

En español

In English

Aplicación de índices de calidad de agua - ICA orientados al uso de la fuente para consumo humano

Patricia Torres¹, Camilo H Cruz², Paola Patiño³,
Juan Carlos Escobar⁴ y Andrea Pérez⁵

RESUMEN

La contaminación de origen natural y antrópico de las fuentes de agua limitan su aprovechamiento principalmente para el consumo humano; herramientas de diagnóstico rápidas y representativas como los índices de calidad del agua — ICA— garantizan una evaluación integral del recurso, fundamental en la toma de acciones para manejo y control del riesgo sanitario a través de los diferentes procesos de potabilización. El análisis comparativo de la aplicación de los índices ICA-NSF, ICA Dinius, ICAUCA y UWQI en cinco puntos del río Cauca localizados en el tramo Salvajina – Bocatoma Puerto Mallarino mostró que el río presenta un deterioro creciente a medida que es afectado por las actividades socio-económicas desarrolladas en su cuenca, presentando calidad entre regular y mala, haciendo necesario su tratamiento para la destinación del recurso en consumo humano, e incluso la incorporación de tratamientos específicos como la adsorción con carbón activado y otros. Las variables de mayor incidencia en el valor final de los ICA fueron los patógenos y las asociadas a presencia de material particulado; sin embargo, para una evaluación más integral del río, y dados los usos del suelo que pueden generar en la fuente presencia de otras sustancias causantes de riesgo sanitario, se recomienda considerar el desarrollo o adaptación de un índice con estructura similar a la del DQWI que tenga en cuenta la variación en el tiempo y en el espacio de los parámetros que lo conforman y su comparación con la normatividad vigente.

Palabras clave: índices de calidad del agua – ICA, riesgo sanitario, tratamiento del agua.

Recibido: mayo 15 de 2009

Aceptado: noviembre 15 de 2010

Introducción

El crecimiento demográfico y el desarrollo industrial y agrícola han aumentado la presión sobre los recursos hídricos, limitando su apro-

Applying water quality indexes (WQI) to the use of water sources for human consumption

Patricia Torres⁶, Camilo H Cruz⁷, Paola Patiño⁸,
Juan Carlos Escobar⁹ y Andrea Pérez¹⁰

ABSTRACT

Naturally occurring and anthropic contamination of water sources limits the use of water for human consumption. Fast and representative tools, such as water quality indexes (WQI), allow performing an integral assessment of the resource, this being essential when making decisions about the management and control of sanitary risks through different purification processes. A comparative analysis of applying WQI-NSF, Dinius WQI, ICAUCA and UWQI indexes at five points or stations on the Cauca River located in the Salvajina–Puerto Mallarino water uptake section, gave evidence of growing river deterioration due to the different socio-economic activities carried out in the river basin. This water quality condition brings about the incorporation of additional or specific treatment operations such as activated carbon or adsorption for the destination of the resource for human consumption. The presence of pathogens and particulate material were the variables mostly affecting WQI value. It is thus recommended that the development or adaptation of an index having a similar structure to the DQWI index should be considered to make a thorough river assessment and the additional use of soil which might generate the presence of other substances causing a sanitary risk in the source, considering variation in time and space of the parameters comprising it and its comparison with current legislation.

Keywords: sanitary risk, water quality index (WQI), water treatment.

Received: may 15th 2009

Accepted: november 15th 2010

Introduction

Demographic growth and industrial and agricultural development have increased the pressure on water resources, limiting their ex-

¹ Ingeniera Sanitaria, Universidad del Valle, Colombia. MSc. y Ph.D., Universidad São Paulo, Brasil. Profesora asociada, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Colombia. patoloz@univalle.edu.co

² Ingeniero Sanitario, Universidad del Valle, Colombia. MSc. Universidad São Paulo, Brasil. Profesor asociado, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Colombia. camcruz@univalle.edu.co

³ Ingeniera Sanitaria, Especialista Universidad del Valle, Colombia. Asistente de Investigación, Universidad del Valle, Colombia. paopatin@univalle.edu.co

⁴ Ingeniero Sanitario, Universidad del Valle, Colombia. M.Sc. y Ph.D., Universidad São Paulo, Brasil. Jefe Operación Planta Puerto Mallarino, EMCALI EICE ESP, Colombia. jcescobar@emcali.com.co

⁵ Ingeniera Sanitaria, MSc. Universidad del Valle, Colombia. Estudiante Doctorado en Ingeniería Área de Énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Colombia. andreaperezvidal@hotmail.com

⁶ Sanitary Engineering, Universidad del Valle, Colombia. M.Sc., and Ph.D., University of São Paulo, Brazil. Associate Professor, Faculty of Engineering, Universidad del Valle, Colombia. patoloz@univalle.edu.co

⁷ Sanitary Engineer, Universidad del Valle, Colombia. M.Sc., University of São Paulo, Brazil. Associate Professor, Faculty of Engineering, Universidad del Valle, Colombia. camcruz@univalle.edu.co

⁸ Sanitary Engineer, Specialist, Universidad del Valle, Colombia. Research Assistant, Universidad del Valle, Colombia. paopatin@univalle.edu.co

⁹ Sanitary Engineer, Universidad del Valle, Colombia. M.Sc., and Ph.D., University of São Paulo, Brazil. Chief Plant Operation Puerto Mallarino, EMCALI EICE ESP, Colombia. jcescobar@emcali.com.co

¹⁰ Sanitary Engineer, M.Sc. Universidad del Valle, Colombia. Ph.D., (student) in Engineering Emphasis Area Sanitary and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Universidad del Valle, Colombia. andreaperezvidal@hotmail.com

En español

vechamiento debido a la alteración de sus características físicoquímicas, microbiológicas y parasitológicas que determinan la complejidad y costos de tratamiento que los haga aptos para usos como el consumo humano. Uno de los principios que orientan el suministro de agua segura es el concepto de barreras múltiples, que involucra la protección de la fuente, la optimización de los procesos en las plantas de tratamiento de agua, y un adecuado manejo de los sistemas de distribución (Betancourt y Rose, 2004).

La evaluación de la calidad del agua cruda debe considerar indicadores representativos que garanticen un análisis integral del recurso hídrico, permitiendo tomar acciones para su manejo y control mediante los diferentes procesos de potabilización del agua; una de las herramientas más empleadas son los índices de calidad del agua (ICA), cuyo uso es cada vez más popular para identificar las tendencias integradas a cambios en la calidad de ella, especificar condiciones ambientales y ayudar en decisiones gubernamentales y en la evaluación de programas de control, entre otros (Ott, 1978; Canter, 1998).

A nivel mundial se han desarrollado diferentes ICA, entre los que se destaca el de la National Sanitation Foundation (ICA- NSF), desarrollado por Brown *et al.* (1970) para ríos de Estados Unidos y ampliamente empleado y validado o adaptado en diferentes estudios internacionales. Dinius (1987) desarrolló un ICA similar teniendo como valor agregado el planteamiento de rangos de clasificación basados en usos específicos, entre los que se destaca el del consumo humano.

