

Caracterización de la calidad de las aguas de la quebrada Fucha utilizando los índices de contaminación ICO con respecto a la precipitación y usos del suelo

Andrés Guillermo Chavarro^{1,*}, Elvia Johanna Gélvez Bernal

Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Maestría en Ciencias Ambientales, Bogotá D. C., Colombia.

*Autor para correspondencia: andresguillermochavarro@hotmail.com

RESUMEN

Se presentan los resultados de la caracterización de la calidad de las aguas de la quebrada Fucha a través de los índices de contaminación ICO con respecto a los usos del suelo en diferentes épocas del año 2015. La quebrada se encuentra ubicada en la localidad de Usme, al suroriente de Bogotá (Colombia), en el límite urbano rural. Se midieron variables fisicoquímicas en seis muestreos y en tres puntos de la quebrada, se calcularon cuatro índices de contaminación (ICOMI, ICOMO, ICOSUS e ICOTRO); a estos se les realizó un análisis multivariado de correlación incluyendo la precipitación y los usos del suelo como variable indicador, se determinó el grado de correlación a través de regresiones simples para dos pares de variables. Adicionalmente se realizó un ANOVA con los usos del suelo y los valores obtenidos de los índices. No se encontró contaminación por mineralización y la quebrada en general presentó condiciones eutróficas, de igual manera se pudo establecer una correlación estadísticamente significativa entre la precipitación y el índice de contaminación trófica (ICOTRO), así como entre el índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS) e ICOTRO. Por su parte los usos del suelo no presentaron una correlación significativa con el aumento o disminución en el valor de los índices.

Palabras clave: calidad del agua, índices de contaminación, quebrada.

Editor: Hernández Fernández, J.
javier.hernandez@utadeo.edu.co

Citation: Chavarro, A. G. & Gélvez-Bernal, E. J. (2016). Caracterización de la calidad de las aguas de la quebrada Fucha utilizando los índices de contaminación ICO con respecto a la precipitación y usos del suelo. *Mutis* 6(2), 19-31, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1148>

Received: Marzo 21, 2016. **Accepted:** Junio 20, 2016. **Published on line:** Septiembre 30, 2016.

Copyright: ©2016 Chavarro, A. G. & Gélvez-Bernal, E. J. This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

Water quality characterization from creek Fucha using ICO pollution indices about precipitation and land use

ABSTRACT

The results of the characterization of the quality of water from the Fucha brook through ICO's pollution indexes regarding land use at different times of the year are presented. The gorge is located in the town of Usme, in the urban-rural boundary. physico-chemical variables was measured in six samples and three points of the gorge, four indices of contamination (ICOMI, ICOMO, ICOSUS and ICOTRO) were calculated, these were subjected to a multivariate



correlation analysis including precipitation, it was determined the degree of correlation through simple regression for these two pairs of variables. In addition, an ANOVA was performed with the use of land and the values obtained from the indexes. No contamination mineralization and broken generally presented eutrophic conditions found a statistically significant correlation between precipitation and the rate of trophic pollution (ICOTRO) was found, and between the rate of contamination by suspended solids (ICOSUS) and ICOTRO, meanwhile land use did not show a significant correlation with the increase or decrease in the value of the indices.

Keywords: water quality, pollution levels, brook.

INTRODUCCIÓN

A través del tiempo las fuentes de agua se han contaminado por actividades antrópicas, lo que ha generado un problema para las comunidades que habitan cerca de las fuentes y las poblaciones de seres humanos para las cuales tener agua en cantidad y calidad suficientes se ha convertido en un grave problema (Breña *et al.*, 2009).

A nivel nacional e internacional, se ha utilizado el estudio de parámetros fisicoquímicos y biológicos para la estimación de la calidad del agua en cuerpos hídricos, se han estandarizado metodologías para su determinación y se han caracterizado ríos, quebradas y lagos mediante su correcta aplicación (CVC, 2004).

Se han creado los índices de calidad de aguas ICA (Prat *et al.*, 1986); estos presentan algunos inconvenientes tales como integrar en un parámetro muchas variables, puesto que conlleva la pérdida de información al enmascarar valores de algunas de estas, no ser sensible a los fenómenos estacionales o no corresponder al puntaje de la calidad del agua con el grado de contaminación.

Debido a los inconvenientes presentados por los índices de contaminación (ICA) en Colombia, se desarrollaron los índices de contaminación ICO que presentan ventajas al ser más económicos por la utilización de un número menor de variables y al permitir determinar puntualmente el tipo de contaminación presentada (Ramírez *et al.*, 1997).

En Ramírez *et al.* (1997) se describen los índices en los cuales se utilizan diferentes características fisicoquí-

micas de las aguas para determinar su grado de contaminación. Estos índices surgieron a partir de la experiencia acumulada en programas de monitoreo hidrobiológicos, implementados por la industria petrolera en Colombia por más de seis años y en los resultados arrojados por estadísticas multivariadas.

Los índices se desarrollaron con base en legislaciones de diversos países, acordes con las concentraciones de las distintas variables y los usos potenciales de las aguas. “Dichos índices de contaminación (ICO) son: ICOMI o de mineralización, ICOMO o de contaminación orgánica, ICOSUS relativo a los sólidos suspendidos, e ICOTRO o trofia del sistema” (Ramírez *et al.*, 1997).

En el río Ranchería, Romero (2012) calculó ICA e ICO en diferentes estaciones durante dos épocas climáticas, concluyendo que los ICO se constituyeron en una herramienta versátil de evaluación complementaria que desagrega las causas y valora el grado de contaminación del agua sin el riesgo de enmascarar la información.

La Secretaria Distrital de Ambiente (SDA) realiza anualmente seguimiento a los ríos de la ciudad de Bogotá a través de la determinación de un ICA, estos monitoreos se han realizado desde el año 2005 y hasta 2013 (SDA, 2014), en el 2008 se llevó a cabo la novena fase de seguimiento y monitoreo de efluentes industriales y afluentes al recurso hídrico de Bogotá (SDA, 2008), donde se tomaron dos puntos de muestreo en la quebrada Fucha; en los estudios posteriores no se volvió a monitorear esta fuente hídrica debido a que no fue priorizada por parte de la entidad.

