

ÍNDICES DE CALIDAD DE AGUA EN FUENTES SUPERFICIALES UTILIZADAS EN LA PRODUCCIÓN DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO. UNA REVISIÓN CRÍTICA

Patricia Torres*

Camilo Hernán Cruz**

Paola Janeth Patiño***

Recibido: 11/12/2008

Aceptado: 05/10/2009

RESUMEN

El deterioro de las fuentes de abastecimiento de agua incide directamente en el nivel de riesgo sanitario presente y en el tipo de tratamiento requerido para su reducción; la evaluación de la calidad del agua permite tomar acciones de control y mitigación del mismo, garantizando el suministro de agua segura. Una herramienta son los índices de calidad de agua -ICA-; los de tipo multiplicativo son más sensibles a las variaciones en la calidad del agua que los de tipo aditivo. Aquellos que consideran las variaciones en el tiempo y en el espacio y además permiten una comparación con la normativa vigente en la zona de estudio, como en CCME - WQI y DWQI, son más adecuados para su aplicación en fuentes como el río Cauca que está expuesto a constantes variaciones de calidad. Para el uso de estas fuentes para abastecimiento humano, valores entre 90 y 100 de la generalidad de los ICA implican tratamientos menores como sólo desinfección, mientras que entre 50 y 90 requieren tratamiento convencional y en algunos casos tratamientos especiales que están asociados a mayores costos y complejidad.

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

* Ing. Sanitaria Universidad del Valle, MSc, PhD. Universidad de Sao Paulo - Brasil, Prof. Asociada Universidad del Valle, A.A. 25360, Telefax: 3312175, Cali - Colombia. E-mail: patolo@univalle.edu.co

** Ing. Sanitario Universidad del Valle, MSc, 3312175 Cali - Colombia. E-mail: camcruz@univalle.edu.co

*** Ing. Sanitaria Universidad del Valle, Esp. Ing. Sanitaria y Ambiental Universidad del Valle, Telefax: 3312175. E-mail: paopatin@univalle.edu.co

WATER QUALITY INDEX IN SURFACE SOURCES USED IN WATER PRODUCTION FOR HUMAN CONSUMPTION. A CRITICAL REVIEW

ABSTRACT

The deterioration of water supply sources directly affect the existing levels of sanitary risks and the type of required treatment to reduce them; water quality evaluation allows taking action in order to control and mitigate these risks, guaranteeing the availability of safe fresh water. One of the tools which can be used is Water Quality Index -WQI, the multiplicative types are more sensitive to water quality variations than the additive types. Those WQI which take into consideration variations in time and space and that also allow making a comparison with the current regulations and norms in the area of study, such as CCME - WQI and DWQI, are more suitable to be used in water sources as the Cauca River which is exposed to constant quality variations. For the use of these sources of water supply for human consumption, values falling between 90 and 100 of the general WQI require minor treatments such as disinfection, while values falling between 50 and 90 require conventional treatments and in certain cases, special treatments which entitle greater costs and complexity treatment.

Key words: sanitary risk, water quality, water quality index - WQI, water treatment

INTRODUCCIÓN

Las fuentes de agua superficial son eje de desarrollo de los seres humanos que permiten el abastecimiento para las diferentes actividades socioeconómicas llevadas a cabo en los asentamientos poblacionales; no obstante, de forma paradójica muchas de estas actividades causan alteración y deterioro de las mismas. En general, las aguas superficiales están sometidas a contaminación natural (arrastre de material particulado y disuelto y presencia de materia orgánica natural -MON-) y de origen antrópico (descargas de aguas residuales domésticas, escorrentía agrícola, efluentes de procesos industriales, entre otros).

El mayor impacto sobre la salud pública se da a través de los sistemas de abastecimiento de agua; la alteración de las características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas de la fuente de abastecimiento incide directamente sobre el nivel de riesgo sanitario presente en el agua [1], el cual se define como el riesgo de transportar agentes contaminantes que puedan causar enfermedades de origen hídrico al hombre y los animales o alterar el normal desempeño de las labores dentro del hogar o la industria [2].

El riesgo es el resultado de comparar la vulnerabilidad de la población frente a una amenaza o factores de riesgo [3], y puede clasificarse como agudo o crónico; el riesgo agudo está relacionado con la posibilidad de enfermarse a muy corto plazo con dosis infecciosas bajas del contaminante como la contaminación microbiológica, y el riesgo crónico está relacionado con la presencia de contaminantes de naturaleza química como compuestos orgánicos e inorgánicos que afectan la salud del ser humano después de largos períodos de exposición [4]. El riesgo agudo es prioridad para su control, debido al gran impacto que puede causar sobre la salud de la población; el riesgo crónico es segunda prioridad en sistemas de abastecimiento expuestos a contaminación microbiológica severa [5].

En la mayoría de países en desarrollo, el riesgo microbiológico es bastante marcado principalmente asociado a un inadecuado saneamiento, lo que se ratifica en la Agenda 21 de la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo que afirma que aproximadamente 80% de todas las enfermedades y más de una tercera parte de las defunciones en estos países tienen por causa el consumo de agua contaminada y hasta una décima parte del tiempo productivo de las personas se dedica a enfermedades relacionadas con agua [1].

En el país, el deterioro del recurso hídrico también está asociado principalmente con vertimientos de aguas residuales domésticas, industriales y de producción agrícola y ganadera 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 éstas [6]. A pesar de que en promedio el 78% de la población colombiana tiene acceso a agua potable [7] en algunos departamentos se evidencian problemas de calidad del agua para consumo humano [8].

El marcado deterioro de los cuerpos de agua superficial hace prioritaria su evaluación con el fin de tomar acciones de control y mitigación del nivel de riesgo que será determinante en la complejidad y costos del tratamiento del agua para consumo humano, como lo evidencia la reglamentación vigente para aguas superficiales destinadas al consumo humano. En el decreto 1594 son consideradas dos opciones de tratamiento dependiendo de la calidad del agua cruda -sólo desinfección y tratamiento convencional- [9]; el Reglamento de Agua y Saneamiento -RAS- presenta cuatro opciones de tratamiento, desde desinfección hasta tratamiento convencional (coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección) más la aplicación de tratamientos específicos [10].

