

PROPUESTA DE UN ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA PARA LA AMAZONÍA VENEZOLANA

Carlos F. ESPINOSA JIMÉNEZ¹, Yajaira OLIVO CARMONA²,
Luis JIMÉNEZ PUYOSA³, Juan Carlos AMILIBIA⁴

RESUMEN

Se presenta la conceptualización de un índice de calidad de agua para la Amazonía venezolana, basado en juicio de expertos, investigación documental y consultas a la inteligencia artificial, que contempla 15 parámetros. Para cada parámetro seleccionado se estableció una correspondencia entre una calificación cualitativa (excelente, buena, regular y deficiente) y los rangos de valores correspondientes del parámetro. Se definió además para cada parámetro una ponderación que representa la importancia del parámetro en la definición de la calidad del agua. Lo anterior se establece buscando un equilibrio entre los enfoques antropocéntrico y ecocéntrico de la calidad del agua, equilibrio necesario para lograr un enfoque que a la vez satisfaga los requerimientos ecosistémicos y los usos del agua requeridos por la sociedad. El modelo propuesto se basa en un promedio ponderado del valor de la función de transformación desarrollada y su contenido, para cada parámetro. Entre las conclusiones y recomendaciones finales destacan la necesidad de incluir en el ICA propuesto parámetros de calidad del agua representativos de actividades antrópicas propias de la zona y estudiar sobre el efecto de enmascaramiento por dilución que producen los grandes caudales de los ríos de la Amazonia venezolana.

ABSTRACT

Proposal for a water quality index for the Venezuelan amazon

Conceptualization of a water quality index for the Venezuelan Amazon is presented, based on expert judgment, documentary research, and consultations with artificial intelligence. The index includes 15 parameters. For each selected parameter, a correspondence was established between a qualitative rating (excellent, good, fair, and deficient) and the corresponding ranges of parameter values. A weighting was also defined for each parameter, representing its importance in defining water quality. This was done to find a balance between the anthropocentric and ecocentric approaches to water quality, a necessary equilibrium to achieve an approach that satisfies both ecosystemic requirements and the water uses needed by society. The proposed model is based on a weighted average of the developed transformation function value and its established weighting value for each parameter. Among the final conclusions and recommendations, we highlight the need to include in the proposed ICA water quality parameters representative of anthropogenic activities specific to the area and to study the masking effect caused by dilution produced by the large flows of the rivers of the Venezuelan Amazon.

Palabras clave: Venezuela, Amazonía venezolana, índice de calidad de agua, calidad de agua en la Amazonía, conceptualización de un índice de calidad de agua.

Keywords: Venezuela, Venezuelan Amazon, water quality index, water quality in the Amazon, conceptualization of a water quality index.

Introducción

El agua es el constituyente más importante del organismo humano y de la biósfera del planeta en el que vivimos. Tiene una gran influencia en los procesos bioquímicos que ocurren en la naturaleza. Esta influencia no solo se debe a sus

propiedades fisicoquímicas como molécula bipolar, sino también a los constituyentes orgánicos e inorgánicos que se encuentran en ella. Se considera que el agua es un solvente universal, debido a que es capaz de disolver o dispersar la mayoría de sustancias con las que tiene contacto, sean estas sólidas, líquidas o gaseosas, y de formar con ellas iones,

¹ Profesor Investigador Titular (J) CIDIAT-ULA. Miembro Correspondiente por estado Trujillo y miembro de la Comisión de Ambiente de la ANIH-VE. Miembro Correspondiente estatal de la Academia de Mérida. Correo-e: caesji@ula.ve

² Ingeniero Químico y *Magíster Scientiae* en Planificación y Desarrollo de los Recursos Aguas y Tierras por la Universidad de Los Andes. *Magíster Scientiarum* en Gerencia Ambiental por la UNEFA. Profesor Agregado del CIDIAT - ULA. Miembro de la Comisión de Ambiente de la ANIH-VE. Correo-e: olivocyajaira@ula.ve

