF	AG	PC
Temperatura (°C)	16.5	18.5	0.7	1.5	NC	18-30	NC	NC	NC
Oxígeno disuelto (mg O ₂ /l)	7.5	4.6	0.5	0.8	NC	NC	NC	NC	NC
DQO (mg O ₂ /l)	4.8	125.5	0.2	1.4	NC	NC	NC	NC	NC
DBO ₅ total (mg O ₂ /l)	3.7	50.2	0.5	2.0	NC	NC	NC	NC	NC
COT (mg O ₂ /l)	8.6	23.4	0.3	0.9	NC	NC	NC	NC	NC
Relación DBO ₅ /DQO	0.77	0.40	0.1	0.7	NC	NC	NC	NC	NC
Relación DBO ₅ /COT	0.43	2.14	0.2	0.7	NC	NC	NC	NC	NC
Sólidos totales (mg/l)	49.5	2759.5	0.1	0.5	NC	NC	NC	NC	NC
Sólidos totales volátiles (mg/l)	15.5	344.0	0.2	0.6	NC	NC	NC	NC	NC
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	3.7	286.5	0.5	0.5	NC	NC	NC	NC	NC
Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /l)	17.9	90.2	0.6	1.1	NC	NC	NC	NC	NC
Acidez total (mg CaCO ₃ /l)	< 10.0	637.5	0.4	1.3	NC	NC	NC	NC	NC
Color (UCP)	91.2	1 595.0	9.5	6.5	75.0	20.0	NC	NC	NC
Dureza total (mg CaCO ₃ /l)	15.4	1 515.0	10.5	7.4	NC	NC	NC	NC	NC
pH (unidades de pH)	6.8	6.6	0.5	1.5	5.0-9.0	6.5-8.5	6.5-9.0	4.0-9.0	NC
Conductividad (µS/cm)	72.9	2 174.9	15.4	8.7	NC	NC	NC	NC	NC
Turbiedad (UJT)	14.9	234.9	7.5	9.5	NC	10.0	NC	NC	NC
Cobre total (mg Cu/l)	< 0.050	52.8	0.1	1.7	1.0	1.0	0.1Cl ₅₀ ⁹⁶	2.0	0.5
Cromo ⁶⁺ (mg Cr ⁶⁺ /l)	< 0.050	14.0	0.4	1.8	0.05	0.05	0.01Cl ₅₀ ⁹⁶	0.1	1.0
Cadmio total (mg Cd/l)	< 0.003	20.8	0.5	1.7	0.01	0.01	0.01Cl ₅₀ ⁹⁶	0.01	0.05
Plomo total (mg Pb/l)	< 0.010	63.0	0.2	1.9	0.05	0.05	0.01Cl ₅₀ ⁹⁶	5.0	0.1
Níquel total (mg Ni/l)	< 0.010	32.5	0.7	2.0	NC	NC	0.01Cl ₅₀ ⁹⁶	0.2	NC
Zinc total (mg Zn/l)	< 0.050	373.5	0.7	2.0	15.0	15.0	0.01Cl ₅₀ ⁹⁶	2.0	25.0
Hierro total (mg Fe/l)	1.7	75.0	0.7	1.7	NC	NC	0.1Cl ₅₀ ⁹⁶	5.0	NC
Mercurio total (mg Hg/l)	< 0.001	3.2	0.6	1.6	0.002	0.002	0.01Cl ₅₀ ⁹⁶	NC	0.01
Cobalto total (mg Co/l)	< 0.010	5.6	0.5	1.5	NC	NC	NC	0.05	NC
Estaño total (mg Sn/l)	< 0.010	10.5	0.4	0.8	NC	NC	NC	NC	NC
Cloro residual libre (mg Cl ₂ /l)	ND	ND	0.5	0.9	NC	NC	0.1Cl ₅₀ ⁹⁶	NC	NC
Calcio total (mg/l)	ND	ND	3.5	2.5	NC	NC	NC	NC	NC
Fosfatos (mg PO ₄ ³⁻ /l)	0.035	0.042	3.8	1.5	NC	NC	NC	NC	NC
Manganeso total (mg Mn/l)	< 0.010	0.038	4.5	2.8	NC	NC	0.1Cl ₅₀ ⁹⁶	0.2	NC
Molibdeno total (mg Mo/l)	< 0.010	0.014	2.6	2.6	NC	NC	NC	0.01	NC
Magnesio total (mg Mg/l)	ND	ND	2.4	1.9	NC	NC	0.1 Cl ₅₀ ⁹⁶	NC	NC
Sulfatos (mg SO ₄ ²⁻ /l)	< 10.00	25.7	4.2	2.9	400.0	400.0	NC	NC	NC
Cloruros (mg Cl ⁻ /l)	ND	ND	0.2	2.8	250.0	250.0	NC	NC	NC
Nitratos (mg NO ₃ ⁻ /l)	< 1.50	6.55	0.8	1.8	10.0	10.0	NC	NC	90
Nitritos (mg NO ₂ ⁻ /l)	< 0.003	2.89	1.8	2.3	1.0	1.0	NC	NC	10
Aluminio (Al ³⁺) (mg Al ³⁺ /l)	ND	ND	1.9	3.0	NC	NC	NC	5.0	5.0
Fluoruros (mg F ⁻ /l)	ND	ND	2.5	1.2	NC	NC	NC	NC	NC