El presente trabajo tiene como objeto realizar una caracterización de la calidad de las aguas en la quebrada Fucha utilizando los índices de contaminación (ICO) con respecto a los usos del suelo y las precipitaciones, debido a que esta quebrada se va a convertir en un límite entre los componentes urbano y rural de la localidad de Usme (Bogotá, Colombia), esto implica que adicionalmente a los aportes de aguas servidas que ya recibe de barrios aledaños podría ser contaminada por los nuevos asentamientos que se desarrollen allí, es por esto que este cuerpo de agua debe ser caracterizado de manera tal que se conozca la calidad del agua de la misma, resaltando con esto su importancia y promoviendo su cuidado de cara a la realización de nuevas obras que la puedan afectar.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se desarrolló en la quebrada Fucha, que se encuentra ubicada en la localidad de Usme, al suroriente de Bogotá (Colombia). La quebrada Fucha es un cauce natural de carácter perenne, que nace a los 2969 msnm, recorre una zona montañosa con una pendiente promedio del 8% hasta su desembocadura en el río Tunjuelo a 2695 msnm (EAAB, 2006). El clima en el área corresponde a frío subhúmedo (EAAB, 2000). Según lo reportado por la estación Doña Juana de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), las precipitaciones presentan un régimen bimodal, caracterizado por dos períodos de lluvia, uno en los meses de abril a junio y el segundo de septiembre a diciembre.

Las coberturas en la cuenca de la quebrada Fucha se encuentran dominadas por un mosaico de pastos y cultivos con un 74,44%; de manera posterior se hallan los bosques y arbustales que ocupan el 17,11%; en un menor porcentaje se observan las zonas urbanizadas, herbazales y arbustales de páramo abierto, canteras y finalmente las plantaciones forestales (IDECA, 2015).

Toma de datos

Teniendo presente abarcar la totalidad de la quebrada (5 km) y el acceso a la zona, se establecieron tres puntos donde se tomaron muestras puntuales, uno al

inicio de la quebrada, otro en un punto medio y el último cerca a su desembocadura en el río Tunjuelo (figura 1), en la tabla 1 se muestra la descripción de los sitios de muestreo.

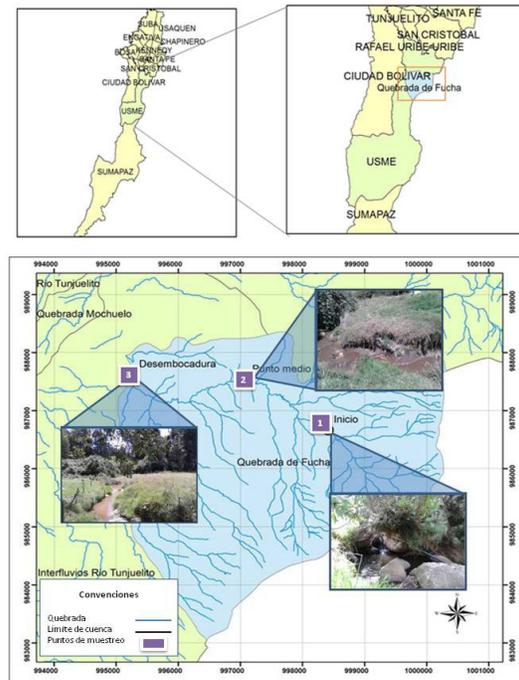


Figura 1. Mapa de la ubicación de los puntos de muestreo de agua (IDECA, 2015)

Tabla 1. Descripción puntos de muestreo

Punto de muestreo	Coordenadas	Altura (msnm)	Ubicación	Coberturas y usos	Vertimientos puntuales observados
1	N 04° 28' 32,2" W 074° 05' 30,5"	2969	Cercanías a la vía al Llano, donde la quebrada comienza a tomar el nombre de quebrada Fucha.	Mosaico de pastos y cultivos.	Heces de animales
2	N 04° 29' 00,5" W 074° 06' 13,1"	2850	Cercanías al barrio El Uval y la vereda El Uval.	Zona Urbanizada.	Zona urbanizada
3	N 04° 29' 03,3" W 074° 07' 12,3"	2695	Cercanías a la avenida Usme, cerca de la desembocadura de la quebrada Fucha al río Tunjuelo.	Mosaico de pastos y cultivos.	No se observa

Se realizaron seis muestreos de agua en los tres puntos establecidos de la quebrada Fucha, en la tabla 2 se muestra la fecha de realización de los mismos y la precipitación pluvial total mensual (se toman los valores de los meses del año 2015 en la estación Doña Juana que es la más cercana a la quebrada).

Tabla 2. Fechas de muestreos y precipitaciones

Muestreo	Fecha	Precipitaciones (mm)
1	15 de febrero de 2015	41,1
2	22 de marzo de 2015	51,6
3	24 de mayo de 2015	25,0
4	21 junio de 2015	110,9
5	9 de agosto de 2015	22,0
6	13 de septiembre de 2015	111,0

Fuente: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR, 2015).

En campo se midieron oxígeno disuelto, pH, conductividad y temperatura del agua con un multiparámetro HACH HQ40D, así mismo, se determinaron la alcalinidad total y dureza total por medio del método volumétrico. Se estableció el caudal en cada uno de los muestreos a través del método del flotador y se identificaron por observación en campo los usos del agua y los vertimientos. Otras muestras se preservaron con hielo y se llevaron al laboratorio Analquim Ltda., donde se determinaron sólidos totales (ST), fósforo total (PT), coliformes totales, DBO₅ y DQO. En todos los casos se siguieron las metodologías establecidas en APHA (2012) que se resumen en la tabla 3.