Estudios como los de [11-13], muestran que el empleo de carbón activado dentro de los procesos

de potabilización incide de manera directa en la reducción del riesgo químico, gracias a la reducción de MON y compuestos fenólicos. Escobar et al. [14] evaluaron la influencia del cambio en el punto de aplicación del cloro en la precloración para reducir el riesgo químico por la potencial formación de trihalometanos -THM- sin comprometer la calidad microbiológica del agua tratada.

Los índices de calidad del agua -ICA- surgen como una herramienta simple para la evaluación del recurso hídrico fundamental en procesos decisorios de políticas públicas y en el seguimiento de sus impactos [15]. En [16-19], entre otros, se definen los ICA como una expresión simple de una combinación más o menos compleja de un número de parámetros que sirven como expresión de la calidad del agua; el índice puede ser representado por un número, un rango, una descripción verbal, un símbolo o incluso un color.

En este documento se hace una revisión y análisis de los ICA de mayor uso y aplicabilidad, y su importancia para la evaluación de la calidad del agua para consumo humano, previo tratamiento, aplicable a fuentes superficiales con diferentes grados de contaminación como las colombianas.

1. ÍNDICES DE CALIDAD DE AGUA -ICA-

La valoración de la calidad del agua puede ser entendida como la evaluación de su naturaleza química, física y biológica en relación con la calidad natural, los efectos humanos y usos posibles [20]. Para simplificar la interpretación de los datos de su monitoreo, existen índices de calidad de agua (ICA) e índices de contaminación (ICO), los cuales reducen una gran cantidad de parámetros a una expresión simple de fácil interpretación entre técnicos, administradores ambientales y el público en general. La principal diferencia entre unos y otros está en la forma de evaluar los procesos de contaminación y el número

de variables tenidas en cuenta en la formulación del índice respectivo [17].

En términos simples, un ICA es un número único que expresa la calidad del recurso hídrico mediante la integración de las mediciones de determinados parámetros de calidad del agua y su uso es cada vez más popular para identificar las tendencias integradas a los cambios en la calidad del agua [21, 22]. La tabla 1 presenta las principales ventajas y limitaciones de los ICA.

Tabla 1. ICA como herramienta de evaluación de calidad de agua. Ventajas y limitaciones

<i>Ventajas</i>	<i>Limitaciones</i>
<p>Permiten mostrar la variación espacial y temporal de la calidad del agua.</p> <p>Método simple, conciso y válido para expresar la importancia de los datos generados regularmente en el laboratorio.</p> <p>Útiles en la evaluación de la calidad del agua para usos generales.</p> <p>Permiten a los usuarios una fácil interpretación de los datos.</p> <p>Pueden identificar tendencias de la calidad del agua y áreas problemáticas.</p> <p>Permiten priorizar para evaluaciones de calidad del agua más detalladas.</p> <p>Mejoran la comunicación con el público y aumentan su conciencia sobre las condiciones de calidad del agua.</p> <p>Ayudan en la definición de prioridades con fines de gestión.</p>	<p>Proporcionan un resumen de los datos.</p> <p>No proporcionan información completa sobre la calidad del agua.</p> <p>No pueden evaluar todos los riesgos presentes en el agua.</p> <p>Pueden ser subjetivos y sesgados en su formulación.</p> <p>No son de aplicación universal debido a las diferentes condiciones ambientales que presentan las cuencas de una región a otra.</p> <p>Se basan en generalizaciones conceptuales que no son de aplicación universal.</p> <p>Algunos científicos y estadísticos tienden a rechazar y criticar su metodología, lo que afecta la credibilidad de los ICA como una herramienta para la gestión.</p>

Fuente: Adaptado de [21], [23] y [19]

2. EVOLUCIÓN DEL DESARROLLO DE LOS ICA

La evaluación general de la calidad del agua ha sido objeto de múltiples discusiones en cuanto a su aplicación para la regulación del recurso hídrico en el mundo ya que ésta considera criterios que no siempre garantizan el resultado esperado para regiones con diferentes características. Como consecuencia, muchos países han desarrollado estudios e indicadores tendientes a aplicar criterios de evaluación propios, de tal manera que su aplicabilidad corresponda con sus requerimientos y necesidades.

Los intentos para lograr construir un índice que permita calificar la calidad del agua tienen bastante historia. Existe información de que en Alemania en 1848 ya se realizaban algunos intentos por relacionar la presencia de organismos biológicos con la pureza del agua. En los últimos 130 años, varios países europeos han desarrollado y aplicado diferentes sistemas para clasificar la calidad de las aguas; sin embargo, el desarrollo de ICA basados en el empleo de valores numéricos para asignar una gradación de la calidad en un escala prácticamente continua son relativamente recientes [24, 25].

Horton [26] citado por Rodríguez et al. [27] proponen el uso de ICA para estimar patrones o condiciones de contaminación acuática, y son pioneros en la generación de una metodología unificada para su cálculo; sin embargo, el desarrollo e implementación de un ICA de manera formal y demostrada lo hicieron Brown et al. [28] con el apoyo de NSF [29], basándose en la estructura del índice de Horton y en el método Delphi para definir los parámetros, pesos ponderados, subíndices I_i y clasificación a ser empleados en el cálculo. La clasificación consideró las características que debe presentar la fuente de captación para su destinación para consumo humano [29]. A pesar de haber sido desarrollado en Estados Unidos, es ampliamente empleado en el mundo y ha sido validado y/o adaptado en diferentes estudios.