Cuadro 4 (continuación). Valores medio para los parámetros fisicoquímicos evaluados en la muestra patrón y la muestra problema. NC: parámetro no contemplado en la norma; ND: parámetro no detectable; S: desviación estándar; CV: coeficiente de variación relativa de Pearson.

Parámetro/unidad	Muestra patrón	Muestra problema	S (%)	CV (%)	Valor máximo aceptable según su uso				
					HD ^a	HD ^b	FF	AG	PC
Coliformes totales (NMP/100 ml)	11 199	24 196	1.7	3.2	20 000	1 000	NC	NC	NC
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	6 908	15 498	1.7	3.2	2 000	NC	NC	NC	NC
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 ml)	63.0	148	0.6	0.8	NC	NC	NC	NC	NC
Surfactantes (mg SAAM/l)	< 0.100	5.78	0.3	0.1	0.5	0.5	0.143 Cl ₅₀ ⁹⁶	NC	NC
Fenoles (mg fenoles/l)	< 0.050	4.430	0.9	2.8	0.002	0.002	1.0 Cl ₅₀ ⁹⁶	NC	NC
Arsénico total (mg As/l)	< 0.002	0.03	3.5	1.3	0.05	0.05	0.1 Cl ₅₀ ⁹⁶	0.1	0.2
Plata total (mg Ag/l)	< 0.100	7.2	4.2	2.3	0.05	0.05	0.01 Cl ₅₀ ⁹⁶	NC	NC

Cuadro 5. Resultados de los índices de calidad del agua para la muestra patrón y problema.

Muestra	Dinius (1987)		INSF (1978)		ICA (2014)	
	Valor	Calidad	Valor	Calidad	Valor	Calidad
Patrón	94.2	Excelente (azul)	64.7	Regular (amarillo)	0.88	Aceptable (verde)
Problema	58.9	Regular (amarillo)	40.6	Mala (naranja)	2.74	Muy mala (roja)

el índice de Dinius (1987), la calidad del agua de la muestra patrón es excelente, esto significa que el recurso hídrico puede ser destinado al abastecimiento público. No obstante, a partir de los resultados obtenidos para los índices INSF (1978) e ICA (2014), la misma muestra de agua presenta una calidad regular y aceptable, respectivamente. Por otro lado, los valores obtenidos para los índices de calidad del agua de la muestra problema revelan una tendencia similar en cuanto a la calidad del recurso hídrico (regular, mala y muy mala para Dinius, INSF y ICA, respectivamente), reflejando de forma inequívoca un deterioro significativo en la calidad del agua.

Es importante aclarar que la aplicación de los diferentes índices de calidad del agua busca simplificar una gran cantidad de datos para analizar fácilmente el recurso hídrico y proporcionar una visión general de los fenómenos medioambientales. Además, la asignación de mayor importancia a algunos parámetros o no considerar otros en el cálculo de un índice de

calidad y en otros sí puede conllevar a obtener información diferente sobre la calidad del recurso hídrico. Por lo tanto, su interpretación no puede ser generalizada, pues se podría terminar realizando juicios subjetivos; así, no se puede evaluar la dinámica del recurso hídrico bajo un solo indicador, por lo que es importante también el estudio de cada variable fisicoquímica y microbiológica de manera individual. A continuación se hará un análisis más detallado y profundo de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, a fin de evitar el uso de juicios subjetivos.

En la figura 2 se muestran algunas fotos de los alrededores de la zona afectada por la quema de llantas. En ellas se puede visualizar el efecto directo producido por este fenómeno sobre el aspecto físico y estético del agua y del suelo, lo cual cambió notablemente su presentación, en especial debido a la turbidez rojiza y negra que se puede observar a simple vista y que permite inferir que las muestras analizadas poseen un alto contenido de hierro y de negro de humo,