³ Ingeniero Agrónomo Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda y *Magíster Scientiae* en Gestión de los Recursos Naturales Renovables y Ambiente por la Universidad de Los Andes de Venezuela

⁴ Licenciado en Biología y *Magíster Scientiarum* en Ecología por la Universidad Central de Venezuela.

complejos solubles e insolubles, coloides o simplemente partículas dispersas de diferente tamaño y peso. Debido a que importantes y numerosas fuentes de agua con fines de consumo humano y otros usos beneficiosos son de origen superficial, y a la importancia que tiene el agua como solvente universal, la contaminación de los ecosistemas acuáticos y los recursos hídricos superficiales es un problema cada vez más grave, debido a que estos se usan como receptores finales de residuales domésticos e industriales, tanto en áreas urbanas como rurales, incluyendo áreas protegidas por legislación ambiental. Estas descargas son las principales responsables de la alteración de la calidad de las aguas naturales y sus ecosistemas, que en algunos casos llegan a estar tan contaminados que es muy difícil su depuración y recuperación. (Olivo, 2022), (Rheingemer, 1987), (Schnoor, 1996), (Tchobanoglous *et al.*, 1987), (Zuñiga, 1996), (Lester *et al.*, 1999) y (Bitton, 1994).

La calidad del agua es el término que describe las características químicas, físicas y biológicas del agua en función del uso. BAEZA (2016) afirma que, de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS) y otros organismos internacionales, el término calidad del agua “se puede resumir como las condiciones en que se encuentra el agua respecto a características físicas, químicas y biológicas, en su estado natural o después de ser alteradas por el accionar humano”.

En el capítulo II del Decreto 883 (1995), se define la calidad de un cuerpo de agua como la “caracterización física, química y biológica de aguas naturales para determinar su composición y utilidad al hombre y demás seres vivos” (Art. 2). Al respecto, ESPINOSA (2022), señala que “calidad del agua” en genérico, es el conjunto de características físicas, químicas y biológicas que le confieren una particularidad y una constitución peculiar al agua, y que, determina el uso que se le puede destinar. ESPINOSA (2025) y ARANGUREN (2025) en sus ponencias en el Primer Simposio Venezolano sobre Calidad del Agua manifiestan la necesidad de armonizar el concepto de “calidad del agua” como un compromiso entre la salud de los ecosistemas acuáticos y los usos del agua requeridos por el hombre. En otras palabras, lograr un compromiso entre los clásicos enfoques antropocéntrico y ecocéntrico, viendo al hombre como parte de los ecosistemas.

El agua es esencial para el desarrollo de todas las actividades humanas, sin embargo, en líneas generales, se habla de usos consuntivos o extractivos, y de usos no consuntivos o no extractivos del agua. En el primer caso, se refiere al hecho de sacar el recurso agua de su fuente, utilizarlo fuera de allí y en muchos casos no retornarlo a la misma fuente de la que procedió: uso doméstico y municipal, agricultura y ganadería, industrial y generación de energía (térmica, nuclear). Los usos no consuntivos hacen referencia a los usos no extractivos del agua, es decir, se relaciona con los procesos de conservación de los cuerpos de agua y su disfrute (recreación, navegación, conservación de la biota), por lo que usualmente la calidad del recurso no presenta mayores alteraciones. A nivel mundial el agua extraída es usada según: uso doméstico (12%), uso agrícola y agropecuario (70%) y uso industrial (18%). En

Venezuela, estas proporciones de uso se mantienen dentro de esos rangos. Como consecuencia de estos usos, el agua disminuye su espectro de calidad dado que incorpora materiales y elementos que afectan sus características físicas, químicas y biológicas, lo que puede disminuir su viabilidad de uso aguas abajo y así mismo afectar la salud de los ecosistemas acuáticos. De allí que se hace necesario definir, de manera específica, los rangos o límites máximos permisibles de estos materiales, sustancias y elementos nocivos que se incorporan al agua. ESPINOSA (2022).