Tabla 3. Métodos para determinación de variables fisicoquímicas del agua

Variable	Unidad de medición	Técnica de análisis
Alcalinidad total	Ppm	Método volumétrico
Dureza total	Ppm	Método volumétrico
Oxígeno disuelto	Ppm	Multiparámetro HACH HQ40D
pH	Unidades	Multiparámetro HACH HQ40D
Conductividad	μS/Cm	Multiparámetro HACH HQ40D
Temperatura	°C	Multiparámetro HACH HQ40D
Fósforo total	Ppm	Método colorimétrico
DBO ₅	Ppm O ₂	Método electrométrico
DQO	Ppm O ₂	Método del dicromato
Sólidos totales	Ppm	Método gravimétrico
Coliformes totales	NMP/100 ml	Método de sustrato definido

Determinación de los ICO

Se realizó la determinación de los cuatro índices de Contaminación ICO utilizando el programa ICATEST V 1.0 (Fernández, *et al.*, 2003). Los índices de contaminación se caracterizaron por medio de los colores establecidos por Ramírez (1997) presentados en la tabla 4, donde se muestran las escalas de valores y colores que expresan el grado de contaminación del agua.

Tabla 4. Grados de contaminación del agua

Clasificación	Escala	Color
Ninguno	0 – 0,2	
Bajo	0,2 – 0,4	
Medio	0,4 – 0,6	
Alto	0,6 – 0,8	
Muy alto	0,8 – 1	

Fuente: Ramírez, *et al.*, 1997.

En Ramírez (2007) se presentan las fórmulas para el cálculo de los índices de contaminación, se puede mencionar que el índice de contaminación por mineralización (ICOMI) se calculó con la conductividad, dureza y alcalinidad, el índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO) se calculó con la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), coliformes totales y porcentaje de saturación del oxígeno, el índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS) se determinó mediante la concentración de sólidos suspendidos y finalmente el índice de contaminación trófico (ICOTRO) se determinó por la concentración del fósforo total, el cual define por sí mismo una categoría discreta a saber, como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Clasificación del cuerpo de agua según concentración de P total

Estado del agua	Concentración (ppm)
Oligotrófico	< 0,01
Mesotrófico	0,01-0,02
Eutrófico	0,02-1
Hipereutrófico	> 1

Fuente: Jiménez, 2006.

Se realizó un análisis multivariado de correlaciones entre las variables (ICOMI, ICOSUS, ICOTRO, ICOMO, precipitación y usos del suelo como variable indicador),

para determinar la existencia o no de correlación entre las variables. Los usos del suelo se determinaron teniendo en cuenta las coberturas Corine Land Cover, se les asignó un valor de 0 a la cobertura de pastos y cultivos y de 1 a la cobertura de zona urbanizada.

Posteriormente a esto, se realizó una regresión simple para los dos pares de variables en las cuales se encontró una correlación significativa, para la correlación ICOSUS-ICOMO se corrió un modelo de regresión doble inverso y para la correlación ICOTRO-PRECIPITACIÓN un modelo de regresión inverso Y cuadrado de X.

Respecto a los usos del suelo se realizó una prueba ANOVA para comparar las medias de los tres puntos de cada uno de los índices con los usos del suelo, se plantearon las siguientes hipótesis:

$$H_0 = \text{todas las medias son iguales} \rightarrow \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_a = \text{alguna media no es igual} \rightarrow \text{alguna } \mu_n \text{ es diferente}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 6 se muestran los resultados de las variables medidas en los muestreos realizados, se presenta por mes y en cada uno de estos los tres puntos establecidos, siendo el punto (1) el inicio de la quebrada, el punto (2) la parte media y el punto (3) la desembocadura.

Tabla 6. Resultados de las variables fisicoquímicas

Punto	Alcalinidad total	Dureza total	Saturación O ₂	pH	Cond.	Temp.	Fósforo total	DBO ₅	DQO	Sólidos totales	Coliformes totales	
	ppm	ppm	%	Unid	μS/Cm	°C	ppm	ppm O ₂	ppm O ₂	ppm	NMP/100 ml	
Febrero	1	30,24	22,5	77,33	7,16	49,8	12,7	0,1	4	43	35	61,8*10 ²
	2	35,28	55	70,89	7,28	93,3	13,1	0,16	7	40	242	27*10 ⁵
	3	20,16	30	81,15	7,23	110,4	14	0,14	6	41	250	86,7*10 ⁴
Marzo	1	31,25	27,5	71,39	7,31	68,5	12	0,15	34	59	208	12*10 ⁵
	2	28,12	15	78,95	7,24	71,5	14,7	0,1	6	40	130	11*10 ⁵
	3	31,25	22,5	79,33	7,55	66,7	14,2	0,1	4	42	196	32*10 ⁴
Mayo	1	17,5	15	71	6,44	54,2	11,6	0,16	2	48	104	18,9*10 ³
	2	20	11,2	70,8	6,59	34,4	12,9	0,18	3	39	160	10*10 ⁵
	3	22,5	12,5	61,55	6,62	44,8	14,6	0,2	5	44	316	27,2*10 ³

Punto	Alcalinidad total	Dureza total	Saturación O ₂	pH	Cond.	Temp.	Fósforo total	DBO ₅	DQO	Sólidos totales	Coliformes totales	
	ppm	ppm	%	Unid	μS/Cm	°C	ppm	ppm O ₂	ppm O ₂	ppm	NMP/100 ml	
Junio	1	7,5	12,5	72,3	6,72	61,2	11,9	0,09	< 2	42	114	30*10 ²
	2	12,5	20	78,43	6,85	44,3	12	0,07	4	43	328	40,8*10 ⁴
	3	12,5	20	75,57	7,05	70,7	12,5	0,08	5	45	340	70*10 ⁴
Agosto	1	12,5	17,5	98,6	6,6	27,8	10,8	0,1	2,01	42	40	62,2*10 ²
	2	15	15	97,4	7,53	62,5	12	0,1	2,84	44	64	55,2*10 ⁴
	3	15	17	98,1	7,8	44,5	12	0,1	2,49	43	122	11,6*10 ³
Sep.	1	10	15	98,6	6,75	28	11,2	0,08	<2	44	38	49,7*10 ²
	2	17,5	20	84,56	6,8	58	12,9	0,07	5	42	88	15,8*10 ⁵
	3	15	16,2	94,83	7,75	84,2	13,2	0,07	6	41	90	17,8*10 ⁵

Fuente: autores.