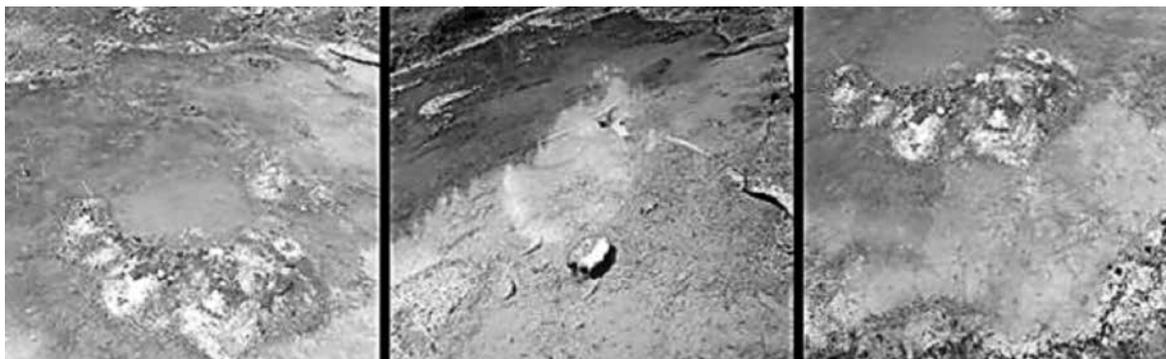


Figura 2. Registro fotográfico de la zona de muestreo afectada por la quema de llantas.

procedentes de la combustión de las llantas, y que generan este aspecto generalmente en las aguas y suelos (Van de Lindt *et al.*, 2008; Shu, Zhen, Zhen, Kaushik, & Jin, 2010).

Al comparar los valores medios obtenidos para la muestra problema con los de la muestra patrón se puede observar un aumento significativo en los siguientes parámetros fisicoquímicos de la muestra problema: DQO, DBO₅, COT, oxígeno disuelto, sólidos totales, sólidos totales volátiles, sólidos suspendidos, cobre total, cromo (VI), cadmio total, plomo total, níquel total, zinc total, hierro total, estaño total, mercurio total, cobalto total, plata total, alcalinidad total, acidez total, sulfatos, nitratos, nitritos, coliformes totales y fecales, *Escherichia coli*, surfactantes, fenoles, color, dureza total, conductividad y turbiedad. La variación en los valores de estas características permite evidenciar el fuerte impacto ambiental producido por la quema de llantas sobre varias propiedades fisicoquímicas de las aguas de la quebrada Piedras Blancas. No obstante, parámetros como temperatura, pH, cloro residual libre, calcio total, fosfatos, manganeso total, molibdeno total, magnesio total, cloruros, fluoruros, aluminio y arsénico total no tuvieron una alteración significativa.

Uno de los indicadores más importantes de la calidad del agua es el oxígeno disuelto (OD), el cual corresponde a un valor de 7.5 y 4.6 mg/l para la muestra patrón y problema,

respectivamente. El valor de OD para la muestra patrón está dentro de los valores normales de oxígeno establecidos para aguas naturales (7.0-8.0 mg/l), lo cual permite suponer que no existe una contaminación preocupante aguas arriba y alejadas de la zona de la quema de llantas; además, los datos obtenidos son coherentes con los reportados por Posada *et al.* (2000), quienes encontraron una concentración de OD igual a 7.3 mg/l en aguas de la misma cuenca, correspondiente a aguas de óptima calidad. En cuanto al OD en la muestra problema, su valor disminuyó en un 61% con respecto al obtenido para la muestra patrón; esta baja probablemente se deba a la contaminación de naturaleza orgánica proveniente de los materiales constituyentes de las llantas, como compuestos orgánicos volátiles, hidrocarburos policíclicos aromáticos, dioxinas, furanos y bifenilos policlorados, entre otros (Bouvier & Gelus, 1986; Turner, 1985), los cuales aportan gran cantidad de materia orgánica confirmada por los altos valores obtenidos para la DBO₅ y COT relacionados en el cuadro 4.

Por otro lado, el aumento en las variables bacteriológicas en la muestra problema (coliformes totales: 24 196 NMP/100 ml y coliformes fecales: 15 498 NMP/100 ml) con respecto a la muestra patrón (coliformes totales: 11199 NMP/100 ml y coliformes fecales: 6 908 NMP/100 ml) deben su origen probablemente

a las heces fecales de humanos y animales, pues la muestra problema se tomó en un lugar muy cercano a un sitio donde el turismo local es constante.

Un parámetro generalmente utilizado para identificar la biodegradabilidad de los diversos contaminantes presentes en las diferentes clases de aguas es la relación de biodegradabilidad DBO_5/DQO , la cual permite determinar qué cantidad de la DQO (materia orgánica e inorgánica) contenida en una muestra de agua es susceptible de ser depurada por los microorganismos en cinco días (DBO_5). En el cuadro 6 se especifican algunos criterios que permiten determinar el carácter de biodegradabilidad de los contaminantes presentes en el recurso hídrico (Ardila, Arriola, Reyes, Berrío, & Fuentes, 2016).