FERNÁNDEZ, *et al.* (2005) señalan que un índice de calidad de agua

consiste básicamente en una expresión simple de una combinación más o menos compleja de un número de parámetros, los cuales sirven como una medida de la calidad del agua. El índice puede ser representado por un número, un rango, una descripción verbal, un símbolo o un color.

Su ventaja radica, en que la información puede ser más fácilmente interpretada que una lista de valores numéricos. Consecuentemente, un índice de calidad de agua es una herramienta comunicativa para transmitir información... [ya que los usuarios finales del índice] podrán rápidamente tener una idea clara de la situación que expresa el índice como contaminación excesiva, media o inexistente, entre otras, de fácil comprensión y abstracción. (p. 27)

Según Guillén, Teck, Kohlmann y Yeomans (2012) citados por CASTRO *et al.* (2014), el Índice de Calidad del Agua (ICA) indica el grado de contaminación del agua a la fecha del muestreo y está expresado como porcentaje del agua pura; así, agua altamente contaminada tendrá un valor cercano o igual a 0%, en tanto que el agua en excelentes condiciones tendrá un valor de este índice cercano al 100%.

El ICA es un indicador compuesto que integra información de varios parámetros de calidad del agua y presenta diferentes metodologías según su autor. Este índice es una herramienta matemática para la calidad y puede ser utilizado para transformar grandes cantidades de datos sobre la calidad del agua en una escala de medición única.

Venezuela es un país que cuenta con una legislación robusta en materia ambiental, y, los aspectos relacionados con calidad del agua se encuentran normados desde el año 1995. Aun cuando este conjunto de normas (Decreto 883, Resolución N° SG-018-98, Ley de Aguas y su Reglamento, entre otras), procura velar por la calidad del agua de los cuerpos hídricos, no se ha definido un ICA nacional o para alguna región del país.

Conforme a reflexiones del Primer Simposio Venezolano sobre Calidad del Agua, realizado los días 18 y 19 de octubre del 2024 de manera virtual, Venezuela no ha logrado desarrollar un índice de Calidad de Agua (ICA) adaptado a las condiciones propias de sus ecosistemas acuáticos (ESPINOSA, 2025). El ICA es una herramienta fundamental para la planificación, la conservación de los ecosistemas

acuáticos y el aprovechamiento de los recursos hídricos de una nación.

La Amazonia venezolana comprende los estados Amazonas, Bolívar y Delta Amacuro. Es un vasto territorio que está protegido bajo diversas categorías de Áreas Naturales Protegidas. En la Amazonía venezolana se localizan importantes y únicos ecosistemas y además allí se encuentran las mayores reservas de agua, de metales preciosos y minerales estratégicos. Esta realidad ha generado conflictos de intereses que pugnan entre la conservación de los ecosistemas y la explotación de recursos minerales, forestales y de la flora y la fauna. En esta región viven 21 pueblos indígenas que han ocupado este territorio desde tiempos ancestrales y se localizan las estructuras geológicas más antiguas del continente americano.

El marco general de contextualización de esta investigación son las actividades que realiza la Red Amazónica de Información Socio Ambiental Georreferenciada (RAISG) en Venezuela, Brasil, Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia. En Venezuela en particular, son las actividades de PROVITA AC en el marco de la articulación con la RAISG. La conceptualización se enmarcó en la Amazonía venezolana, buscando el necesario equilibrio entre los enfoques ecocéntrico y antropocéntrico, lo cual permite una visión ecosistémica. Lo anterior significa lograr una conceptualización armonizada de la calidad del agua que requieren los ecosistemas acuáticos y los usos potenciales del agua.

El objetivo de esta investigación es desarrollar un Índice de Calidad de Agua para la Amazonía venezolana, buscando armonizar la calidad del agua que requieren los ecosistemas acuáticos y los usos potenciales del agua. Esta herramienta sin dudas será un gran apoyo en la gestión del recurso hídrico en la Amazonía venezolana, la gran reserva hídrica de Venezuela.