En España, Queralt en el año 1982 desarrolló el índice simplificado de calidad del agua (ISQA) para las cuencas de Cataluña, el cual se basó en 5 parámetros fisicoquímicos y planteó una clasificación de la calidad del agua para 6 usos específicos del recurso, entre los cuales se destaca el abastecimiento para consumo humano [30]. Dinius [31] planteó un ICA conformado por 12 parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, el cual también se basó en el método Delphi, pero a diferencia del ICA-NSF, cuya clasificación está orientada a aguas a ser empleadas como fuente de captación para consumo humano, considera 5 usos del recurso: consumo humano, agricultura, pesca y vida acuática, industrial y recreación.

Los ICA más recientes, cuyo objetivo fundamental es la evaluación de la calidad del agua para consumo humano previo tratamiento, incluyen dentro de su estructura parámetros fisicoquímicos y microbiológicos directamente relacionados con el nivel de riesgo sanitario presente en el agua. Montoya y Contreras [32] plantearon el ICA empleado como herramienta de indicación en el estudio sobre aguas superficiales del Estado de Jalisco-México, conformado por 18 parámetros fisicoquímicos y microbiológicos agrupados en 4 categorías: cantidad de materia orgánica; materia bacteriológica presente; características físicas y materia orgánica. Este índice considera 9 usos, dentro de los cuales se destaca el abastecimiento público.

En Canadá, el Canadian Council of Ministers of the Environment desarrolló un ICA orientado inicialmente a la evaluación de la calidad ecológica de las aguas basado en la comparación de los valores de cada parámetro con un punto de referencia, el cual generalmente es obtenido de una norma o guía de calidad del agua [33-35]; dada su flexibilidad en los parámetros y el uso de directrices para protección de la vida acuática que emplea, el índice permite evaluar la calidad de las aguas destinadas a consumo humano.

En Brasil, la Compañía de Tecnología de Saneamiento Ambiental [15] desarrolló e implementó el ICA de agua cruda para abastecimiento público - IAP como respuesta al aumento en la complejidad de los contaminantes vertidos a las fuentes de agua; su cálculo se realiza mediante el producto de la ponderación de los resultados del índice de calidad de agua -IQA- y el índice de sustancias tóxicas -ISTO-, el primero adaptado a partir del ICA de NSF [29] y el segundo desarrollado en el año 2002.

El ISTO complementa el IQA de tal forma que se garantice una evaluación integral del agua a ser destinada al abastecimiento público previo tratamiento; los parámetros que lo conforman son clasificados en tóxicos y organolépticos, y dado el amplio uso de cuerpos lénticos con presencia de cianobacterias, incluye el número de células de cianobacterias, además de pruebas genéticas como el Test de Ames.

Liou et al. [36] desarrollaron un ICA para aguas superficiales de Taiwán basado en 13 parámetros fisicoquímicos y microbiológicos orientados a evaluar la presencia de materia orgánica, material particulado, sustancias tóxicas y microorganismos.

UNEP [37] presentó una primera versión de un ICA mundial de agua potable (Drinking Water Quality Index - DWQI) que se aplica a las fuentes de abastecimiento a ser usadas para producir agua potable y que fue desarrollado ante la necesidad de evaluar la situación mundial de las fuentes de captación. La estructura de cálculo es la del ICA - CCME y los parámetros y valores guía para su cálculo se basan en las guías para agua potable de la Organización Mundial de la Salud -OMS-.

En Europa, Boyacioglu [38] desarrolló el Universal Water Quality Index -UWQI- conformado por 11 parámetros fisicoquímicos y uno microbiológico, con el objetivo de proporcionar un método más sencillo para describir la calidad de las aguas superficiales utilizadas para el abastecimiento de

agua potable. El cálculo se basa en las directivas de la Unión Europea para aguas a ser destinadas al consumo humano previo tratamiento, con el fin de facilitar su uso en los diferentes países que la conforman.

En el ámbito nacional y regional, se han desarrollado diferentes estudios orientados a desarrollar o adaptar ICA acordes con las características ambientales de algunas fuentes superficiales. Rojas [39] adaptó el ICA-NSF a las condiciones específicas del río Cauca, reduciendo el número de parámetros que lo conforman con base en el análisis del comportamiento de éstos en el tiempo y en el espacio y modificando los pesos porcentuales asignados a cada parámetro de acuerdo con su nivel de importancia en la evaluación de la calidad del agua del río Cauca.

Ramírez y Viña [40] desarrollaron los índices de contaminación -ICO- a partir del análisis de componentes principales (ACP) aplicado a información fisicoquímica resultante de diferentes estudios limnológicos relacionados con la industria colombiana del petróleo; estos índices evalúan el nivel de contaminación del agua mediante la agrupación de variables fisicoquímicas que denotan la misma condición ambiental. Actualmente existen nueve ICO entre los cuales se destacan el ICO por materia orgánica -ICOMO-; el ICO por mineralización -ICOMI-; y el ICO por sólidos -ICOSUS-.

La CVC y la Universidad del Valle [41] adaptaron el ICAUCA a las condiciones ambientales del río Cauca en el tramo Salvajina - La Virginia, la cual se basó en el comportamiento de la calidad del agua del río en este tramo y en la revisión de diferentes ICA desarrollados a nivel mundial a partir de los cuales se definieron los parámetros, subíndices y ecuaciones a ser considerados en el mismo.

La importancia de los ICA no sólo se limita a la evaluación de la calidad de las fuentes superficiales. En el país, el Decreto 1575 de 2007 considera los ICA como uno de los instrumentos básicos

para garantizar la calidad del agua para consumo, reglamentando el Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano - IRCA que mide el grado de riesgo de ocurrencia de enfermedades relacionadas con el no cumplimiento de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua para consumo humano una vez ha sido sometida a diferentes procesos de tratamiento que garantizan su potabilidad.

3. ESTRUCTURA DE CÁLCULO DE LOS ICA

La estructura de cálculo de la mayoría de los ICA se basa en la normalización de los parámetros que los conforman de acuerdo con sus concentraciones, para su posterior ponderación en función

de su importancia en la percepción general de la calidad agua; se calcula mediante la integración de las ponderaciones de los parámetros a través de diferentes funciones matemáticas [37].