Las relaciones DBO_5/DQO (0.77) y DBO_5/COT (0.43) obtenidas para la muestra patrón demuestran el carácter biodegradable de las sustancias presentes en dicha agua, las cuales probablemente se deben a la materia orgánica e inorgánica inherente de los ecosistemas acuáticos. Por el contrario, la baja relación DBO_5/DQO (0.40) obtenida para la muestra problema refleja el alto contenido de contaminación de naturaleza orgánica presente en las aguas de la quebrada cercanas a la zona afectada. Además, el alto valor obtenido para la relación DBO_5/COT (2.44) indica la no biodegradable de dichos contaminantes. Estos datos sugieren el hecho de que la quema de llantas aporta al recurso hídrico gran cantidad de compuestos y desechos orgánicos de diferente naturaleza de poca biodegradabilidad (Fei, Fang, Wei, Baoshan, & Lingyan, 2011). Esto puede ser soportado con el dato obtenido en la muestra problema para compuestos fenólicos (4.430 mg/l). Además,

diferentes investigaciones también han encontrado diversos contaminantes peligrosos, por ejemplo, Best y Brookes (1981) identificaron materiales fenólicos, hidrocarburos aromáticos (benceno, naftaleno, fenantreno) y cetonas como resultado de la pirolisis del caucho de los neumáticos. Por otro lado, Morten *et al.* (2007), al hacer el análisis elemental de diferentes muestras de neumáticos, encontraron que un 82 wt. % de cada muestra correspondía a carbono; 6.71 wt. %, a hidrógeno; 1.35 wt. %, a azufre; 0.32 wt. %, a nitrógeno, y el resto a oxígeno.

De igual manera, Zhendi, Labert, Li y Chun (2007) caracterizaron diferentes muestras de aguas afectadas por la combustión de neumáticos y encontraron cantidades significativas de hidrocarburos aromáticos policíclicos: en total, 165 compuestos, incluyendo 13 isómeros de peso molecular (PM) 32, 10 isómeros de PM 278, 10 isómeros de PM 276, siete isómeros de PM 252, siete isómeros de PM 228 y ocho isómeros de PM 216. También se identificaron numerosos hidrocarburos policíclicos que contenían átomos de S, N y Cl. De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, los hidrocarburos aromáticos policíclicos son denominados contaminantes prioritarios debido a su amplia distribución en el ambiente, y por sus propiedades mutagénicas, carcinogénicas y teratogénicas (Zhendi *et al.*, 2007; Prashant *et al.*, 2011).

El alto valor obtenido para la conductividad en la muestra problema (2 174.9 $\mu S/cm$) representa un incremento de un 29.83% con respecto a la muestra patrón, lo cual indica que los materiales depositados en la muestra problema le proporcionan una mineralización excesiva a las aguas analizadas, un hecho preocupante

Cuadro 6. Criterios de biodegradabilidad según la relación DBO_5/DQO . Ardila, A. N., Reyes, C. J., Arriola, V. E., & Hernández, J. A., 2012; Aziz, J. A., & Tebbutt T. H., 1980).

DBO_5/DQO	Carácter
> 0.8	Muy biodegradable
0.7-0.8	Biodegradable
0.3-0.7	Poco biodegradable
< 0.3	No biodegradable

cuando se trata de fuentes de agua para suministro de agua potable a la comunidad. Por ejemplo, según el Artículo 3 de la Resolución 2115 de 2007, el valor máximo aceptable para la conductividad puede ser hasta 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Un incremento de los valores habituales de la conductividad superior al 50% en el agua de la fuente indica un cambio sospechoso en la cantidad de sólidos disueltos, y su procedencia debe ser investigada de inmediato por las autoridades sanitarias y ambientales competentes. Asimismo, en relación con la dureza, el valor determinado para la muestra problema (1 515.0 mg CaCO_3/l) permite catalogar las aguas analizadas como aguas difícilmente utilizables cuando se trata de aguas potables o de uso doméstico. De igual forma, el incremento en los valores del resto de parámetros fisicoquímicos de la muestra problema, como color, alcalinidad total, acidez total y turbiedad son otra evidencia del deterioro significativo de estas fuentes de aguas, convirtiéndolas en una fuente de agua potable de difícil tratamiento y con alto poder de contaminación de los demás cuerpos de agua.

De acuerdo con los datos obtenidos para la mayoría de parámetros fisicoquímicos de la muestra patrón, se puede afirmar que el recurso hídrico aguas arriba de la zona afectada por la quema de llantas no presenta un grado de contaminación alto; además, con base en los rangos normales para aguas naturales, puede concluirse que las aguas del parque Piedras Blancas alejadas de la zona afectada se encuentran en general en buen estado y se ajustan a la clasificación de oligo-mesotróficas (Posada *et al.*, 2000). Por otro lado, de los resultados obtenidos para la muestra problema se puede deducir que el proceso de quemar llantas aporta no sólo al agua, sino también al suelo, altos contenidos de metales pesados, como cobre, cromo, cadmio, zinc, plomo, hierro y níquel, los cuales, en estas cantidades, pueden llegar a ser peligrosos para el hombre, animales y plantas (Renan & Fukuya, 2010; Fei *et al.*, 2011). Según Conesa, Gálvez, Mateos, Martín-Gullón y Font (2008), estos contaminantes provenientes de la combustión de las llantas se trasladan a los suelos,