De manera más reciente se han planteado ICA para la evaluación del recurso hídrico a ser destinado al consumo humano, previo tratamiento, que incluyen parámetros físicoquímicos y microbiológicos relacionados con el nivel de riesgo sanitario presente en el agua, como el ICA para abastecimiento público - IAP de Brasil (CETESB, 2006), el *Universal Water Quality Index - UWQI* (Boyacioglu, 2007), basado en Directivas de la Unión Europea, y el *Drinking Water Quality Index - DWQI*, de la UNEP (actualmente en revisión (UNEP, 2007)).

El índice IAP considera parámetros que requieren técnicas de medición con límites de detección muy bajos que cumplan con las especificaciones para su cálculo, y el DWQI presenta una estructura de cálculo fundamentada en la variación en el tiempo y en el espacio de los parámetros que lo conforman y su comparación con la normatividad vigente de acuerdo con el uso estudiado, lo cual puede favorecer la evaluación de fuentes con amplias variaciones de calidad en el tiempo y facilitar su aplicación a las condiciones particulares de una región o país; sin embargo, su cálculo requiere información de todos los parámetros que lo conforman, colectada a lo largo de un periodo de tiempo —usualmente un año— (Torres *et al.*, 2009).

En Colombia el deterioro del recurso hídrico se debe principalmente a vertimientos de aguas residuales domésticas, industriales y agropecuarias, y actividades como transporte terrestre, fluvial y marítimo de sustancias peligrosas o petróleo, aguas de extracción minera y residuos sólidos dispuestos en rellenos sanitarios o directamente en éstos (Ideam, 2001). A pesar de que en promedio el 78% de la población tiene acceso al agua potable (Andesco, 2008), en algunos departamentos existen problemas de calidad del agua para consumo humano (Álvarez, 2008).

El río Cauca es la segunda fuente de mayor importancia del país, ya que un 25% de la población se ubica en su área de influencia, localizándose en su cuenca 183 municipios de los departamentos de Cauca, Valle del Cauca, Quindío, Risaralda, Caldas, Antioquia, Córdoba, Sucre y Bolívar (Ideam, 2001). En este río se han aplicado o -

In English

exploitation, due to the alteration of the physicochemical, microbiological and parasitological characteristics determining the complexity and costs of the treatment required for making water suitable for human consumption. One of the principles guiding water supply is the concept of multiple barriers involving source protection and optimisation of processes in water treatment plants and suitable distribution system management (Betancourt and Rose, 2004)

Raw water assessment must consider representative indexes guaranteeing integral analysis of water resources and allow action to be taken for management and control through different water purification processes. One of the most widely used tools is the water quality index (WQI). Such indexes lead to identifying tendencies related to changes in water quality and environmental specifications, helping governmental decision to be made and assessment of control programmes (Ott, 1978; Canter, 1998).

Indexes have been developed worldwide. One of the most widely known is the National Sanitation Foundation Index (WQI- NSF) which was developed by Brown *et al.*, (1970) for United States rivers and has been applied and validated in several international studies. Dinius (1987) proposed a similar WQI, but suggested classification ranges based on specific uses apart from human consumption.

More recently, several specific WQI for assessing water resources intended for human consumption after treatment have been suggested and these include physicochemical and microbiological parameters related to the level of sanitary risk present in the water. Some examples are the WQI for public supply (IAP) in Brazil (CETESB, 2006), the Universal Water Quality Index (UWQI) (Boyacioglu, 2007) based on directives by the European Union and the Drinking Water Quality Index (DWQI) by UNEP (currently in review (UNEP, 2007)).

The IAP index considers parameters that require measurement techniques with detection limits too low to satisfy calculation specifications and the DWQI presents a calculation structure based on variation in time and space of the parameters comprising it and a comparison with current legislation according to studied use, which can favour the assessment of sources having wide quality variations in time and facilitating its application to the particular conditions of a region or country. However, the calculation requires information on every aspect of the index, collected during a long period of time (usually a year) (Torres *et al.*, 2009).

The deterioration of the water resources in Colombia is mainly attributed to domestic, industrial and agricultural wastewater discharges and activities such as terrestrial, fluvial and maritime transport of hazardous substances or oil, mining extraction water and solid residue disposed of in sanitary landfills (IDEAM, 2001). Even though around 78% of the population has access to potable drinking water (ANDESCO, 2008), water quality issues regarding human consumption still prevail in some departments (Álvarez, 2008).

The Cauca River is the second most important water source for the country, as 25% of the population is located in its area of influence, including 183 municipalities in the basin spread over several departments: Cauca, Valle del Cauca, Quindío, Risaralda, Antio-

adaptado ICA de amplio uso internacional; Rojas (1991) adaptó el ICA-NSF a las condiciones específicas del río, enfatizando su uso para consumo humano previo tratamiento, y la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca —CVC— y la Universidad del Valle (2004) adaptaron un ICA a partir de los ICA NSF, Dinius, CETESB e ICOSUS, denominado ICAUCA.

En este documento se hace un análisis comparativo de la aplicación de diferentes ICA para la evaluación de la calidad del agua del río Cauca como fuente de abastecimiento para consumo humano previo tratamiento, en el tramo Salvajina – Bocatoma Puerto Mallarino, y su injerencia en la toma de decisiones relacionadas con su viabilidad de uso para potabilización.

Metodología

Muestreo y caracterización de la fuente

La definición del tramo y de cinco puntos de muestreo en el río Cauca se efectuó teniendo como criterios el comportamiento de la información histórica sobre la calidad del agua en este tramo y la localización de los principales vertimientos que llegan al río. La evaluación de los ICA se realizó con base en información colectada a partir de tres muestreos realizados en los cinco puntos seleccionados durante un periodo de nueve meses, para caracterizar diferentes condiciones climáticas y de calidad del río. Cada punto de monitoreo se integró con tres muestras puntuales tomadas en la sección transversal del río en cada punto, exceptuando oxígeno disuelto y coliformes, para los cuales se tomaron muestras instantáneas del punto medio de la sección.

En la Figura 1 se presenta la ubicación de los puntos de muestreo seleccionados y la Tabla 1 muestra los parámetros medidos y las técnicas de análisis consideradas según APHA *et al.* (2005)

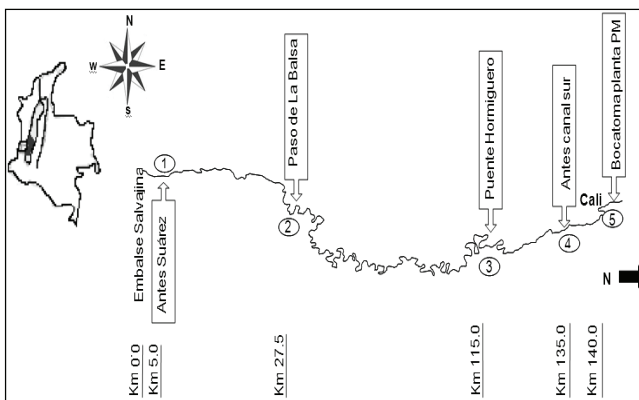


Figura 1. Ubicación de los puntos de muestreo en el río Cauca

Índices de calidad del agua

Con base en la revisión de literatura, y conocidas algunas características básicas del tramo en estudio, se seleccionaron cuatro ICA de acuerdo con el cumplimiento de los siguientes criterios: amplio uso a nivel internacional, clasificación considerando la destinación del recurso con fines de abastecimiento público y representatividad de las condiciones locales del estudio.