Existen dos enfoques para el cálculo: *i)* el *producto ponderado* en el cual los pesos dan importancia a los puntajes y todos ellos son ponderados de acuerdo a la importancia de los pesos y luego son multiplicados y *ii)* la *suma ponderada*, en la cual cada puntaje es multiplicado por su peso y los productos son sumados para obtener el índice si los pesos son iguales para cada puntaje. El valor del índice es llamado valor aritmético no ponderado, si la suma de los pesos no es igual, se conoce como valor aritmético de la calidad del agua [42]. La tabla 2 muestra las ecuaciones de cálculo de los ICA, asociados por grupos de acuerdo con el tipo de ecuación utilizada.

Tabla 2. Ecuaciones de Cálculo empleadas para la determinación de ICA

Grupo	Índice	Ecuación	Observaciones
1	ICA NSF (EU) ICA Dinius (EU) IQA CETESB (Brasil) ICA Rojas (Colombia) ICAUCA (Colombia)	$ICA_m = \prod_{i=1}^n I_i^{w_i}$	Promedio geométrico ponderado: Wi: peso o porcentaje asignado al i-ésimo parámetro Ii: subíndice de i-ésimo parámetro
2	CCME-WQI (Canadá) DWQI (EU)	$ICA = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right)$	El índice incorpora tres elementos: Alcance (F1): porcentaje de parámetros que exceden la norma. Frecuencia (F2): porcentaje de pruebas individuales de cada parámetro que excede la norma. Amplitud (F3): magnitud en la que excede la norma cada parámetro que no cumple
3	UWQI (Europa)	$UWQI = \sum_{i=1}^n w_i I_i$	Promedio aritmético ponderado: Wi: peso o porcentaje asignado al i-ésimo parámetro Ii: subíndice de i-ésimo parámetro
4	ISQA (España)	$ISQA = T (DQO + SS + OD + Cond)$	T: Temperatura DQO: Demanda Química de Oxígeno OD: Oxígeno Disuelto Cond: Conductividad SS: Sólidos suspendidos A partir de 2003 el ISQA se empezó a calcular reemplazando la DQO por el carbono orgánico total (COT en mg/l)

Grupo	Índice	Ecuación	Observaciones
5	IAP (Brasil)	$IAP = ISTO \times IQA \text{ CETESB}$ $ISTO = ST \times SO$ $ST = \text{Mín-1} (q_1, q_2, \dots, q_n) \times \text{Mín-2} (q_1, q_2, \dots, q_n)$ $SO = \text{Media Aritmética} (q_a, q_b, \dots, q_n)$	Donde: IQA: Índice de Calidad del Agua adaptado del ICA NSF para las condiciones de Brasil ISTO: Índice de Sustancias Tóxicas y Organolépticas ST: Ponderación de los dos subíndices mínimos más críticos del grupo de sustancias tóxicas SO: Ponderación obtenida a través de la media aritmética de los subíndices del grupo de sustancias organolépticas

Fuente: Elaboración propia

Se observa que los ICA-NSF e ICA-Dinius desarrollados en Estados Unidos y aquellos adaptados para ríos de Latinoamérica [15, 39, 41] emplean para su cálculo el producto ponderado, comúnmente conocido como ecuación de tipo multiplicativo. La NSF sugiere el empleo de ecuaciones de tipo multiplicativo ya que son más sensibles que las ecuaciones de tipo aditivo o suma ponderada a valores extremos en los subíndices I_i , asociados generalmente con fuertes variaciones en la calidad del agua, evitando el fenómeno de eclipsamiento que se presenta cuando se calcula un valor satisfactorio aunque el subíndice no lo sea [17].

Algunos de los ICA más recientes proponen estructuras de cálculo orientadas a una evaluación más amplia de calidad del agua (variación en el tiempo y el espacio) como CCME-WQI y DWQI, en los cuales se evalúa para un periodo de tiempo determinado el número de parámetros que exceden un punto de referencia, el número de registros que superan este punto y la magnitud en que se supera esta referencia. Estos índices requieren información medida a lo largo de un periodo de tiempo, lo que puede ser favorable principalmente en fuentes con amplias variaciones de calidad en el tiempo.

El UWQI de Europa emplea para una ecuación de tipo aditivo o suma ponderada que es menos sen-

sible a variaciones extremas en la calidad del agua, condición que limita su uso en la evaluación de la calidad del agua en fuentes superficiales sometidas a cambios súbitos y extremos en sus características físicas, químicas y microbiológicas.

El ISQA emplea el producto de la temperatura por la sumatoria de los valores obtenidos mediante ecuaciones que transforman las concentraciones de DQO, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto y conductividad en un número adimensional, tal como lo hacen otros ICA.

El IAP es el producto resultante de dos índices (IQA e ISTO), y está conformado por diferentes funciones de agregación; el IQA, al ser una adaptación del ICA-NSF, emplea una ecuación basada en el promedio ponderado y en el caso del ISTO; la ecuación empleada es el producto de la ponderación de los dos subíndices mínimos más críticos del grupo de sustancias tóxicas (ST) por la ponderación obtenida a través de la media aritmética de los subíndices del grupo de sustancias organolépticas (SO).

Es importante considerar que de los ICA mostrados y teniendo en cuenta las características del río Cauca, el índice que se proponga o adapte debe en lo posible considerar la tendencia a cambios en las condiciones extremas de la fuente tal como lo propone la estructura de cálculo de los índices CCME - WQI y DWQI.

4. PARÁMETROS QUE CONFORMAN LOS ICA

Los parámetros a ser incluidos en los ICA han estado marcados, desde sus inicios, por la apreciación de expertos, agencias o entidades gubernamentales, que son los que determinan en el ámbito

legislativo su importancia al establecerlos como estándares de calidad del agua [17]. Dunnette [43] recomienda seleccionar los parámetros de las cinco categorías más comúnmente reconocidas: nivel de oxígeno, eutrofización, aspectos de salud, características físicas y sustancias disueltas. La tabla 3 muestra los parámetros empleados en los ICA presentados.