vegetación, agua, etcétera. Por consiguiente, la salud humana puede verse afectada de forma indirecta a través de distintas vías, como la ingesta de alimentos contaminados, consumo de agua potable o agua subterránea, y absorción oral o cutánea de las sustancias químicas existentes en los suelos. En cuanto a la cantidad de sólidos totales presentes en la muestra problema, se observa un aumento 55.7 veces mayor que el valor determinado para la muestra patrón, lo cual refleja el alto contenido de desechos sólidos, producto de la combustión de las llantas. Además, el incremento en el contenido de sólidos suspendidos es coherente con la alta turbidez observada en el agua. Asimismo, la cantidad determinada para los sólidos volátiles es una evidencia más de la naturaleza orgánica de los sólidos presentes en la muestra problema (Colin, 1990).

Según Conesa *et al.* (2008), no todos los metales pesados son tóxicos y no todos los metales pesados tóxicos tienen la misma toxicidad; por tanto, los metales pesados se pueden agrupar en las siguientes clases de acuerdo con su toxicidad:

Clase I: Cd, Hg, Ti

Clase II: As, Co, Ni, Se, Te

Clase III: Pb, Cr, Cu, Pt, V, Sn, Pd, Sb, Mn, Rh

Donde los metales pesados de la clase I son más tóxicos y nocivos que los de la clase III. A partir de lo anterior, la muestra problema está contaminada con metales pesados de diferente toxicidad. Así, cadmio y mercurio pertenecen a la clase I; cobalto y níquel a la clase II; plomo, cromo, cobre y estaño a la clase III. Además, aunque metales pesados como hierro, zinc y plata no están contemplados en dicha clasificación, los altos niveles hallados (75, 373.5 y 7.2 mg/l, respectivamente) demuestran que también tales metales representan un problema de contaminación de gran magnitud, pues la concentración en que se encuentran los hace altamente peligrosos y perjudiciales para los seres vivos y el medio ambiente (Edward *et al.*, 2010).

Por otro lado, al comparar los valores medios obtenidos para los parámetros fisicoquímicos de

la muestra problema con los valores máximos aceptables contemplados en la normatividad ambiental colombiana para la destinación del recurso hídrico para uso humano y doméstico, que para su potabilización requiere solamente tratamiento convencional o desinfección, se identificó que la muestra problema analizada no cumple con dichos criterios, pues excede los límites en los valores establecidos para cobre, cromo, cadmio, plomo, zinc y mercurio. En el cuadro 5 se puede observar que los valores de estos parámetros superan mucho más del doble los valores límites reportados en la norma para cada caso. Los fenoles también superan el valor límite definido (0.002 mg/l), haciendo prioritario su control en los sistemas de tratamiento de agua, además de requerir tratamientos adicionales al convencional, con el fin de reducir de manera eficiente la presencia de compuestos fenólicos y metales pesados en el agua.

Además, al confrontar los valores de las características fisicoquímicas de la muestra problema con los valores establecidos en la norma ambiental colombiana como límites para destinar el recurso hídrico para la preservación de flora y fauna, se identificó que los niveles hallados para cobre, cromo, cadmio, plomo, níquel, zinc, hierro y mercurio superan la concentración letal de cada elemento, que produce la muerte al 50% de los organismos sometidos a bioensayos en un periodo de 96 horas (Cl_{50}^{96}). Asimismo, los valores obtenidos para cobre, cromo, cadmio, plomo, níquel, zinc, hierro, mercurio y cobalto exceden a los reportados en la normatividad para destinar el recurso para fines agrícola y pecuario. Por último, en la normatividad colombiana no se establecen valores específicos para destinar el recurso hídrico a fines recreativos (por ejemplo, contacto primario).

De acuerdo con la literatura, el proceso de combustión de llantas puede incrementar las emisiones de compuestos como dioxinas, mercurio, hidrocarburos y poliaromáticos, así como metales pesados como plomo, zinc, níquel y vanadio (Renan & Fukuya, 2010; Chitsan, Chun-Lan, & Chien-Chuan, 2008). Es sabido que estos contaminantes causan cáncer, malformaciones

congénitas, diabetes, y efectos adversos en los sistemas hormonal, inmunológico y nervioso central, al igual que problemas en los pulmones, entre otros (Pawan, Pratima, Chirika, & Pradeep, 2008; Zhendi *et al.*, 2007). Los contaminantes provenientes de la combustión de neumáticos, como los HAPs, pueden estar presentes en la fase gaseosa o asociados con partículas, y a través de las corrientes de aire se favorece su dispersión a grandes distancias, por lo que se han detectado en agua y suelo en sitios alejados de la fuente que los generó. Las propiedades físicas y químicas de los HAPs de bajo peso molecular (de 2 a 3 anillos aromáticos) hacen de ellos candidatos ideales para su dispersión a través de la atmósfera. En cambio, los HAPs de mayor peso molecular (de 4 a 7 anillos aromáticos) tienen mayor afinidad por el material particulado, como cenizas, y con la materia orgánica del suelo, siendo más persistentes en el ambiente (Wilcke, Krauss, Safronov, Fokin, & Kaupenjohann, 2005; Wilcke, 2007). Estos contaminantes, al llegar a las aguas y suelos de los diferentes ecosistemas, afectan su estabilidad, interfiriendo en el buen desarrollo de los ciclos biogeoquímicos y alterando las cadenas alimenticias.