En la Tabla 2 son mostrados los ICA seleccionados, con sus respectivas ecuaciones de cálculo y algunas observaciones relacionadas con éstos.

quia, Córdoba, Sucre and Bolívar (IDEAM, 2001). Several widely used indexes have been applied or adapted to this river. Rojas (1991) adapted the WQI-NSF to the specific river conditions with special emphasis on water for human consumption following previous treatment and CVC and Universidad del Valle (2004) adapted a WQI from the WQI NSF, Dinius, CETESB and ICOSUS indexes, which was called ICAUCA.

A comparative analysis is made in this work of applying different WQI for assessing the water quality of the Cauca River as a supply of water for human consumption after treatment, in the Salvajina–Puerto Mallarino water uptake section and the influence on making decisions related to the viability of water use for purification.

Methodology

Sampling and source characterisation

The definition of the section and 5 sampling points or stations on the Cauca River was based on criteria relative to the pattern of historical information regarding water quality in this section and localisation on the main tributaries discharging into the river. WQI assessment was based on the information collected from 3 samplings carried out at 5 selected points during a 9-month period to characterise different weather and river quality conditions. Each sampling point involved 3 samplings taken in the transversal section of the river at each point, except for dissolved oxygen and coliforms for which instant samples were taken in the middle point of the section.

Figure 1 shows the location of the selected sampling points and Table 1 shows the measured parameters and the analysis techniques considered according to APHA *et al.*, 2005.

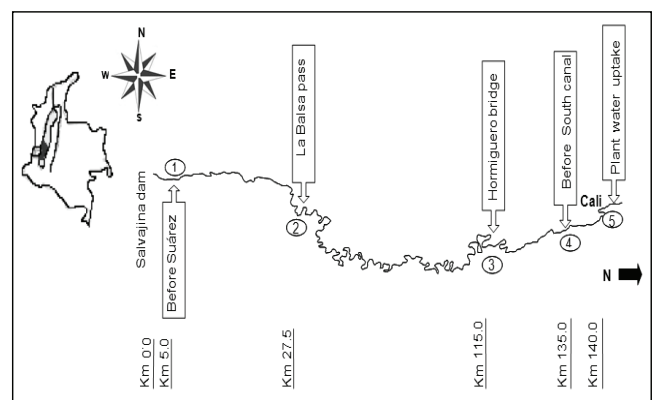


Figure 1. Location of sampling points on the Cauca River

Water quality indexes

Based on a literature review and some known basic characteristics of the section to be studied, four WQI were selected according to the following criteria: broad application at international level, classification considering the destination of the resource for public supply and being representative of the study's local conditions.

Table 2 shows the selected WQI with their respective calculation equations and some observations related to the equations.

En español

Tabla 1. Parámetros medidos y técnicas de análisis

PARÁMETRO	MÉTODO	PARÁMETRO	MÉTODO
Temperatura	Potenciométrico	Cloruros	4500 Cl- B – SM
pH	Potenciométrico - pH	Fluoruro	4500-F- SM
Conductividad	Potenciométrico	Manganeso	3111 B – SM
Alcalinidad	2320 B – Standard Method (SM)	Cadmio	3111 C-B – SM
Dureza Total	2340 C – SM	Zinc	
Sólidos Suspendidos	2540 B-D – SM	Plomo	
Sólidos Disueltos Totales		Mercurio	
Turbiedad	Turbidimétrico	Cobre Disuelto	
Color Aparente	2120 C - SM	Cromo Total	
Oxígeno Disuelto - OD	Electroquímico	Níquel	
DBO ₅	5210 B – SM	Aluminio	
DQO	5220 B – SM	Selenio	
Fósforo Total	4500-P D – SM	Arsénico	
Fosfatos	4500-P D – SM	Cianuro	Automated Ferricyanide
Nitratos	4500-NO3-E – SM	Hierro Disuelto	3500-Fe B – SM
Nitrógeno Total		Fenoles Totales	5530 C – SM
Coliformes	9222 B-D – SM		
Coliformes Fecales			

Tabla 2. Ecuaciones de cálculo empleadas para la determinación de los ICA

ÍNDICE	ECUACIÓN	OBSERVACIONES
ICA NSF (EU) ICAUCA (Colombia) ICA Dinius (EU)	$ICA_m = \prod_{i=1}^n I_i^{W_i}$	Promedio geométrico ponderado: Wi: peso o porcentaje asignado al i-ésimo parámetro li: subíndice de i-ésimo parámetro
UWQI (Europa)	$UWQI = \sum_{i=1}^n W_i I_i$	Promedio aritmético ponderado: Wi: peso o porcentaje asignado al i-ésimo parámetro li: subíndice de i-ésimo parámetro

El cálculo de los ICA se llevó a cabo mediante las siguientes etapas:

- Estimación de los subíndices “li” que corresponden a la transformación adimensional de cada parámetro que conforma los ICA mediante curvas o ecuaciones matemáticas. Los valores de “li” varían entre 0 y 100, cuanto mayor es li mejor es la calidad del agua.
- Asignación del peso relativo (Wi) que define la importancia de cada parámetro dentro del ICA evaluado y se relaciona con el uso a evaluarse; la sumatoria de los pesos “Wi” debe ser igual a 1. En estos índices en general, los parámetros que tienen mayor peso relativo son el oxígeno disuelto, los coliformes y los asociados a presencia de materia orgánica como la DBO. La Tabla 3 presenta los pesos asignados a los parámetros que conforman cada ICA.
- Finalmente, con los valores de “li” y “Wi” obtenidos en cada caso, se realizó el cálculo de los ICA seleccionados.