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos empleados por diferentes ICA

País	Estados Unidos		UNEP-GEMS		Unión Europea	España	Brasil		Colombia		Frec*	
	Índice	ICA NSF 1970	ICA Dinius 1987	DWQI		UWQ I2007	ISQA 1982	IAP		ICA Rojas 1991		ICAUCA 2004
Parámetro				HWQ I2007	AWQ I2007			IQA 1975	ISTO 2002			
	OD	X	x			x	x	x		x	x	0.70
	pH	X	x		x			x		x	x	0.70
	DBO	X	x			x		x		x	x	0.60
	Nitratos	X	x	x		x						0.50
	Coliformes Fecales	X	x					x		x	x	0.50
	Temperatura	X	x				x	x				0.40
	Turbiedad	X						x		x	x	0.40
	Sólidos Disueltos Totales	X						x		x	x	0.40
	Fósforo Total					x		x			x	0.30
	Cadmio			x		x			x			0.30
	Mercurio			x		x			x			0.30
	Conductividad		x				x					0.20
	Sólidos Suspendedos						x				x	0.20
	Color		x								x	0.20
	Nitrógeno Total							x			x	0.20
	Cloruros		x		x							0.20
	Plomo			x					x			0.20
	Cromo Total			x					x			0.20
	Arsénico			x		x						0.20
	Fluoruro			x		x						0.20
	Manganeso			x					x			0.20
	Zinc				x				x			0.20
	Coliformes Totales		x			x						0.20
	DQO						x					0.10
	Alcalinidad		x									0.10

<i>País</i>	<i>Estados Unidos</i>		<i>UNEP-GEMS</i>		<i>Unión Europea</i>	<i>España</i>	<i>Brasil</i>		<i>Colombia</i>		<i>Frec*</i>
<i>Índice</i>	<i>ICA NSF 1970</i>	<i>ICA Dinius 1987</i>	<i>DWQI</i>		<i>UWQI 2007</i>	<i>ISQA 1982</i>	<i>IAP</i>		<i>ICA Rojas 1991</i>	<i>ICAUCA 2004</i>	
<i>Parámetro</i>			<i>HWQI 2007</i>	<i>AWQI 2007</i>			<i>IQA 1975</i>	<i>ISTO 2002</i>			
Dureza		x									0.10
Nitritos			x								0.10
Amoniaco				x							0.10
Fosfatos	X										0.10
Sodio				x							0.10
Sulfatos				x							0.10
Hierro				x							0.10
Cobre			x								0.10
Boro			x								0.10
Niquel								x			0.10
Cianuro					x						0.10
Selenio					x						0.10
PFTHM								x			0.10
Aluminio Disuelto								x			0.10
Cobre disuelto								x			0.10
Hierro Disuelto								x			0.10
COT						x					0.10
Total Parámetros	9	12	18		12	5	20		6	10	

Fuente: Elaboración propia

En la última columna de la tabla se presenta la frecuencia de uso de cada parámetro en los diez ICA presentados; se observa que los mayormente empleados pertenecen a las categorías recomendadas por Dunnette [43], y son el oxígeno disuelto y el pH los parámetros de mayor uso (se usan en siete de diez ICA), seguidos en orden decreciente por la DBO, los nitratos y los coliformes fecales, la temperatura, la turbiedad y los sólidos disueltos totales. Otros parámetros como los metales pesados, los cuales están relacionados con el riesgo químico, son incluidos principalmente en los ICA desarrollados en los últimos años (DWQI, UWQI e IAP) y cuya evaluación se centra en la destinación del recurso para consumo humano previa potabilización.

Este comportamiento se relaciona con las tendencias actuales en cuanto a la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano en la cual, de acuerdo con OMS [44] se debe dar prioridad a aquellas sustancias que se sabe son de importancia para la salud y que sean conocidas por estar presentes en grandes concentraciones en las fuentes de abastecimiento de agua.

Los parámetros seleccionados en el UWQI son los representativos de la presencia de sustancias químicas en el agua y causantes de impactos sobre la salud y el ambiente, razón por la cual se incluyeron algunos recomendados por las guías de OMS [44] para monitoreo y evaluación de la calidad química del agua potable. De forma similar fueron selec-

cionados los parámetros del DWQI, empleándose como criterio de selección las directrices de OMS [44] para calidad de agua potable en las cuales los parámetros son agrupados en dos categorías: salud y aceptabilidad, razón por la cual el DWQI se subdivide en dos índices, el ICA Salud (HWQI) y el ICA Aceptación (AWQI), los cuales consideran parámetros relacionados con la problemática a evaluar.

La complejidad de las sustancias químicas que pueden estar presentes en las fuentes de agua está estrechamente relacionada con las actividades socioeconómicas desarrolladas en la cuenca y las características de los suelos que la conforman; sin embargo, según Thompson et al. [45], existen cuatro parámetros fundamentales en la evaluación de la calidad química del agua que se deben considerar, independiente de otras sustancias químicas seleccionadas de acuerdo con condiciones locales: fluoruro, arsénico, selenio y nitratos por su demostrado efecto perjudicial para la salud.

En los ICA mostrados en la tabla 3, fluoruro y arsénico sólo son considerados en DWQI y UWQI, ambos desarrollados teniendo en cuenta las últimas tendencias para la evaluación de la calidad del agua para consumo humano y concebido para ser aplicados a nivel mundial; en el caso del selenio este sólo es considerado en el UWQI.

Con relación a la evaluación del riesgo microbiológico, cinco de los diez ICA presentados emplean como parámetro indicador los coliformes fecales y es un parámetro que prevalece aún en los ICA más recientes. Esta tendencia confirma lo reportado por OMS [46] en el sentido que los riesgos microbiológicos siguen siendo la principal preocupación en los países desarrollados y en los países en desarrollo.