En la tabla 7 se presentan los caudales medidos en cada uno de los muestreos realizados, se muestra el mes y el caudal en m³/s, los mayores caudales corresponden a los meses de mayores precipitaciones y ayudan en la explicación de los fenómenos de dilución y concentración que se presentan en la quebrada.

Tabla 7. Caudales medidos en la quebrada Fucha

Muestreo	Caudal (m ³ /s)
Febrero	0,33
Marzo	0,37
Mayo	0,22
Junio	0,63
Agosto	0,38
Septiembre	0,63

La tabla 8 muestra los resultados de los cuatro índices de contaminación ICO calculados con las variables medidas en cada uno de los puntos de muestreo, se presentan por mes y por punto, así como los colores establecidos para cada uno de los valores de los ICO teniendo en cuenta que el color indica el grado de contaminación del agua.

Tabla 8. Resultados índices de contaminación del agua

Muestreo	Punto	ICOMI	ICOMO	ICOSUS	ICOTRO
Febrero	1	0,034	0,427	0,085	Eutrófico
	2	0,092	0,611	0,7	Eutrófico
	3	0,101	0,561	0,73	Eutrófico
Marzo	1	0,053	0,762	0,604	Eutrófico
	2	0,056	0,568	0,370	Eutrófico
	3	0,051	0,771	0,568	Eutrófico
Mayo	1	0,039	0,688	0,292	Eutrófico
	2	0,021	0,525	0,460	Eutrófico
	3	0,03	0,608	0,928	Eutrófico
Junio	1	0,045	0,315	0,322	Eutrófico
	2	0,029	0,529	0,964	Eutrófico
	3	0,055	0,561	1	Eutrófico
Agosto	1	0,016	0,287	0,1	Eutrófico
	2	0,047	0,431	0,172	Eutrófico
	3	0,029	0,361	0,364	Eutrófico
Septiembre	1	0,016	0,268	0,094	Eutrófico
	2	0,042	0,531	0,244	Eutrófico
	3	0,07	0,516	0,25	Eutrófico

Se presentó correlación entre la precipitación y el ICOTRO ya que la prueba generó un P-valor de 0,019, que

al ser menor al nivel de significancia de 0,05, indica que la correlación es significativamente diferente de cero, con un nivel de confianza del 95%. También se presentó correlación entre el ICOSUS y el ICOMO, debido a un P-valor de 0,0231, con un 95% de confianza. Conociendo que existe correlación entre las variables se realizó un modelo de regresión para explicar el grado de correlación entre estas.

ICOMI

No se presenta contaminación por mineralización en ninguno de los puntos de muestreo, ya que todos los valores de ICOMI son menores a 0,2 fluctuando entre 0,016 y 0,101. La media se encuentra muy cerca de la mediana lo que indica la homogeneidad de los ICOMI y la simetría en los valores del índice. Los máximos valores se presentaron en los puntos dos y tres y los mínimos en el punto uno.

Respecto al análisis multivariado de correlaciones se afirma que no existe ninguna relación estadísticamente significativa entre la precipitación y la contaminación mineral con un 95% de confianza.

Se presentó un P-valor de 0,27, el cual es mayor al nivel de significancia de 0,05, a partir de este valor se puede afirmar que se acepta la hipótesis nula, lo que significa que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los tres ICOMI con respecto a los diferentes usos del suelo (urbano y mosaico de pastos y cultivos).

A partir de lo anterior se afirma que los diferentes usos del suelo no afectan significativamente la contaminación mineral de la quebrada Fucha con un 95% de confianza. En la figura 2 se muestran los valores de los índices de contaminación mineral ICOMI en los tres puntos (inicio, punto medio y desembocadura) y los meses de muestreo).

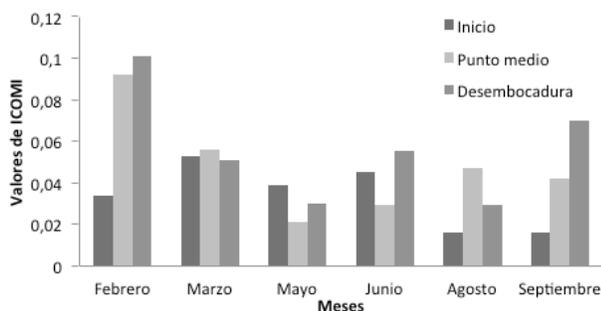


Figura 2. Valores de ICOMI

Los valores de ICOMI no fueron significativos para hablar de contaminación mineral, debido a que se encontraron por debajo de 0,2, adicionalmente se vieron influenciados por la conductividad eléctrica ya que la dureza total y la alcalinidad total fueron muy bajas.

Aunque no fueron significativos para hablar de contaminación mineral, los valores de ICOMI se vieron influenciados por la conductividad eléctrica ya que la dureza total y la alcalinidad total fueron muy bajas, esto puede asociarse a los sólidos disueltos (iones PO_3^{3-} , PO_4^{3-} , Na^+ , K^+) presentes en el agua, que por medio de escorrentía y vertimientos puntuales han sido llevados a la quebrada.

Respecto a la dureza, las aguas de la quebrada Fucha son blandas ya que presentaron valores de entre 0 y 75 mg/l en los puntos de muestreo en las diferentes épocas, como lo reporta Roldán (2008).

Los valores de alcalinidad total, dureza total y conductividad, en los tres puntos son menores al límite permitido en la Resolución 2115 de 2007 (alcalinidad total: 200 mg/l, dureza total: 300 mg/l y conductividad menor a 1000 $\mu\text{S}/\text{Cm}$), lo que indica que con respecto a la mineralización el agua sería apta para el consumo humano.

ICOMO

Como se observa en la figura 4 el promedio del índice se encuentra entre 0,4 y 0,6 lo que indica que hay una contaminación por materia orgánica media en toda la quebrada, en el punto uno hay dispersión en la distribución de datos y presenta asimetría positiva ya que la mediana se acerca al primer cuartil, lo que nos indica que el punto uno presentó valores de contaminación por materia orgánica desde baja a media.

La máxima y la mínima contaminación por materia orgánica se presentaron en el punto uno. En los puntos dos y tres la mediana está muy cercana a la media aritmética, lo que demuestra la homogeneidad del valor del índice y que no se presenta ninguna asimetría ni datos atípicos.