Los resultados obtenidos en la presente investigación revelan, sin duda alguna, que se está frente a una situación grave y muy preocupante de contaminación hídrica producida por la quema de llantas, actividad realizada de manera constante en los alrededores del parque ecológico Piedras Blancas. Esta contaminación puede tener efectos negativos sobre la salud de la población aledaña, producto de la deposición de materiales tóxicos que contaminan no sólo el agua, sino también aire y suelo, lo que debería ser tomando en cuenta por las autoridades competentes, sobre todo cuando este lugar es una de las principales cuencas que suministra el agua para potabilización de la ciudad de Medellín.

Conclusiones

Los productos de la combustión de las llantas afectaron la mayoría de los parámetros fisicoquímicos evaluados en las aguas de la quebrada

Piedras Blancas, excediendo los valores máximos aceptables establecidos por la normatividad ambiental colombiana para los diferentes destinos del agua (uso humano y doméstico; preservación de fauna y flora; uso agrícola, pecuario y recreativo).

El análisis comparativo de la aplicación de los índices de calidad del agua (ICA, INSF y Dinius) reveló un deterioro significativo del recurso hídrico del parque Piedras Blancas. Debido a la quema de llantas llevada a cabo alrededor de la cuenca, la calidad del agua está entre regular y muy mala, haciendo necesario su tratamiento para consumo humano, e incluso la incorporación de tratamientos específicos, a fin de lograr la remoción de contaminantes peligrosos, como metales pesados y compuestos fenólicos.

La selección de las variables, la determinación de los subíndices para cada parámetro y la elección de la fórmula de agregación en cada índice de calidad del agua es diferente. Por lo tanto, su interpretación no puede ser generalizada, pues se podría terminar realizando juicios subjetivos. Así, no es posible evaluar la dinámica del recurso hídrico bajo un solo indicador; es importante también el estudio de cada variable fisicoquímica y microbiológica de forma individual.

Es esencial determinar mecanismos para evitar el impacto ambiental negativo producido por la quema de llantas sobre las propiedades fisicoquímicas de las aguas, recurso natural indispensable para la preservación de todo tipo de vida y, además, básico del ecosistema acuático en el que se desarrollan una serie de comunidades vivas, que dependen de las características fisicoquímicas del mismo.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid por la financiación del presente proyecto de investigación, y a los estudiantes del Semillero de Investigación en Gestión Sostenible del Recurso Hídrico del Grupo de Investigación en Química Básica y Aplicada por su colaboración durante las jornadas de muestreo y aforo.

Referencias

- Adhikari, B., & Maiti, D. S. (2000). Reclamation and recycling of waste rubber. *Progress in Polymer Science*, 25(7), 909-948, DOI: 10.1016/S0079-6700(00)00020-4.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2008). *Capacitación, valoración económica y diseño de guías sobre residuos sólidos para el sector comercial y de servicios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, llantas usadas en el Valle de Aburrá*. Medellín: Universidad Colombia: Pontificia Bolivariana y Grupo de Investigaciones Ambientales
- Ardila, A. N., Arriola, V. E., Reyes, C. J., Berrio, M. E., & Fuentes, Z. G. (2016). Mineralización de etilenglicol por foto-fenton asistido con ferrioxalato. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(2), 213-226, DOI: <http://dx.doi.org/10.20937/RICA.2016.32.02.07>.
- Ardila, A. N., Reyes, C. J., Arriola, V. E., & Hernández, J. A. (2012). Remoción fotocatalítica de DQO, DBO5 y COT de efluentes de la industria farmacéutica. *Revista Politécnica*, 8(15), 9-17.
- Aziz, J. A., & Tebbutt T. H. (1980). Significance of COD, BOD and TOC correlations in kinetic models of biological oxidation. *Water. Research*, 14(4), 319-324, DOI: 10.1016/0043-1354(80)90077-9.
- Best, G. A., & Brookes, B. I. (1981). Water pollution resulting from a fire at a tyre dump. *Environmental Pollution*, 2(1), 59-67, DOI: 10.1016/0143-148X(81)90008-2.
- Bouvier, J. M., & Gelus, M. (1986). Pyrolysis of rubber wastes in heavy oils and use of the products. *Resources and Conservation*, 12(2), 17-93, DOI: 10.1016/0166-3097(86)90019-2.
- Bulent, Y., Yusuf, I., & Paki, T. (2009). Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces. *Construction and Building Materials*, 23(5), 1878-1882, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2008.09.014.
- Cantanhede, A., & Monge, G. (2002). *Estado del arte del manejo de llantas usadas en las ameritas, Lima, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. División de Salud y Ambiente*. Lima: Organización Panamericana de Salud. Oficina Sanitaria Panamericana, Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud.
- Castro, M., Almeida, J., Ferrer, J., & Díaz, D. (2014). Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencias a nivel mundial. *Revista Ingeniería Ambiental*, 10(17), 111-124, DOI: <http://dx.doi.org/10.16925/in.v9i17.811>.
- Chitsan, L., Chun-Lan, H., & Chien-Chuan, S. (2008). Recycling waste tire powder for the recovery of oil spills. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(10), 1162-1166, DOI: 10.1016/j.resconrec.2008.06.003.
- Colin, A. C. (1990). Energy recovery from burning municipal solid wastes: a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 4, 77-103, DOI: 10.1016/0921-3449(90)90035-3.
- Conesa, J. A., Gálvez, A., Mateos, F., Martín-Gullón, I., & Font, R. (2008). Organic and inorganic pollutants from