Resultados y discusión

Caracterización del río Cauca. Tramo Salvajina – Bocatoma Puerto Mallarino

La Tabla 4 presenta los valores promedio de las características físico-químicas y microbiológicas medidas en el río y los valores reglamentados en la normatividad nacional (Decreto 1594 - Ministerio

In English

Table 1. Parameters measured and the analysis techniques used

PARAMETER	METHOD	PARAMETER	METHOD
Temperature	Potentiometric	Chloride	4500 Cl- B – SM
pH	Potentiometric - pH	Fluoride	4500-F- SM
Conductivity	Potentiometric	Manganese	3111 B – SM
Alkalinity	2320 B – Standard Method (SM)	Cadmium	3111 C-B – SM
Total hardness	2340 C – SM	Zinc	
Suspended solids	2540 B-D – SM	Lead	
Dissolved solids		Mercury	
Turbidity	Turbidimetric	Dissolved	
Apparent colour	2120 C - SM	Total Chrome	
Dissolved oxygen- OD	Electrochemical	Nickel	
BOD ₅	5210 B – SM	Dissolved	
COD	5220 B – SM	Selenium	
Total phosphor	4500-P D – SM	Arsenic	
Phosphate	4500-P D – SM	Cyanide	Automated Ferricyanide
Nitrates	4500-NO3-E – SM	Dissolved iron	3500-Fe B – SM
Total nitrogen		Total phenols	5530 C – SM
Total coliforms	9222 B-D – SM		
Faecal coliforms			

Table 2. Equations for calculating WQI

Index	Equation	Observations
WQI NSF (USA) ICAUCA (Colombia) Dinius WQI (USA)	$WQI_m = \prod_{i=1}^n I_i^{W_i}$	Balanced geometric mean: Wi: Weight or percentage assigned to the parameter i li: sub-index of parameter i.
UWQI (Europe)	$UWQI = \sum_{i=1}^n W_i I_i$	Balanced arithmetic mean: Wi: Weight or percentage assigned to parameter i li: sub-index of parameter i.

WQI was calculated by means of a series of stages:

- Estimating “li” sub-indexes corresponding to non-dimensional transformation of each parameter forming the WQI by means of curves or equations. “li” figures varied between 0 and 100, the higher the figure the better the water quality;
- Assigning the relative weight (Wi) defining the importance of each parameter in the assessed WQI and its relationship to the use to be evaluated; the sum of all weights must equal 1. As a general rule, the parameters having the highest weight were dissolved oxygen, coliforms and those associated with the presence of organic matter such as BOD. Table 3 presents the assigned weighting for the parameters comprising the WQI; and
- Calculating the selected WQI from the values obtained for “li” and “Wi” in each case.

Results and Discussion

Cauca River characterisation in the Salvajina–Puerto Mallarino water uptake section

Table 4 presents the average values for the physicochemical and microbiological characteristics in the river and the defined limits, according to current Colombian legislation (Decree 1594 – Minis-

En español

de Salud, 1984 y RAS - Ministerio de Desarrollo, 2000)* para aguas a ser destinadas al consumo humano previo tratamiento convencional.

Tabla 4. Características fisicoquímicas y microbiológicas medidas en el río Cauca - Tramo Salvajina – Bocatomá Puerto Mallarino

Parámetro	Unidades	Decreto 1594/84	Antes Suárez (1)	Paso la Balsa (2)	Hormiguero (3)	Antes Canal Sur (4)	Bocatomá (5)
Temperatura	°C		20.1	20.6	22.7	22.2	21.9
Conductividad	µS/cm		70.1	66.3	80.5	79.9	85.2
pH	Unidades	5-9	6.6	7.0	7.0	7.1	7.1
Alcalinidad			18.15	19.30	24.20	25.75	27.15
Dureza			23.05	25.65	35.05	36.15	38.40
Cloruros		250 (300*)	< 10.2	< 10.2	< 10.2	< 10.2	< 10.2
Sólidos Totales	mg/L		89.00	165.33	268.33	240.67	186.33
Sólidos Suspendidos			16.03	72.00	176.67	158.67	100.67
Sólidos Disueltos Totales			72.97	93.33	91.67	82.00	85.67
Turbiedad	UNT	≥150*	22.39	67.74	154.33	126.26	105.54
Color Aparente	UPC		48.33	129.88	331.51	275.62	251.77
Color Verdadero		40 (75*)	26.98	34.66	46.80	46.30	38.27
Oxígeno Disuelto		4*	6.32	6.74	6.23	6.40	5.63
DBO		>6*	< 2.0	< 2.0	2.26	2.23	2.80
DQO			10.26	12.49	23.37	16.87	28.70
Nitrógeno Total			<0.18	0.36	0.73	0.87	0.60
Nitratos		10	0.27	0.34	0.64	0.52	0.24
Fósforo Total	mg/L		< 0.042	< 0.042	0.12	0.11	0.84
Fosfatos			< 0.008	0.05	0.11	0.06	0.08
Fenoles		0.002	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05
Cadmio		0.01		0.00050	0.00067	0.00067	0.00073
Cianuro		0.2		<0.051	<0.051	<0.051	<0.051
Mercurio		0.002		0.0017	0.0010	0.0033	0.0018
Selenio		0.01		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Arsénico		0.05		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Fluoruro		>1.7*		0.0226	0.314	0.364	0.342
Coliformes Totales	NMP/100 mL	20000 (>5000*)	23 - 200	1.1E3-2.2E4	7.0E3-2.8E4	2.3E4-1.1E5	3.0E4-3.3E4
Coliformes Fecales		2000	<20 - 13	8.0E2-2.2E4	2.1E3-2.2E4	1.3E4-5.0E4	2.3E4-3.3E4

* Valores límite establecidos en RAS (2000) para aguas que requieren tratamiento convencional más tratamientos específicos.

In English

try of Health, 1984 and RAS – Ministry of Development, 2000) for water for human consumption subjected to conventional treatment.

Table 4. Physical-chemical and microbiological characteristics measured in the Cauca River in the Salvajina–Puerto Mallarino water uptake section

Parameter	Units	Decree 1594/84	Before Suárez (1)	La Balsa Pass (2)	Hormiguero (3)	Before Canal Sur (4)	Water uptake (5)
Temperature	°C		20.1	20.6	22.7	22.2	21.9
Conductivity	µS/cm		70.1	66.3	80.5	79.9	85.2
pH	Units	5-9	6.6	7.0	7.0	7.1	7.1
Alkalinity			18.15	19.30	24.20	25.75	27.15
Hardness			23.05	25.65	35.05	36.15	38.40
Chloride		250 (300*)	< 10.2	< 10.2	< 10.2	< 10.2	< 10.2
Total solids	mg/L		89.00	165.33	268.33	240.67	186.33
Suspended solids			16.03	72.00	176.67	158.67	100.67
Total dissolved solids			72.97	93.33	91.67	82.00	85.67
Turbidity	NTU	≥150*	22.39	67.74	154.33	126.26	105.54
Apparent colour	UPC		48.33	129.88	331.51	275.62	251.77
True colour		40 (75*)	26.98	34.66	46.80	46.30	38.27
Dissolved oxygen		4*	6.32	6.74	6.23	6.40	5.63
BOD		>6*	< 2.0	< 2.0	2.26	2.23	2.80
COD			10.26	12.49	23.37	16.87	28.70
Total nitrogen			<0.18	0.36	0.73	0.87	0.60
Nitrates		10	0.27	0.34	0.64	0.52	0.24
Total phosphor	mg/L		< 0.042	< 0.042	0.12	0.11	0.84
Phosphates			< 0.008	0.05	0.11	0.06	0.08
Phenols		0.002	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05
Cadmium		0.01		0.00050	0.00067	0.00067	0.00073
Cyanide		0.2		<0.051	<0.051	<0.051	<0.051
Mercury		0.002		0.0017	0.0010	0.0033	0.0018
Selenium		0.01		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Arsenic		0.05		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Fluoride		>1.7*		0.0226	0.314	0.364	0.342
Total coliforms	MPN/100 mL	20,000 (>5,000*)	23 - 200	1.1E3-2.2E4	7.0E3-2.8E4	2.3E4-1.1E5	3.0E4-3.3E4
Faecal coliforms		2,000	<20 - 13	8.0E2-2.2E4	2.1E3-2.2E4	1.3E4-5.0E4	2.3E4-3.3E4