En el DWQI, que se encuentra actualmente en revisión, en su primera versión incluye los coliformes fecales, sin embargo, después de analizar su incidencia en el valor final del índice, son excluidos ya que representan más del 75% de dicho valor lo

cual, de acuerdo con la UNESCO amerita una revisión detallada de este parámetro y la evaluación de la necesidad de plantear un índice de contaminación microbiológica complementario al DWQI.

En la tabla 3 también se observa que los ICA adaptados al río Cauca consideran principalmente parámetros relacionados con la presencia de materia orgánica, material particulado y disuelto, nutrientes y patógenos pero no consideran los asociados con la presencia de sustancias tóxicas los cuales, teniendo en cuenta los principales usos del suelo en la cuenca alta del río Cauca (cultivo de caña de azúcar y ganadería extensiva, [47] que se caracterizan por el uso de agroquímicos como fertilizantes y pesticidas), podrían llegar a ser prioritarios en la evaluación de la calidad del agua para consumo humano.

Con relación al número de parámetros empleados, éste varía de un índice a otro; sin embargo, en la tabla 3 se puede observar que los ICA desarrollados en los últimos años y cuyo principal objetivo es la evaluación del agua a ser destinada para consumo humano previo tratamiento, emplean un mayor número de parámetros principalmente de tipo fisicoquímico, asociados a la evaluación del riesgo químico en el agua.

5. ASIGNACIÓN DE PESOS A CADA PARÁMETRO

La asignación de pesos (ponderación) de cada parámetro tiene mucho que ver con la importancia de los usos pretendidos y la incidencia de cada variable en el índice [48]. De acuerdo con Sacha y Espinoza [23] en el caso de ICA aplicables a aguas superficiales pareciera que el mayor peso debiera ser otorgado a los parámetros OD, DBO, nitratos, sólidos suspendidos y coliformes totales. En el caso de ICA aplicables a fuentes de agua potable debiera otorgarse peso, además, al N-NO₃, color, arsénico y boro. La tabla 4 presenta los pesos asignados a los parámetros que conforman los ICA, de acuerdo con el grado de importancia dentro de cada uno de éstos.

Tabla 4. Pesos relativos asignados a los parámetros que conforman los ICA

<i>País</i>	<i>Estados Unidos</i>		<i>Unión Europea</i>	<i>Colombia</i>	
<i>Índice</i>	<i>ICA NSF 1970</i>	<i>ICA Dinius 1987</i>	<i>UWQI 2007</i>	<i>ICA Rojas 1991</i>	<i>ICAUCA 2004</i>
Parámetro					
OD	0.17	0.109	0.114	0.25	0.21
pH	0.11	0.077	0.029	0.17	0.08
DBO	0.11	0.097	0.057	0.15	0.15
Nitratos	0.10	0.09	0.086		
Coliformes Fecales	0.16	0.116		0.21	0.16
Temperatura	0.10	0.077			
Turbiedad	0.08			0.11	0.07
Sólidos Disueltos Totales	0.07			0.11	0.07
Fósforo Total			0.057		0.08
Cadmio			0.086		
Mercurio			0.086		
Conductividad		0.079			
Sólidos Suspendedos					0.05
Color		0.063			0.05
Nitrógeno Total					0.08
Cloruros		0.074			
Arsénico			0.113		
Fluoruro			0.086		
Coliformes Totales		0.09	0.114		
DQO					
Alcalinidad		0.063			
Dureza		0.065			
Fosfatos	0.10				
Cianuro			0.086		
Selenio			0.086		

Fuente: Elaboración propia

Los ICA mostrados en la tabla son lo que emplean asignación de pesos (W) a cada uno de los parámetros que los conforman; los restantes

emplean estructuras de cálculo que no requieren dicha asignación. Con relación al nivel de importancia de cada parámetro de acuerdo con el peso

asignado, el oxígeno disuelto y los coliformes fecales tienen un alto grado de importancia, presentando en general los mayores pesos.

6. CLASIFICACIÓN DE LOS ICA

El valor del ICA permite clasificar el recurso a partir de rangos establecidos que son definidos considerando el o los usos a evaluar. Las categorías, esquemas o escalas de clasificación, son un punto de igual o mayor interés que el cálculo en sí del índice, pues es aquí donde finalmente el valor obtenido es transformado en una característica que define la calidad final del agua [17]. En la figura 1 y la tabla 5 se presentan los rangos de clasificación para cada uno de los ICA presentados.

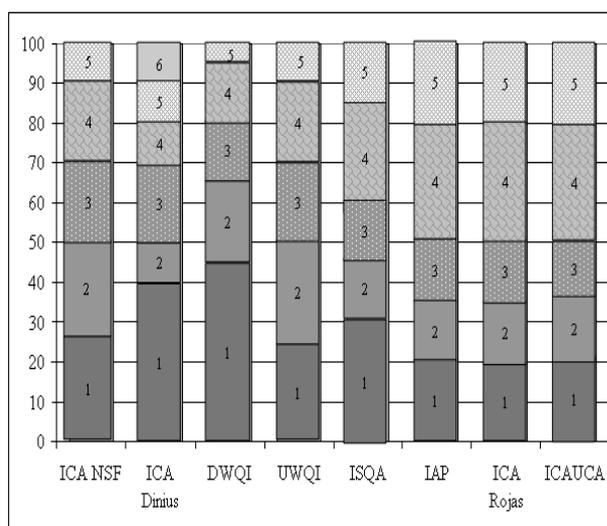


Figura 1. Rangos de clasificación de los ICA

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Clasificación de los ICA

Código	ICA							
	ICA NSF	ICA Dinius	DWQI	UWQI	ISQA	IAP	ICA Rojas	ICAUCA
1	Muy Mala Calidad	Inaceptable su consumo	Pobre	Pobre	No puede usarse	Pésima	Muy Mala	Pésima
2	Mala Calidad	Dudoso para consumo	Marginal	Marginal	Recreación y Refrigeración	Mala	Inadecuada	Inadecuada
3	Mediana Calidad	Tto potabilización necesario	Regular	Regular	Consumo humano con tratamiento especial, Riego, Industrial	Regular	Aceptable	Aceptable
4	Buena Calidad	Dudoso consumo sin Tto	Buena	Buena	Consumo humano con tratamientos convencionales	Buena	Buena	Buena
5	Excelente Calidad	Tto menor requerido	Excelente	Excelente	Todos los usos	Optima	Optima	Optima
6	-	No requiere Tto para consumo	-	-	-	-	-	-