- cement kiln stack feeding alternative fuels. *Journal of Hazardous Materials*, 158(2-3), 585-592, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.01.116.
- Convenio 397 de 2009 Subdirección Ambiental (2011). Red de Monitoreo Ambiental en la Cuenca Hidrográfica del Río Aburrá en Jurisdicción del Área Metropolitana - Fase III (p. 191). Medellín: Red Río Aburrá Medellín, Área Metropolitana.
- Benjumea-Hoyos, C. A., Arango, G. A., Barros-Martínez, J. F., Vallejo-Giraldo, L. E., Arroyave-Maya, M. P., Gutiérrez, M. E., Villegas-Palacio, J. C., Montoya-Jaramillo, L. J., Botero-Hernández, B. A., Ríos-Arango, J. A., & Benjumea-Hernández, M. (2012). *Actualización del estado del arte del recurso hídrico en el departamento de Antioquia 2010-2012*. Antioquia, Colombia: Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia.
- Decreto 1594 del 26 de junio de 1984. Por el cual se reglamenta parcialmente el título I de la ley 9 de 1979, así como el capítulo II del título VI – parte II – libro II y el título III de la parte III – libro I – del decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos sólidos, Colombia.
- Dinius, S. H. (1987). Design of an index of water quality. *Water Resources Bullying*, 23(5), 833-842, DOI: 10.1111/j.1752-1688.1987.tb02959.x.
- Edward, L. K., Mui, W. H., & Cheung, G. M. (2010). Tyre char preparation from waste tyre rubber for dye removal from effluents. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1-3), 151-158, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.09.142.
- EPM (1988). *Cuenca quebrada Piedras Blancas: estudio geomorfológico*. Medellín: Empresas Públicas de Medellín.
- Fei, L., Fang, H., Wei, C., Baoshan, X., & Lingyan, Z. (2011). Sorption of apolar and polar organic contaminants by waste tire rubber and its chars in single- and bi-solute systems. *Environmental Pollution*, 159(4), 850-857, DOI: 10.1016/j.envpol.2011.01.002.
- Fernández, N., & Solano, F. (2005). *Índices de calidad y de contaminación del Agua*. Pamplona: Universidad de Pamplona.
- Gupta, V. K., Gupta, B., Arshi, R., Shilpi, A., & Arunima, N. (2011). Pesticides removal from waste water by activated carbon prepared from waste rubber tire. *Water Research*, 45(13), 4047-4055, DOI:10.1016/j.watres.2011.05.016.
- IDEAM (2013). *Hoja metodológica del indicador índice de calidad del agua (versión 1,00)*. Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia, *Indicadores de Calidad del agua superficial* (10 p.). Medellín: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Instituto Mi Río (1995). *Cuenca de la quebrada Piedras Blancas, corregimiento Santa Elena: levantamiento integrado de cuencas hidrográficas del municipio de Medellín*. Medellín: Instituto Mi Río Medellín.
- Marek, S. (2009). Conversion of waste rubber to the mixture of hydrocarbons in the reactor with molten metal. *Energy Conversion and Management*, 50(7), 1739-1745, DOI: 10.1016/j.enconman.2009.03.014.
- Morten, B. L., Morten, L. H., Peter, G., Lars, S. J., Kim, D., & Flemming, F. (2007). Kinetics of tyre char oxidation under combustion conditions. *Fuel*, 86(15), 2343-2350, DOI: 10.1016/j.fuel.2007.01.018.
- Oguzhan, D., Bahattin, Ç., & Bülent, Ö. (2012). The effect of tire derived fuel/diesel fuel blends utilization on diesel engine performance and emissions. *Fuel*, 95, 340-346, DOI: 10.1016/j.fuel.2011.12.033.
- Pawan, R. S., Pratima, S., Chirika, S. T., & Pradeep, K. B. (2008). Studies on potential emission of hazardous gases due to uncontrolled open-air burning of waste vehicle tyres and their possible impacts on the environment. *Atmospheric Environment*, 42(26), 6555-6559, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.04.013.
- Posada, G. J., Roldan, P. G., & Ramirez, J. J. (2000). Caracterización fisicoquímica y biológica de la calidad de aguas de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, Antioquia, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 48(1), 59-70.
- Prashant, R., Sarin, M. M., Rengarajan, R., & Darshan, S. (2011). Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from post-harvest biomass burning emissions in the Indo-Gangetic Plain: Isomer ratios and temporal trends. *Atmospheric Environment*, 45(37), 6732-6740, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.08.018.
- Renan, C. E., & Fukuya, L. (2010). Toxic emissions from open burning. *Chemosphere*, 80(3), 193-207, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2010.03.057.
- Resolución núm. 1457 del 29 de julio de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Colombia.
- Resolución núm. 4305 del 01 de agosto de 2001. Por el cual se acoge el protocolo para toma y preservación de muestras de agua. Director General de la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia), Colombia.
- Rowley, A. G., Husband, F. M., & Cunningham, A. B. (1984). Mechanisms of metal adsorption from aqueous solutions by waste tyre rubber. *Water Research*, 15(8), 981-984, DOI: 10.1016/0043-1354(84)90248-3.
- Roy, R. G. (2005). Beneficial reuses of scrap tires in hydraulic engineering. *The Handbook of Environmental Chemistry*, 5, 183-215, DOI: 10.1007/b11436.
- Samboni, R. E., Carvajal, E. Y., & Escobar, J. C. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Revista Ingeniería e Investigación*, 27(3), 172-181.
- Search, W. J., & Ctvrtnicek, T. E. (1976). Resource recovery systems for non-recappable rubber tires. *Resource Recovery and Conservation*. 2(2), 159-170, DOI: 10.1016/0304-3967(76)90006-8.
- Shu, L. Z., Zhen, X. X., Zhen, X. X., Kaushik, P., & Jin, K. K. (2010). Prediction of mechanical properties of polypropylene/waste ground rubber tire powder treated by bitumen composites via uniform design and artificial