* Limit values established in RAS (2000) for water that requires conventional treatment and specific treatment operations

En español

En general, las características fisicoquímicas se encuentran dentro de los valores reglamentados, con excepción de los fenoles que superan a lo largo de todo el tramo en estudio el valor límite definido (0,002 mg/L), haciendo prioritario su control en los sistemas de tratamiento de agua, tal como actualmente es realizado en las plantas de potabilización de la ciudad de Cali abastecidas por esta fuente, las cuales, adicional al tratamiento convencional, emplean la adsorción con carbón activado en polvo —CAP— con el fin de reducir de manera eficiente la presencia de compuestos fenólicos en el agua (Torres *et al.*, 2008).

Las características de los diferentes puntos de muestreo permiten identificar tres sectores:

Sector 1: Embalse Salvajina - Estación 1, con valores dentro de lo usualmente reportado en fuentes superficiales con buena calidad, asociada a fenómenos de sedimentación y dilución en el embalse Salvajina y poca influencia de vertimientos de tipo industrial y doméstico.

Sector 2: Estaciones 1-2, donde se observa un aumento en los niveles de material suspendido y patógenos que afectan la calidad del agua del río, lo que puede deberse a las descargas provenientes de asentamientos poblacionales, así como al aporte de material particulado de los ríos Ovejas y Timba, entre otros.

Sector 3: Estaciones 2-5, que presentan valores característicos de aguas superficiales con un mayor deterioro en su calidad, asociados principalmente con incremento en las actividades agrícolas, industriales y urbanas en este sector. La estación Hormiguero registra los valores más altos de sólidos suspendidos, turbiedad y color aparente, debido posiblemente a la influencia de los ríos Palo, Zanjón Oscuro y Jamundí, que presentan problemas de erosión en sus cuencas.

Un aspecto a destacar es el de que, a pesar de presentarse niveles promedio de DQO altos, los valores de DBO son bajos, característicos de baja contaminación orgánica (<2 mg/L - Unesco, 1996), situación que puede indicar que al río están llegando sustancias oxidables de tipo inorgánico que aumentan la concentración de DQO en éste y pueden incidir en el nivel de riesgo químico presente en el río.

En cuanto al comportamiento de los patógenos, los niveles de coliformes totales y fecales evidencian la problemática que presenta el río a partir de la estación 2, con valores que superan los niveles reglamentados para aguas a ser destinadas al consumo humano previo tratamiento convencional, lo cual incide directamente en el nivel de riesgo agudo presente en sus aguas, aspecto que es determinante en el suministro de agua segura a la población y hace prioritario su control en los sistemas de tratamiento de agua abastecidos por la fuente. Como respuesta a esta problemática, actualmente en las plantas de la ciudad de Cali que se abastecen con esta fuente se aplica pre y poscloración como medida de control del riesgo microbiológico.

Comparando los resultados obtenidos en estudios previos como el realizado por CVC y Univalle (2004), se observa que en general los valores presentados en el tramo en estudio son característicos del río principalmente en condiciones climáticas de invierno y transición, en los cuales éste tiene mayor capacidad de dilución, lo que se refleja en bajas concentraciones de parámetros como la DBO, y en mayores niveles de OD. Caso contrario ocurre con aquellos parámetros asociados a la presencia de material particulado y disueltos (sólidos totales, suspendidos y disueltos, turbiedad, color apa-

In English

As observed in the above Table, the physicochemical characteristics were below established limit values excepting for phenols which were above them (0.002 mg/L) in the studied section of the river. Such high phenol concentration makes additional water treatment necessary and purification plants in the city of Cali have implemented activated carbon dust adsorption (CDA) to reduce the presence of phenol compounds in the river water (Torres *et al.*, 2008).

The characteristics of the sampling ports allow identifying three sectors:

Sector 1: Salvajina dam – Station 1: had figures similar to those usually reported for good quality superficial sources, associated with settling phenomena and dilution in the Salvajina dam and not much influence of domestic or industrial wastewater discharges.

Sector 2: Station 1-2: an increase in suspended material and pathogen levels was observed that affected river water quality. This increase could be attributed to wastewater discharges originating from population settlements along the river as well as the contribution of particulate material from the Ovejas and Timba rivers.

Sector 3: Stations 2 – 5: presented characteristic values for surface water having notorious water quality deterioration associated with increased agricultural, industrial and urban activities in the sector. The Hormiguero station registered the highest values of suspended solids, turbidity and apparent colour, possibly due to the influence of the Palo, Zanjón Oscuro and Jamundí rivers which present issues related to erosion in their basins.

An important aspect, which must be pointed out, was the high COD and low BOD levels characteristic of low organic contamination (<2 mg/L - UNESCO, 1996). This condition could indicate that inorganic oxidable substances are being discharged into the river, thereby increasing COD concentration and could negatively influence the chemical risk present in the river.

Regarding pathogen behaviour, total and faecal coliform levels were well above the limits for water intended for human consumption after conventional treatment after Station 2 which directly influences the level of acute risk present in the water and is determinant in the supply of safe water to the population. This makes controlling the treatment systems supplied by the source an urgent priority. Purification water plants in Cali which are supplied by this source have implemented pre- and post-chlorination as a microbiological risk control measure to deal with this situation.

Comparing the results obtained here with previous studies by CVC and Univalle (2004) it was observed that the figures presented in the section being studied are characteristic of the river, mainly during winter and transition weather conditions in which the river has increased dilution capacity. This was reflected in the low concentration of parameters such as BOD and high OD levels. The contrary occurred for parameters associated with the presence of particulate and dissolved material (total suspended solids, turbidity,

En español

rente, hierro y manganeso), los cuales aumentan debido a un mayor arrastre de materiales del suelo y del lecho del río.