Fuente: elaboración propia

En la tabla 5 se observa que, con excepción del ICA Dinius, la generalidad de los ICA presenta 5 rangos de clasificación de calidad del agua los cua-

les varían de acuerdo con cada índice; sin embargo, los índices IAP, ICA [39] e ICAUCA presentan rangos iguales.

En cuanto a la clasificación de cada rango, ésta generalmente indica el nivel de calidad de la fuente o define los usos para los cuales es apto el recurso con base en la puntuación obtenida en cada ICA. En general se observa que los rangos codificados con los números 1 y 2 clasifican el agua como de mala calidad la cual, de acuerdo con los ICA que definen usos es inaceptable para consumo humano; a partir del rango 3 hasta el 5, las clasificaciones describen aguas de mediana a excelente calidad, que de acuerdo con las recomendaciones dadas por los ICA que definen usos, requieren de tratamiento cuya complejidad depende del rango; así, a menor calidad mayores requerimientos en el tratamiento del agua.

7. CONCLUSIONES

Los ICA son una herramienta útil para la evaluación de la calidad del agua; comparados con los índices aditivos, los que se basan en ecuaciones de tipo multiplicativo pueden favorecer la evaluación del riesgo sanitario, ya que son más sensibles a variaciones en la calidad del agua y evitan el fenómeno de eclipsamiento que se presenta cuando se calcula un valor satisfactorio aunque uno o varios de los parámetros que conforman el índice presenten alteración.

Los parámetros mayormente empleados en los ICA presentados son el oxígeno disuelto y el pH, seguido por la DBO, los nitratos, los coliformes fecales, la temperatura, la turbiedad y los sólidos disueltos totales. Los ICA desarrollados recientemente en Europa y Estados Unidos para la evaluación del recurso hídrico a ser destinado a consumo humano previo tratamiento consideran otros parámetros generalmente indicadores de riesgo químico en la fuente. Con relación al riesgo microbiológico, éste es evaluado en la generalidad de los ICA, empleándose como parámetro indicador los coliformes fecales.

Los índices CCME - WQI y DWQI presentan estructuras de cálculo que permiten una evaluación más amplia e integral de la calidad del agua, ya que consideran la variación en el tiempo y en el espacio y permiten la comparación de los parámetros que los conforman con la normatividad vigente de acuerdo con el uso evaluado, 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.

Al comparar la clasificación empleada por los diferentes ICA se observa que aquellos que definen usos de acuerdo con el valor final obtenido siempre consideran el tratamiento del agua cuya complejidad varía de acuerdo con el nivel de calidad, así aguas con altos valores de ICA (90 - 100) requieren tratamientos menores como sólo desinfección y aguas con valores entre 50 y 90 deben ser sometidas a tratamiento convencional y en algunos casos tratamientos especiales.

Dependiendo del nivel de riesgo sanitario (químico y/o microbiológico) en la fuente, es recomendable que el índice de calidad de agua que se adapte o desarrolle para una fuente específica, considere los parámetros asociados al riesgo.

REFERENCIAS

- [1] *Guía para la Vigilancia y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.*, 2002.
- [2] L. Sabogal, *El riesgo sanitario y la eficiencia de los sistemas de tratamiento en la selección de tecnologías para la potabilización del agua*, Cali: Universidad del Valle, 2000.
- [3] O. Cepis, "Sección 2. Evaluación y manejo del Riesgo," *Manual de Evaluación y Manejo de Sustancias Tóxicas en Aguas Superficiales*, p. 46, 2001.
- [4] C. Guerra, "Ponderación de los Riesgos de origen Microbiano y Químico en la Desinfección del Agua Potable: La Perspectiva Panamericana," *Boletín de Oficina Sanitaria Panamericana*, vol. 115, pp. 451-454, 1993.
- [5] WHO, "Conquering suffering Enriching humanity.," *The World Health Report 1997*, p. 157: WHO Graphics, 1997.