Respecto al análisis multivariado de correlaciones se afirma que no existe ninguna relación estadísticamente significativa entre la precipitación y la contaminación por materia orgánica con un 95% de confianza, con lo que se deduce que la contaminación por materia orgánica es debida a vertimientos en la quebrada.

Se presentó un P-valor de 0,78, el cual es mayor al nivel de significancia de 0,05, a partir de este valor se puede afirmar que se acepta la hipótesis nula, lo que significa que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los tres ICOMO con respecto a los diferentes usos del suelo en cada punto con un nivel de confianza del 95%. A partir de lo anterior se afirma que los diferentes usos del suelo no afectan significativamente la contaminación por materia orgánica de la quebrada Fucha con un 95% de confianza.

En la figura 3 se muestran los valores del índice ICOMO o de contaminación orgánica en los tres puntos de muestreo y en diferentes épocas del año, los valores del índice fluctúan entre 0,26 y 0,8, lo que indica que existe contaminación por materia orgánica desde baja a media.

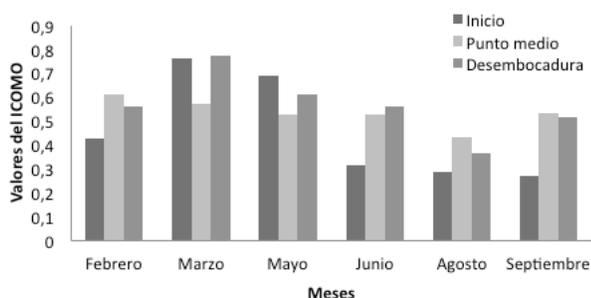


Figura 3. Valores de ICOMO

El valor más alto del ICOMO se presentó en marzo en el punto inicial y en la desembocadura de la quebrada, el cual se vio influenciado por un valor de coliformes totales de $12 \cdot 10^5$ NMP/100 ml y $32 \cdot 10^4$ NMP/100 ml respectivamente, en los tres puntos de la quebrada en todos los muestreos el valor del ICOMO fue aumentado por los coliformes totales y en baja medida por la DBO_5 . Por su parte el valor del ICOMO más bajo fue de 0,268 que indica baja contaminación por materia orgánica, este valor fue en el inicio de la quebrada en el mes de septiembre.

En el inicio de la quebrada el alto nivel de coliformes totales puede ser debido a que en esta estación hay descargas puntuales de heces de ganado por la presencia de actividad pecuaria, en el punto dos el incre-

mento de los coliformes es debido posiblemente a las aguas servidas de población aledaña.

Se sabe que los coliformes son contaminantes comunes del tracto gastrointestinal tanto del hombre como de los animales de sangre caliente, lo que imparte un grado de contaminación microbiológica a la quebrada por lo que eleva los valores del índice, además, al aumentar la cantidad de materia orgánica por vertimientos y escorrentía también aumentan los coliformes totales y por ende disminuye el oxígeno disuelto, lo cual eleva aún más el valor del ICOMO (Arcos *et al.*, 2005).

ICOSUS

La media de los tres puntos se encuentra entre 0,25 y 0,65, lo que indica que las aguas de la quebrada Fucha presentan contaminación por sólidos suspendidos de baja a media, aunque se observan valores de contaminación muy alta (valor de 1) y alta (valores de 0,8 a 1), también hay valores de ninguna contaminación (menores de 0,2), los cuales ajustan el promedio dando una generalidad de contaminación media por sólidos suspendidos en las aguas de la quebrada Fucha.

El punto uno muestra la homogeneidad de los datos y que se encuentran muy cercanos entre sí, el promedio fue sesgado un poco hacia la derecha debido a un valor de 0,63, que aunque es mayor que los otros, no es atípico porque se encuentra en el límite superior del gráfico, en general no se presentan asimetrías. La menor contaminación por sólidos suspendidos se encontró en este punto.

El punto dos presenta una asimetría positiva lo que indica que la mayoría de los datos se encuentran en los cuartiles uno y dos. En cuanto al punto tres se observa que presenta su mediana muy cerca de la media aritmética mostrando homogeneidad de sus datos y que en este punto se dio la máxima contaminación por sólidos suspendidos.

Respecto al análisis multivariado de correlaciones se afirma que no existe ninguna relación estadísticamente significativa entre la precipitación y la contaminación por sólidos suspendidos con un 95% de confianza, con lo que podemos deducir que la contaminación por sólidos suspendidos es debida a vertimientos antrópicos en la quebrada, además no se presenta erosión evidente que relacione la precipitación con el arrastre de sólidos a la misma.

Respecto a los usos del suelo se realizó una prueba ANOVA para comparar las medias de los tres puntos de ICOSUS, la cual produjo un P-valor de 0,0723, a partir de este valor se puede afirmar que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los tres ICOSUS con respecto a los diferentes usos del suelo en cada punto con un nivel de confianza del 95%. A partir de lo anterior, se afirma que los diferentes usos del suelo no afectan significativamente la contaminación por sólidos suspendidos de la quebrada Fucha con un 95% de confianza.

En la figura 4 se muestra el índice ICOSUS o de contaminación por sólidos suspendidos en los tres puntos de muestreo y en diferentes épocas del año, los valores del índice fluctúan entre 0,085 y 1, lo que indica que existe contaminación por materia orgánica desde ninguna a muy alta.

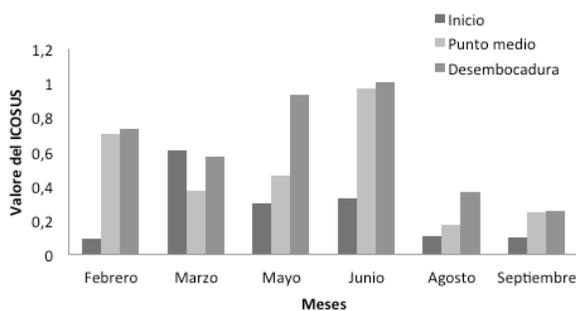


Figura 4. Valores ICOSUS

El grado de contaminación por sólidos suspendidos aumenta hasta el tercer punto de muestreo, presentando una baja contaminación al inicio de la quebrada y alcanzando una muy alta contaminación en el tercer punto.