Se resalta que durante los muestreos no se presentaron eventos extremos de contaminación asociados principalmente a niveles de OD inferiores a 2 mg/L o turbiedad superior al valor límite establecido para tratabilidad del agua por las plantas de la ciudad de Cali abastecidas por el río Cauca (3.000 UNT), que se presentan eventualmente a la altura de la Bocatoma de Puerto Mallarino afectando la continuidad del servicio de suministro de agua a cerca del 80% de la población de la ciudad de Cali debido a la suspensión en los procesos de potabilización (Univalle y EMCALI, 2009). Durante el mes de febrero de 2009 las fuertes lluvias presentadas en la cuenca del río Palo ocasionaron derrumbes y empalizadas, aumentando los niveles de turbiedad en el río Cauca a valores hasta de 10.000 UNT a la altura de la Bocatoma de Puerto Mallarino.

Aplicación de índices de calidad del agua - ICA

En la Figura 2 se presenta el comportamiento promedio de los ICA evaluados. Se observa que de acuerdo con el ICA-NSF el río presenta buena calidad en la estación 1, regular calidad en la estación 2 y mala calidad en las estaciones restantes, siendo éstas las que reportan los valores más bajos (39-55). Esta clasificación coincide con la tipificación de los tres sectores descrita antes.

El ICAUCA muestra una tendencia similar a la del ICA-NSF; sin embargo, de acuerdo con los rangos de clasificación establecidos para este índice, el río presenta buena calidad en las estaciones 1 y 2 (70-60) y aceptable en las estaciones 3, 4 y 5 (40,6-41,9). También se destaca que aunque el ICAUCA asigna un peso relativo considerable al grupo de parámetros relacionados con la presencia de material en suspensión (problema evidenciado en la cuenca principalmente en invierno), la clasificación es similar a la de los otros ICA evaluados.

El ICA Dinius indica que en todas las estaciones el agua del río requiere tratamiento para consumo humano; sin embargo, a medida que el río va siendo más impactado por los diversos vertimientos que recibe, el índice va disminuyendo, lo que influye en la complejidad y mayores costos de tratamiento; al igual que con ICA-NSF e ICAUCA, los valores más bajos se presentan en las tres últimas estaciones del tramo evaluado.

El UWQI no fue determinado en la estación Suárez por no contar con la información de todos los parámetros para su cálculo; aunque este índice incluye parámetros relacionados con riesgo químico en el agua por la presencia de selenio, arsénico, cianuro, cadmio y fluoruro, los resultados obtenidos no evidencian una fuerte influencia de éstos en su valor final y clasifican el río como de regular calidad en todo el tramo estudiado. Dicha situación podría indicar que el río presenta bajo riesgo químico asociado a las sustancias de interés sanitario consideradas por este índice; sin embargo, para una evaluación integral del riesgo se debe considerar la posibilidad de adaptar un índice que incluya otras sustancias relacionadas con las actividades socioeconómicas predominantes en la cuenca, como pesticidas, fenoles y otros metales.

En general, los ICA evaluados reflejan el deterioro en la calidad del agua del río, especialmente en las estaciones 3, 4 y 5, que están fuertemente influenciadas por vertimientos de origen doméstico, industrial y agrícola, ya sea de forma directa o a través de sus ríos tributarios, siendo las variables de mayor incidencia los patógenos y las asociadas a presencia de material particulado. Igualmente, los valores obtenidos por los ICA estudiados presentan un comporta-

In English

apparent colour, iron and manganese) which have increased due to soil material drag and the river bed.

It should be noted that there were no extreme contamination events during the sampling period (mainly associated with OD levels lower than 2 mg/L or turbidity higher than the limit value established for water treatment in the treatment plants of the city of Cali which are supplied from Cauca River, i.e. 3000 UNT). Such high turbidity events eventually take place in the surroundings of Puerto Mallarino water uptake and affect the continuity of water supply to nearly 80% of the population of the city of Cali due to purification delay (Univalle and EMCALI, 2009). Strong rains falling in the Palo River basin produced landslides and bank erosion during February 2009, thereby increasing Cauca River turbidity levels to 10,000 UNT in the Puerto Mallarino water uptake section.

Applying water quality indexes

Figure 2 shows the average pattern for the WQI being assessed. It was observed that according to WQI-NSF, the river had good quality at station 1, regular quality at station 2 and poor quality at the rest of the stations which reported the lowest figures (39-55). This classification agreed with that for the 3 previously described sectors.

ICAUCA had a similar tendency to WQI-NSF. However, according to the established classification ranks for this index, the river had good quality at stations 1 and 2 (70-60) and acceptable quality at stations 3, 4 and 5 (40.6-41.9). It was also noticed that ICAUCA assigned an important relative weight to the group of parameters related to the presence of particulate material in suspension (a problem mainly associated with the basin during winter); the classification was similar to other assessed WQI.

The Dinius WQI indicated that river water required treatment for human consumption at all stations. However, with increased waste water discharge into the river in its trail, the index decreased and this influenced complexity and treatment costs. As with the WQI-NSF and ICAUCA, the lowest values were presented at the last 3 stations in the section being assessed.

The UWQI was not assessed at the Suarez station as no information on all the parameters required was available for making calculations. Although this index includes parameters related to chemical risk in the water due to the presence of selenium, arsenic, cyanide, cadmium and fluoride, the obtained results did not show these parameters' strong influence on the final value and classify the river as having regular quality throughout the studied section. This situation could indicate that the river presented a low chemical risk associated with sanitary interest substances considered by the index; however, for a thorough and integral assessment of the risk, the possibility of adapting an index must be considered which includes other substances being dumped which are related to the socio-economic activities predominating in the basin such as pesticides, phenols and other metals.

The assessed WQI reflected the deterioration of river water quality, mainly at stations 3, 4 and 5, and this deterioration was strongly influenced by domestic, industrial and agricultural wastewater discharge, directly or through tributary rivers. The variables that affected water quality the most were pathogens and those associated with the presence of particulate material. Also, the values obtained for the assessed WQI were quite similar to those registered in pre-

En español

In English

miento similar al registrado en estudios previos como el realizado por CVC y la Universidad del Valle (2004), con valores dentro del rango calculado con base en las tendencias históricas reportadas por la CVC durante los quinquenios 1993-1997 y 1998-2002.

vious studies by CVC and Universidad del Valle (2004) having figures in the calculated range based on the historical tendencies reported by CVC during 1993-1997 and 1998-2002.