- neural networks. *Materials & Design*, 31(4), 1900-1905, DOI: 10.1016/j.matdes.2009.10.057.
- Shulan, Z., Tuoliang, H., & Lian, D. (2011). Effects of crumb rubber waste as a soil conditioner on the nematode assemblage in a turfgrass soil. *Applied Soil Ecology*, 49, 94-98, DOI: 10.1016/j.apsoil.2011.06.011.
- Tingting, Z., Heidelore, F., Gang, Y., Solorzano, O., Carroll, W. J., Brian, K., Stellan, M., & Abderrahmane, T. (2011). Emissions of unintentional persistent organic pollutants from open burning of municipal solid waste from developing countries. *Chemosphere*, 84(7), 994-1001, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.04.070.
- Turner, W. D. (1985). Energy recovery from mass burning of refuse in water walled incinerators. *Energy*, 10(1), 41-56, DOI: 10.1016/0360-5442(85)90018-0.
- Van de Lindt, J. W., Carraro, J. A. H., Heyliger, P. R., & Choi, C. (2008). Application and feasibility of coal fly ash and scrap tire fiber as wood wall insulation supplements in residential buildings. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(10), 1235-1240, DOI: 10.1016/j.resconrec.2008.07.004.
- Weidong, C. (2007). Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process. *Construction and Building Materials*, 21(5), 1011-1015, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.02.004.
- Wilcke, W., Krauss, M., Safronov, G., Fokin, A. D., & Kaupenjohann, M. (2005). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils of the Moscow Region. Concentrations, temporal trends and small scale distribution. *Journal of Environmental Quality*, 34(5), 1581-1590, DOI: 10.2134/jeq2005.0005.
- Wilcke, W. (2007) Global patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil. *Geoderma*, 141, 157-166, DOI: 10.1016/j.geoderma.2007.07.007.
- Zhendi, W., Lambert, K., Li, P., & Chun, Y. (2007), Identification, characterization and quantitation of pyrogenic polycyclic aromatic hydrocarbons and other organic compounds in tire fire products. *Journal of Chromatography A*, 1139(1,12), 14-26, DOI: 10.1016/j.chroma.2006.10.085.

Dirección institucional de los autores

Dra. Alba N. Ardila A.
M.C. Erasmo Arriola V.

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid
Grupo de Investigación en Catálisis Ambiental y Energías Renovables (CAMER)
Carrera 48 núm. 7-151
Apartado Aéreo 4932 Medellín, COLOMBIA
Teléfono: +57 (4) 3197 900
anardila@elpoli.edu.co
erasmoarriola@elpoli.edu.co