En el mes de junio en el punto medio y la desembocadura se presentan los máximos niveles de contaminación de ICOSUS en la quebrada, reflejados en un valor del índice de 0,96 y 1 respectivamente, ya que en estas estaciones de muestreo se presentan concentraciones de sólidos suspendidos mayores a 340 mg/l, siendo este valor el límite a partir del cual el índice toma siempre el valor de 1.

Esto explicado por el máximo caudal medido de 0,63m³/s y una precipitación de 110,9 mm lo cual

puede asociarse al aumento en el arrastre de partículas del suelo erosionado debido a actividades tales como la ganadería en zonas de ladera y la minería (IDECA, 2015), además, los meses anteriores fueron de poca pluviosidad (de 22 a 25 mm) lo que conlleva a que el suelo usado en actividades agrícolas y urbanas posea poca capacidad de infiltración y aumente la erosión hídrica, llevando consigo el aumento en el arrastre de partículas del suelo causado por el limado del microrrelieve del terreno y acrecentando significativamente el valor del ICOSUS.

En cambio, en septiembre se presentó la máxima precipitación de 111 mm y un caudal de 0,63m³/s, en el que se reportaron los mínimos valores del índice en los tres puntos, este comportamiento está asociado a la precipitación ya que como se mostró en junio, se arrastró gran cantidad de sólidos a la quebrada, en el transcurrir de solo dos meses no había suficientes sólidos disponibles para ser llevados por escorrentía a la misma lo que generó un fenómeno de dilución que llevó consigo a una disminución drástica del índice, ya que en la quebrada no hay indicios de erosión evidente.

Según la CVC (2004), en términos generales el comportamiento del ICOSUS se asocia al arrastre y resuspensión de sólidos debido a las altas velocidades del flujo que son típicas en quebradas de montaña. Se observa que las concentraciones de sólidos a lo largo de todo el tramo están por debajo del promedio que se presenta en varios ríos del mundo (incluidos varios de Suramérica) reportado por CVC (2004), 110 mg/l con excepción del período de lluvia en junio.

ICOTRO

El promedio del ICOTRO de los tres puntos se encuentra entre 0,11 y 0,12 lo que indica que la quebrada exhibe procesos de eutrofización en los tres puntos de muestreo, la mediana en los tres puntos de muestreo se encuentra a la izquierda de la media aritmética, lo cual significa una leve asimetría positiva.

El ICOTRO fue el único índice que mostró correlación con la precipitación en el análisis multivariado, al correr el modelo de regresión inverso Y cuadrado de X, el cual explicaba mejor la relación entre las variables, la regresión presentó un coeficiente de correlación de Pearson de -0.81 y un R² coeficiente de determinación: 65,4%.

El estadístico R^2 o coeficiente de determinación indica que la precipitación demuestra en un 65,4% la variabilidad de la contaminación trófica y el coeficiente de correlación de Pearson, indicando una relación inversa moderadamente fuerte entre las variables.

La figura 5 muestra el modelo de correlación entre la precipitación y el ICOTRO que se construyó a partir de la ecuación:

$$\text{ICOTRO} = 1/(7.4476 + 0.00046294 * \text{precipitación}^2) \quad (1)$$

Muestra que valores altos de precipitación explican valores bajos de ICOTRO.

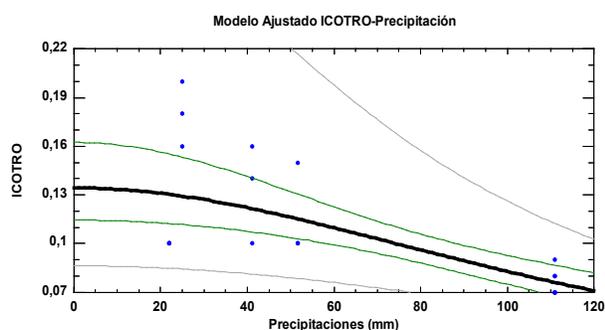


Figura 5. Modelo ajustado de Precipitación-ICOTRO

Por lo anterior se puede interpretar que en los muestreos con alta precipitación la contaminación trófica será menor y viceversa. La figura 6 muestra los valores del índice de contaminación trófica entre los tres puntos de muestreo y los diferentes meses en los cuales se realizaron los muestreos.

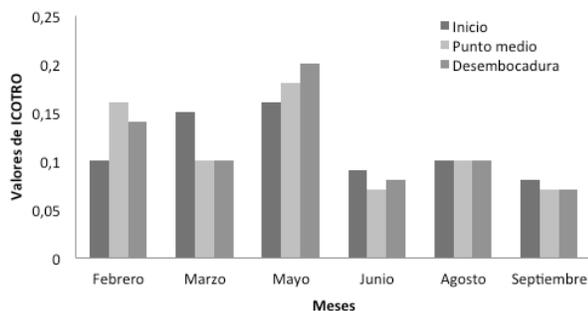


Figura 6. Valores de ICOTRO

El comportamiento del fósforo total a lo largo de las estaciones de monitoreo es mayor a 0,01 ppm, ya que presenta una fluctuación de entre 0,1 y 0,2 ppm, lo que indica que la quebrada en todos los puntos de monitoreo es eutrófica.

Con respecto al ICOTRO, se presentó el mayor incremento en el índice en la desembocadura en el mes de mayo toda vez que se reportó una precipitación de 25 mm y un caudal de 0,22 m³/s el cual fue el menor durante el estudio. Este comportamiento puede deberse a la disminución en la capacidad de dilución en el río asociada con la disminución del caudal. En condiciones de máximas precipitaciones (111 mm), se reportaron los valores más bajos del índice. Estos se debieron al fenómeno de dilución.

Los valores del ICOTRO fueron principalmente influenciados por los fertilizantes a base de fósforo utilizados en los cultivos aledaños a la quebrada, al arrastre de material por lavado de los suelos y a las descargas de aguas residuales domésticas de algunos asentamientos urbanos localizados en esta zona.