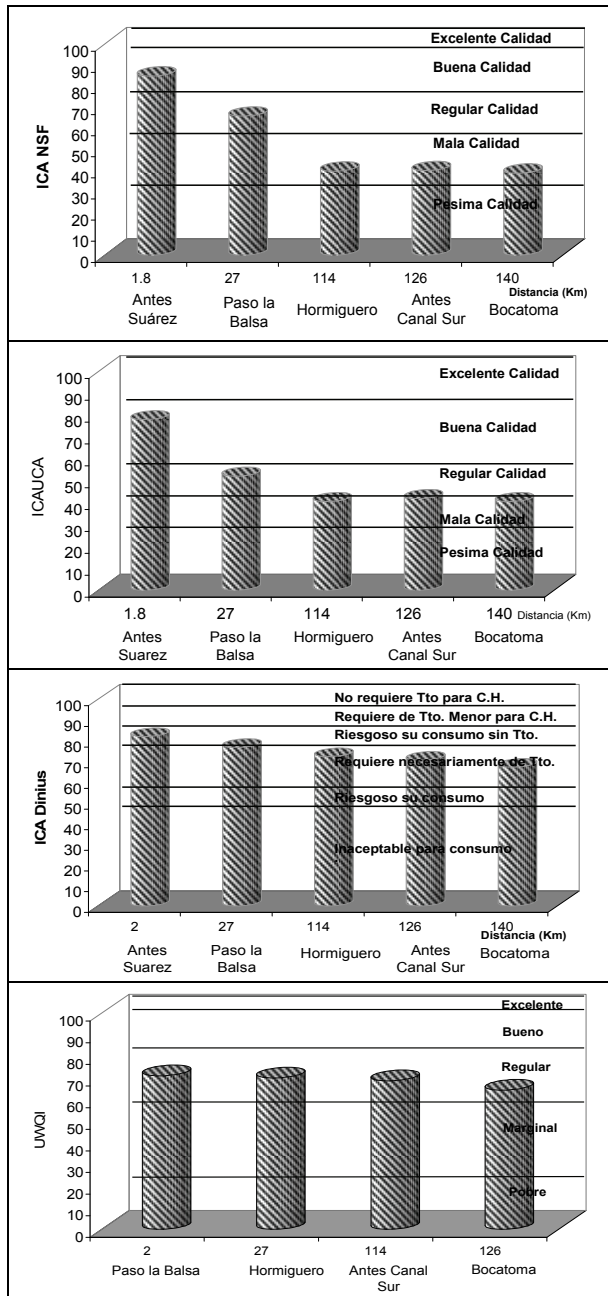
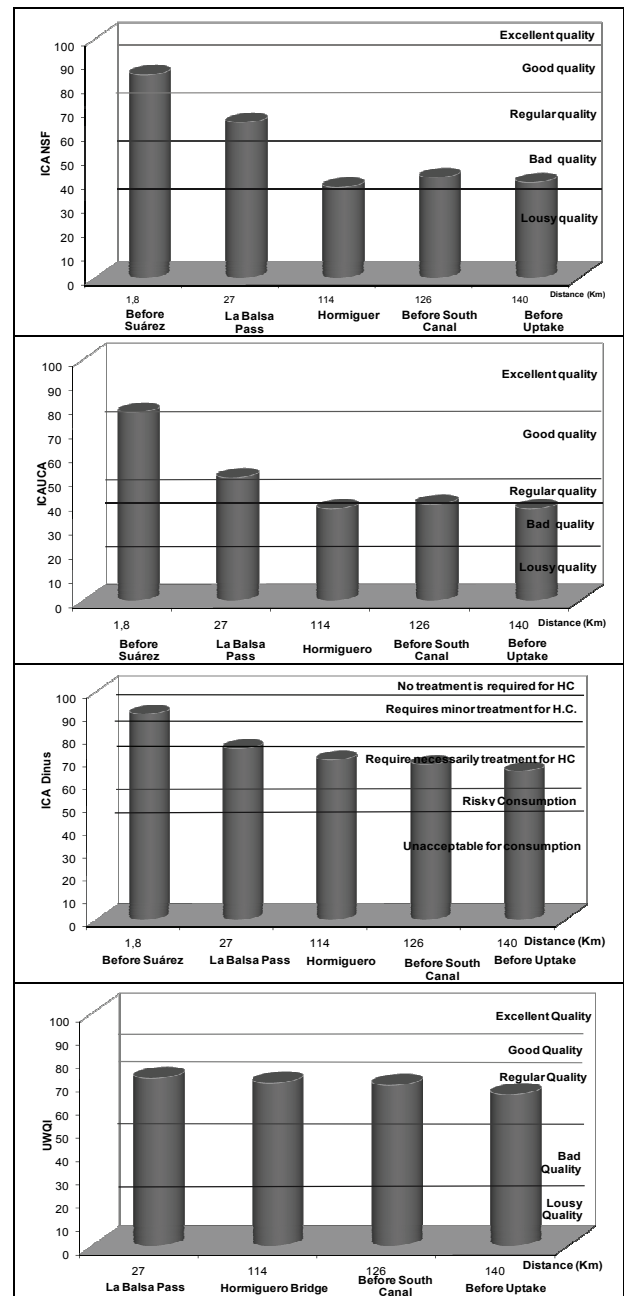


Figura 2. Comportamiento promedio de los ICA evaluados
C.H: consumo humano

Los valores obtenidos son similares a los reportados por CETESB (2006) en la evaluación de calidad de las aguas interiores en el estado de São Paulo, Brasil, principalmente en aquellos sectores influenciados por descargas de aguas residuales provenientes de los centros poblados de mediano y gran tamaño ubicados en sus cuencas, donde éstos son clasificados como de regular calidad de acuerdo con el IQA-CETESB, el cual es una adaptación del ICA-NSF. Así mismo, se observa que uno de los parámetros de mayor incidencia en el valor final de los ICA evaluados son los coliformes



H.C: Human consumption
Figure 2. Average pattern for the WQI being assessed

The obtained figures were similar to those reported by CETESB (2006) regarding water quality assessment of interior streams in the state of São Paulo in Brazil, mainly in sectors influenced by residual water discharges from medium and large populated areas located in the basins. The assessment led to classifying water quality as regular according to WQI-NSF, which is an adaptation of WQI-NSF. It was observed that one of the parameters having the most influence on final WQI figures was faecal coliforms, as repor-

En español

fecales, tal como lo reportan Álvarez *et al.* (2006) en la evaluación de la calidad del agua mediante el ICA-NSF en la cuenca del río Amajac, en México.

Conclusiones

La evaluación de la calidad del agua del río Cauca a lo largo del tramo en estudio muestra su deterioro a medida que avanza en su recorrido, identificándose tres sectores, el primero con condiciones propias de aguas de buena calidad, el segundo con un aumento en los niveles de patógenos y material particulado debido a la presencia de descargas de origen doméstico y agropecuario, y el último con valores característicos de aguas superficiales con mayor deterioro en su calidad asociados principalmente al incremento en las actividades agrícolas, industriales y urbanas en este sector y al manejo inadecuado de las fuentes tributarias, que además de problemas de contaminación por actividades antrópicas presentan procesos erosivos.

Los ICA evaluados confirman el deterioro creciente en la calidad del agua del río Cauca a medida que es afectado por las diversas actividades socioeconómicas desarrolladas en la cuenca, presentando en general calidad entre regular y mala, siendo necesario su tratamiento para la destinación del recurso al consumo humano, e incluso la incorporación de tratamientos específicos como la adsorción con carbón activado y otros. El tramo que presenta los más bajos índices es el comprendido entre Hormiguero y Bocatoma Puerto Mallarino.