- [6] IDEAM, *El Medio Ambiente en Colombia*, Bogota, 2001.
- [7] ANDESCO, "Retos del sector empresarial para el desarrollo y mejoramiento del sector de agua potable y saneamiento en las regiones.," in Foro internacional del Agua., Bogotá, Colombia, 2008.
- [8] G. Álvarez, "Calidad de Agua," in Foro internacional del Agua, 2008.
- [9] *Decreto 1594 de 1984*, 1984.
- [10] *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico*, 2000.
- [11] H. Abdul, and R. Campbell, "Pentachlorophenol adsorption and desorption, Characteristics of granular activated Carbon," *Water Research*, vol. 30, pp. 2907-2913, 1996.
- [12] D. Cook, G. Newcombe, and P. Sztajn bok, "The application of powdered activated carbon for MIB and geosmin removal: predicting PAC dosis in four raw waters," *Water Research*, vol. 35, pp. 1325-1333, 2001.
- [13] P. Torres, C. Cruz, M. Gonzales *et al.*, "Reducción de Pentaclorofenol en el agua cruda del río Cauca mediante Adsorción con Carbón Activado en procesos de Potabilización," *Revista Ingeniería e Investigación*, vol. 28, no. 3, pp. 92-95, 2007.
- [14] J. C. Escobar, C. H. Cruz, P. Torres *et al.*, "Evaluación del punto de precloración en la reducción de trihalometanos y control microbiológico en el agua cruda de río Cauca 50°," in Congreso de ACODAL y 12 Bolivariano de AIDIS "Integración, productividad y responsabilidad ambiental". Santa Marta, 2007.
- [15] CETESB, *Relatório de qualidade das águas interiores no estado de São Paulo, Anexo V*, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, São Paulo, 2006.
- [16] S. Pesce, and D. Wunderlin, "Use of water quality indices to verify the impact of Cordoba (Argentina) on Suquia River," *Water Research*, vol. 34, pp. 2915-2926, 1999.
- [17] N. Fernández, and F. Solano, *Índices de Calidad y Contaminación del Agua*, Pamplona: Universidad de Pamplona, 2008.
- [18] P. K. Swamee, and A. Tyagi, "Improved Method for Aggregation of Water Quality Subindices," *Journal of Environmental Engineering*, vol. 133, no. 2, pp. 220-225, 2007.
- [19] F. Nasiri, I. Maqsood, G. Huang *et al.*, "Water Quality Index: A Fuzzy River-Pollution Decision Support Expert System.," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 133, pp. 95-105, 2007.
- [20] N. Prat, "Bioindicadores de calidad de las aguas," *Memorias del curso de bioindicadores de Calidad del Agua.*, Medellín: Universidad de Antioquia, 1998.
- [21] *Development and Use of Global Water Quality Indicators and Indices*, 2005.
- [22] N. Samboni, Y. Carvajal, and J. Escobar, "Parámetros Físicoquímicos como Indicadores de Calidad y Contaminación del Agua, Estado del Arte.," *Ingeniería e Investigación*, vol. 27, pp. 172 - 181, 2007.
- [23] A. Sacha, and C. Espinoza, "Determinación de Contenido Natural e Índices de Calidad: ¿Presente y Futuro de Calidad de Aguas?," in XIV Congreso Chileno de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS, Chile, 2001.
- [24] W. R. Ott, *Environmental quality indices: Theory and practice*, Ann Arbor: Ann Arbor Science, 1978.
- [25] R. Behar, M. Zuñiga, and O. Rojas, "Análisis y Valoración del Índice de Calidad de Agua (ICA) de la NSF: Casos Ríos Cali y Meléndez.," *Ingeniería y Competitividad*, vol. 1, pp. 17-27, 1997.
- [26] R. K. Horton, "index-number system for rating water quality," *Water Pollut*, vol. 307, pp. 300-306., 1965.
- [27] E. Rodríguez, A. Ramos, Z. Romero *et al.*, "Aplicación de un Índice de Calidad Acuática en cuerpos de agua de Tabasco, México," CEPIS, 1997.
- [28] R. Brown, N. Maccllelland, R. Deininger *et al.*, "A Water Quality Index - Do We Dare?," *Water and Sewage Works*, vol. 11, pp. 339 - 343, 1970.
- [29] NSF, "WQI - National Sanitation Foundation, Consumer Information," 2006.
- [30] Agencia-catalana-del-agua, "Índices de Calidad," 2003.
- [31] S. H. Dinius, *Design of a Index of Water Quality*, vol. 23, 1987.
- [32] H. Montoya, and C. Contreras, Garcia, V, "Estudio Integral de la Calidad del Agua en el estado de Jalisco. Guadalajara.," Comisión Nacional del Agua., 1997, p. 106.
- [33] CCME, "Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life," Winnipeg Technical Report, CCME Water Quality Index 1.0, 2001, p. 13p.
- [34] F. Khan, T. Husain, and A. Lumb, "Water quality evaluation and trend analysis in selected watersheds of the Atlantic region of Canada," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 88, pp. 221-242, 2003.

- [35] A. Lumb, D. Halliwell, and T. Sharma, "Application of the CCME Water quality index to monitor water quality: a case study of the Mackenzie River Basin, Canada," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 113, pp. 411-429, 2006.
- [36] S. M. Liou, S. L. Lo, and S. H. Wang "A generalized water quality index for Taiwan," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 96, no. 1-3, pp. 32-35, 2004.
- [37] UNEP, *Global Drinking Water Quality Index Development and Sensitivity Analysis Report. Ontario, Canada*, 2007.
- [38] H. Boyacioglu, "Development of a water quality index based on a European classification scheme," *Water SA*, vol. 33, pp. 101-106, 2007.
- [39] O. Rojas, "Índices de Calidad del agua en Fuente de Captación," in Seminario Internacional sobre calidad del agua para consumo, Cali, 1991.
- [40] A. Ramírez, and G. Viña, "Limnología colombiana. Aportes a su conocimiento y Estadísticas de análisis.," Universidad Jorge Tadeo Lozano, 1998.
- [41] CVC, and UNIVALLE, *El Río Cauca en su valle alto: Un aporte al conocimiento de uno de los ríos más importantes de Colombia*, Cali, 2007.
- [42] R. Ball, and R. Church, "Water quality indexing and scoring," *Journal of the Environmental Engineering. Division, American Society of Civil Engineers*, vol. 106, pp. 757-771, 1980.
- [43] D. Dunnette, "A Geographically Variable Water Quality Index Used In Oregon," *Journal of the Water Pollution Control Federation*, vol. 51, pp. 53-61, 1979.
- [44] OMS, "Monitoring and Assessment of Chemical Quality Guidelines for Drinking Water Quality Training Pack," 2006.
- [45] T. Thompson, J. Fawell, S. Kunikane *et al.*, *Chemical safety of drinking-water: Assessing priorities for risk management*, Geneva: WHO, 2007.
- [46] OMS, *Rolling Revision of the WHO Guidelines for Drinking Water Quality*, 2004.
- [47] CVC, "Plan de Acción Trienal 2007 - 2009," CVC, 2007, p. 96.
- [48] N. Fernández, A. Ramírez, and F. Solano, "Índices Físicoquímicos de Calidad de Agua un Estudio Comparativo," in Conferencia Internacional Usos Múltiples del Agua: Para la Vida y el Desarrollo Sostenible, Cali, 2003.