Además de la deforestación y la erosión, los suelos agrícolas influyen debido a la carga de nutrientes, debido a que los escurrimientos al pasar por una tierra que no tiene protección lavan la capa fértil llevándose consigo los nutrientes de la misma, en este caso, a la quebrada (RAPAL, 2010).

Correlación ICOSUS-ICOMO

En el análisis multivariado de correlaciones el ICOSUS y el ICOMO presentaron una correlación diferente de cero. Para comprobarlo se corrió un modelo de regresión doble inverso, el cual explica mejor la relación entre las variables, la regresión presentó un coeficiente de correlación de Pearson de 0,7 y un R^2 coeficiente de determinación de 49%.

El estadístico R^2 o coeficiente de determinación, indica que el ICOSUS demuestra un 49% la variabilidad de la contaminación por materia orgánica y el coeficiente de correlación de Pearson indica una relación moderadamente fuerte entre las variables.

La figura 7 muestra el modelo de correlación entre el ICOSUS y el ICOMO que se construyó a partir de la siguiente ecuación, la cual se originó como resultado del modelo de regresión doble inverso que se corrió:

$$ICOMO = 1/(1.55298 + 0.145645/ICOSUS) \quad (2)$$

Muestra que para valores altos de ICOSUS ya no es posible explicar el ICOMO, por esta razón lo demuestra solo el 49%.

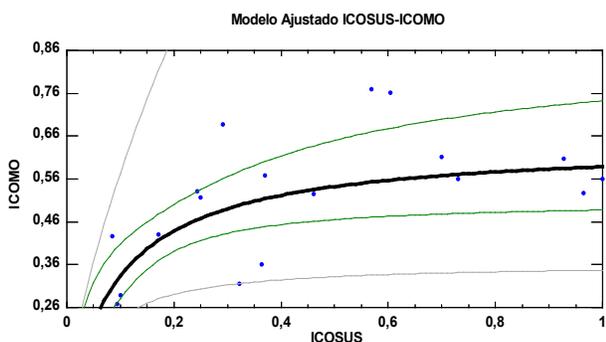


Figura 7. Modelo ajustado ICOSUS-ICOMO

Respecto a la correlación, se sabe que los sólidos suspendidos totales (SST) están constituidos por sólidos sedimentables y materia orgánica e inorgánica en suspensión y/o coloidal. Esta materia orgánica aumenta la DBO₅ y disminuye el oxígeno disuelto, además de que la materia orgánica puede poseer coliformes, lo que indica cómo el ICOSUS demuestra un 49% el ICOMO.

Descripción del pH

Aunque el pH no hace parte de las variables que conforman los índices calculados, se midió debido a que es una de las variables más contundentes para evidenciar la afectación de las aguas por actividades humanas como derrames químicos, efluentes de aguas residuales, drenajes agrícolas y de aguas lluvias debido a sus diversos valores e interpretación.

Como se observa en la figura 8, en los tres puntos de muestreo el promedio de pH fue de 7,05± 0,43 unidades de pH, lo que indica que el promedio de valores de pH se encuentra en el rango de la neutralidad, con una baja variabilidad.

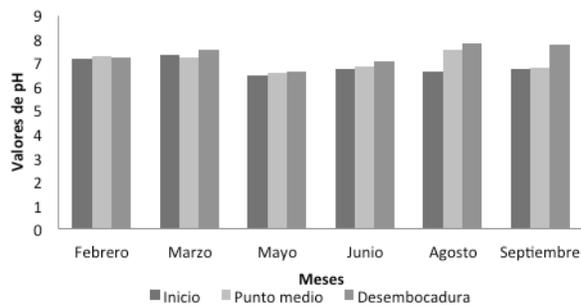


Figura 8. Valores de pH

El valor mínimo de pH fue de 6,44. Estos mínimos se presentaron en el mes de mayo en los tres puntos de muestreo, en el que se reportó una precipitación de 25 mm y un caudal de 0,22 m³/s, los cuales son los valores más bajos de precipitación y caudal en todos los muestreos realizados en la quebrada. Estos valores de pH pueden explicarse ya que al no haber efecto de dilución aumenta la concentración de ácidos orgánicos (ácidos húmicos) que permitirán bajar progresivamente el valor del pH.

El máximo valor fue de 7,8 en la desembocadura en el mes de septiembre, lo que muestra que el rango fue de 1,36 unidades de pH, que no se presentaron cambios drásticos del pH y que tampoco se presentó ninguna relación significativa con la precipitación.

Relación DBO₅/DQO

Aunque la DQO no hace parte de ningún índice fue importante medirla para efectuar la comparación con la DBO₅, lo cual permite entender la naturaleza de la materia orgánica presente en la quebrada. A continuación se presenta la figura 9 que muestra la relación DBO₅/DQO.

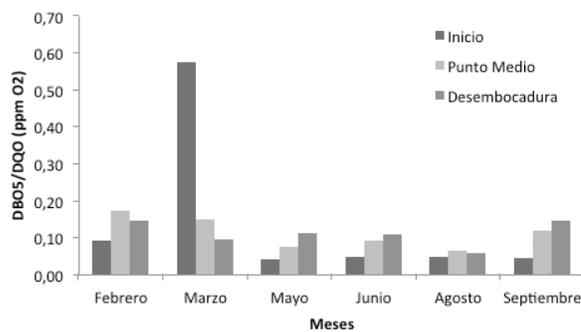


Figura 9. Relación DBO₅/DQO

Al dividir la DBO_5 entre la DQO, se presenta un valor menor de 0,3 en casi todos los monitoreos en todos los puntos de muestreo, lo que indica que hay presencia predominante de contaminantes de naturaleza orgánica no biodegradable (Orozco *et al.*, 2005); solo se presenta una excepción en el mes de marzo en el inicio de la quebrada, con un valor cercano a 0,6, aunque este valor es alto comparado con los otros, continúan predominando los contaminantes de naturaleza orgánica no biodegradable.

Lo anterior es debido a la amplia variedad de compuestos químicos orgánicos bastante complejos y resistentes a la degradación biológica, provenientes de aguas servidas y agropecuarias que son vertidas en el recorrido de la quebrada, estos en su gran mayoría son compuestos aromáticos, fertilizantes y plaguicidas, los cuales se excluyen de la posibilidad de ser biodegradables debido a su gran complejidad química (Ardila, 2010), adicionalmente no se muestra un cambio significativo en la relación DBO_5/DQO en las diferentes épocas del año.