La significativa incidencia de los microorganismos patógenos y del material particulado sobre el valor final de los ICA resalta la necesidad inmediata de aplicar estrategias eficientes de manejo de vertimientos de origen doméstico y pecuario y de control de la erosión en las subcuencas, con el fin de mejorar la calidad del agua de esta fuente tan importante para el país y principalmente para la región del suroccidente colombiano.

Dada la alta variabilidad y complejidad en la calidad del río Cauca y su elevado uso como fuente de abastecimiento para consumo por parte de un gran número de municipios colombianos, es importante considerar el desarrollo o adaptación de un índice que involucre parámetros representativos sobre la presencia de las sustancias causantes de riesgo sanitario en esta fuente, como fenoles, color verdadero, pesticidas y otros, el cual presenta una estructura similar a la del DQWI que considera tanto la variación en el tiempo como en el espacio de los parámetros que lo conforman y la comparación de éstos con la normatividad vigente, permitiendo una evaluación más integral del río.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo técnico y económico prestado por Colciencias, Emcali EICE ESP y la Universidad del Valle para el desarrollo del estudio.

Bibliografía / References

- Álvarez, G., Calidad de Agua., Dirección General de Salud Pública, Ministerio de Protección Social, Memorias del Foro internacional del Agua, Bogotá, 2008. www.minambiente.gov.co/contento/contenido.aspx?conID=1945&catID=514
- Álvarez, A., Rubiños, J. E., Reyes, F.J., Alarcón, J.J., Hernández, E., Ramírez, C., Mejía, E., Pedrero, F., Nicolás, E., Salazar, E., Índice de Calidad del Agua en la cuenca del río Amajac,

In English

ted by Álvarez *et al.*, (2006) when assessing water quality by WQI-NSF in the Amajac river basin in Mexico.

Conclusion

Assessment of water quality along the studied section of the Cauca River showed progressive deterioration so that three sectors were identified; the first had good quality river water, the second had an increase in pathogens and particulate material due to the presence of domestic and agricultural water discharge and the third had surface water characteristics with increased deterioration in quality, mainly due to domestic, industrial and agricultural activity in the sector and inappropriate tributary source management which, besides producing contamination problems due to anthropic activities, presented erosion.

The assessed WQI confirmed growing Cauca River water quality deterioration with increasing socio-economic activity in its basin. The river presented overall regular to bad quality so that it must be treated for human consumption and even the incorporation of specific treatment operations such as activated carbon adsorption. The section presenting the lowest figures for the indexes lies between Hormiguero and Puerto Mallarino water uptakes.

The high impact of pathogen microorganisms and particulate material on final WQI figures pointed out the immediate need to apply efficient strategies for domestic and agricultural discharge management and controlling sub-basin erosion to improve water quality in this important water source for the country and mainly for south-western Colombia.

Due to the high variability and complexity of Cauca River quality and its necessary use as a water source for supplying a vast number of populations besides the city of Cali, an index must be developed or adapted including representative parameters for the presence of substances causing sanitary risks in this source, such as phenols, true colour and pesticides. This index should have a similar structure to the DWQI which considers variations in time and space of the parameters comprising it and comparing these with current legislation, so that more integral river assessment can be carried out.

Acknowledgments

The authors wish to thank COLCIENCIAS and EMCALI EICE ESP for technical and economic support and the Universidad del Valle for developing this study.

Hidalgo, México: Diagnóstico y Predicción., Revista Internacional de Botánica Experimental, Vol. 75, 2006, pp. 71-83.

Andesco., Retos del sector empresarial para el desarrollo y mejoramiento del sector de agua potable y saneamiento en las regiones., Memorias del Foro internacional del Agua, Bogotá, 2008. www.minambiente.gov.co/contento/contenido.aspx?conID=1945&catID=514

- APHA, AWWA y WPCF., Standard methods for the examination of water and wastewater., U.S.A, 20th ed., 2005.
- Betancourt, W., Rose, J., Drinking water treatment processes for removal of Cryptosporidium and Giardia., Veterinary Parasitology, Vol. 126, Dic., 2004, pp. 219-234.
- Boyacioglu H., Development of a water quality index based on a European classification scheme., Water SA, Vol. 33, No. 1, Ene., 2007, pp. 101-106.
- Brown, R., Maclelland, N., Deininger, R., Tozer, R., A Water Quality Index – Do We Dare?. Water and Sewage Works, Vol. 11, Oct., 1970, pp. 339-343.
- Canter, L., Manual de evaluación del impacto ambiental. Técnicas para la elaboración de estudios de impacto., Mc Graw Hill (ed.), Madrid, España, 1998, pp. 154-162, 231-294.
- CETESB -Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental-, Relatório de qualidade das águas interiores no estado de São Paulo. Anexo V. Brasil. 2006. www.cetesb.sp.gov.br
- CVC, Universidad del Valle., Estudio de la calidad del agua del río Cauca y sus principales tributarios mediante la aplicación de Índices de Calidad y Contaminación., Proyecto Modelación del Río Cauca (PMC), Fase II, Cali, Valle., Vol. X., 2004.
- Dinius, S. H., Design of an Index of Water Quality., Water Resources Bulletin, Vol. 23, No. 11, 1987, pp. 833-843.
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales., El Medio Ambiente en Colombia., Bogotá. 2da ed., Bogotá, IDEAM., 2001, pp. 151-156.
- Ministerio de Salud., Decreto 1594 de 1984., Colombia, 1984.
- Ministerio de Desarrollo Económico., Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS 2000., Colombia, 2000.
- Ott, W. R., Environmental indices: Theory and practice., Ann Arbor Science Publishers (ed), Michigan, 1978.
- Rojas, O., Índices de Calidad del agua en Fuente de Captación., Memorias Seminario Internacional sobre calidad del agua para consumo, Cali, ACODAL. 1991.
- Torres, P., Cruz, C.H., González, M., Gutiérrez H.M., Barba, L.E., Escobar, J.C., Delgado, L. G., Reducción del Pentaclorofenol en el agua cruda del río Cauca mediante adsorción con carbón activado en procesos de potabilización., Ingeniería e Investigación, Vol. 28, No. 3, Dic., 2008, pp. 92-95.
- Torres, P., Cruz, C.H., Patiño, P., Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano., Una revisión crítica., Revista Ingenierías Universidad de Medellín, Vol. 8, No. 15 suppl.1, Jul., 2009, pp.79-94.
- UNEP -United Nations Environment Programme-, Global Drinking Water Quality Index Development and Sensitivity Analysis Report. Ontario, Canada. 2007.www.gemswater.org
- UNESCO., Water Quality Assessments, A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring., Chapman and Hall (ed), Londres, E & FN Spon., 1996, pp. 59- 108.
- UNIVALLE y EMCALI., Fortalecimiento de las Capacidades analíticas para Identificación de Riesgos sanitarios en el Agua cruda del Río Cauca y Aplicación de Estrategias para la Minimización del Riesgo en los Procesos de Potabilización., Proyecto de investigación, Cali, 2009.