Identificación de usos del agua

En los muestreos realizados en la quebrada Fucha se evidenció el uso de sus aguas para riego de cultivos en la parte alta y media. Cerca de la desembocadura se demostró el uso de esta agua para lavar carros y para el ganado que se acercaba a la quebrada a beber.

Identificación de vertimientos

Se constató que la quebrada recibe vertimientos con estiércol de fincas en su parte inicial, posteriormente a su paso por el punto medio se presentan asentamientos urbanos que hacen vertimientos a la quebrada, la percepción de esta en este punto por parte de la comunidad es que está contaminada. La quebrada a través de su recorrido recoge por escorrentía agroquímicos de los diferentes cultivos que se siembran en la zona.

CONCLUSIONES

La quebrada Fucha presenta en todos sus puntos de muestreo en el período del año 2015 una contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS) de media a alta y una contaminación media por materia orgánica (ICOMO), así mismo se observa que la quebrada no presenta contaminación por mineralización (ICOMI) y

exhibe concentraciones de fósforo que denotan condiciones eutróficas (ICOTRO).

No se presentó ninguna correlación estadísticamente significativa entre la precipitación y los índices de contaminación por materia orgánica (ICOMO), mineralización (ICOMI) y sólidos suspendidos (ICOSUS), por el contrario, el índice de contaminación trófica (ICOTRO) sí fue explicado por la precipitación en un 64%.

Los usos del suelo no presentaron una correlación significativa con el aumento o disminución en el valor de los índices de contaminación debido a que el 78% de la cuenca de la quebrada Fucha presenta la misma cobertura (mosaico de pastos y cultivos), lo que conlleva a que no haya una variabilidad significativa en el uso del suelo que influya directamente en los niveles de contaminación de la quebrada.

El promedio de valores de pH se encuentra en el rango de la neutralidad y cuenta con una baja variabilidad, los menores valores pueden explicarse por disminución de las precipitaciones ya que al no haber efecto de dilución aumenta la concentración de ácidos orgánicos (ácidos húmicos) que harán bajar progresivamente el valor del pH.

La relación DBO_5/DQO indica que hay presencia predominante de contaminantes de naturaleza orgánica no biodegradable debido a la amplia variedad de compuestos químicos orgánicos bastante complejos y resistentes a la degradación biológica, provenientes de aguas servidas y agropecuarias que son vertidas en el recorrido de la quebrada, estos en su gran mayoría son compuestos aromáticos, fertilizantes y plaguicidas, los cuales se excluyen de la posibilidad de ser biodegradables debido a su gran complejidad química.

REFERENCIAS

- Apha (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 22d edition.
- Arcos, M., Ávila, S., Estupiñán, S. & Gómez., A. (2005). Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua. *NOVA*, 3(4), 69-79.
- Ardila, A. (2010). *Degradación fotocatalítica de materia orgánica no biodegradable presente en efluentes de la industria farmacéutica*. México.

- Breña, A. & Breña, J. (2009). *Problemática del recurso agua en grandes ciudades: zona metropolitana del valle de México*. UAM-I, Depto. de Ingeniería de Procesos e Hidráulica.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca-CVC. (2004). Estudio de la calidad del agua del río Cauca y sus principales tributarios mediante la aplicación de índices de calidad y de contaminación, tramo Salvajina-La Virginia, convenio interadministrativo 0168. Santiago de Cali, Colombia.
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá-EAAB. (2000). Elaboración de los diseños definitivos detallados, para la construcción de las obras de adecuación, control de crecientes y descontaminación a través de interceptores, colectores, para todas las quebradas de la parte sur oriental de Santafé de Bogotá D. C., incluidas en las localidades de Santa Fe, San Cristóbal, Rafael Uribe Uribe y Usme.
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá-EAAB. (2006). Consultoría para el diseño de un sendero de interpretación ecológica, como propuesta de educación ambiental y de rehabilitación ecosistémica de la quebrada Fucha.
- Fernández, N., & Solano, F. (2005). Índices de calidad (ICA) y de contaminación (ICO) del agua de importancia mundial, Pamplona. Universidad de Pamplona.
- IDECA (2015). Capas de coberturas de la ciudad de Bogotá. Disponible en: <http://www.ideca.gov.co/>
- Jiménez, M. A. (2006). Análisis comparativo de indicadores de la calidad de agua superficial. *Avances en recursos hídricos*, 14, 53-54.
- Orozco, C., Pérez, A., González, M., et al. (2005). *Contaminación ambiental, una visión desde la química*. Madrid: Ediciones Paraninfo.
- Prat, N., González, G. & Millet, X. (1986). Comparación crítica de dos índices de calidad del agua: ISQA y BJLL. *Tecnología del Agua*, 31, 33-49.
- Ramírez, A., Restrepo, R. & Viña, G. (1997). Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulación y Aplicación. *Ciencia, Tecnología y Futuro* 1(3), 135-153.
- RAPAL (2010). *Contaminación y eutrofización del agua, impactos del modelo de agricultura industrial*. Uruguay: Rapal.
- Roldán, G. & Ramírez, J. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical*. Universidad de Antioquia. Segunda edición. Medellín, Antioquia, Colombia.
- Romero, F. (2012). Selección e implementación de un índice de calidad del agua ICA o de contaminación ICO para la cuenca del río Ranchería en el departamento de La Guajira. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá, Colombia.
- Rodríguez Susa, M. S., Sanabria, Porras, L., et al. (2014). *Calidad del recurso hídrico de Bogotá (2012-2013)*. Bogotá: Secretaría Distrital de Ambiente – SDA, Universidad de los Andes, 231 pp. Disponible en: http://www.ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=0829554d-8eca-44a9-835d-3ae15d69f268&groupId=3564131
- Secretaría Distrital de Ambiente -SDA. (2008). Novena fase de seguimiento y monitoreo de efluentes industriales y afluentes al recurso hídrico de Bogotá, Convenio 020 de 2008 entre la SDA y la EAAB.