Metodología para la formulación del ICA de la Amazonía venezolana

Para el caso que ocupa la presente investigación, se desarrolló un ICA paramétrico basado en un promedio ponderado entre

los pesos de cada parámetro considerado y los valores de las funciones de transformación establecidas para cada uno de ellos. Para lo cual, se desarrollaron las siguientes etapas:

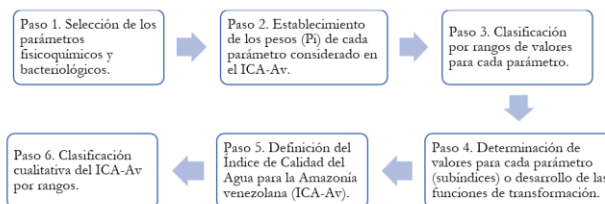


Figura 1. Metodología de formulación del ICA para la Amazonía venezolana.

Fuente: Elaboración propia.

La implementación del paso 2 (Establecimiento de los pesos (Pi) de cada parámetro considerado), del paso 3 (Clasificación por rangos de valores para cada parámetro), del paso 4 (Desarrollo de las funciones de transformación) y del paso 6 (Clasificación cualitativa del ICA-Av por rangos) de la metodología, se basó primero en la realización de investigación documental, seguido de consultas con inteligencia artificial y posteriormente con la validación mediante juicio de quince (15) expertos, a través de consenso.

Paso 1. Selección de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos.

La selección de los 15 parámetros del ICA-Av respondió a un análisis técnico exhaustivo que incluyó criterios de la Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada (RAISG). La inclusión de indicadores como el pH, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno y coliformes fecales obedece a su capacidad para reflejar tanto el equilibrio natural como el impacto de actividades antrópicas y de asentamientos humanos en la región.

La Tabla 1 presenta los parámetros que contempla el ICA-Av, así como su justificación.

Tabla 1. Parámetros de calidad de agua y su justificación, contemplados por el ICA.

Nº	Parámetro	Justificación
Fisicoquímicos		
1	pH	Mide el grado de acidez o de alcalinidad del agua. Gran cantidad de fenómenos físicos, químicos, biológicos y bioquímicos en los ecosistemas son influenciados por el pH.
2	Conductividad Eléctrica (CE)	Indicador de los iones disueltos en el agua. Se asocia a la salinidad de las aguas, y a la agricultura como actividad antrópica.
3	Oxígeno Disuelto (OD)	El contenido de oxígeno disuelto es vital para la ictiofauna y los demás seres vivos aerobios estrictos en un ecosistema acuático. Es además un indicador indirecto del contenido de materia orgánica en el agua.
4	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	Indicadores básicos de materia orgánica biodegradable (DBO), químicamente oxidable (DQO) y materia en suspensión (SST).
5	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	

6	Sólidos Suspendidos Totales (SST)	
7	Aceites y Grasas (minerales)	Los aceites y grasas minerales son indicadores de actividad antrópica (motores de combustión interna, uso de combustibles y lubricantes, entre otros), así como de la actividad petrolera (maquinaria y por derrames).
8	Aceites y Grasas (orgánicos)	Los aceites y grasas orgánicos son biodegradables y se originan de actividades como la elaboración de alimentos para consumo humano y beneficio de animales para consumo. Aceites y grasas flotando en la superficie del agua afectan el contenido de OD en la columna de agua. Algunos aceites y grasas contienen tóxicos que pueden afectar la salud de los ecosistemas.
9	Turbidez	Influye en la penetración de la luz en los cuerpos de agua y, por lo tanto, puede afectar o favorecer a los productores primarios, lo cual incide en la salud del ecosistema.
10	Diferencia esperada entre la temperatura máxima y mínima del agua (ΔT).	La temperatura influye en la cinética microbiana y en el contenido de oxígeno disuelto (OD) en los ecosistemas. Este parámetro representa la amplitud de la variación entre la máxima y mínima temperatura del agua esperada en el ecosistema.
Químicos inorgánicos		
11	Nitritos (NO_2) y Nitratos (NO_3) (*)	Indicadores de actividad antrópica, en este caso agricultura, minería y vertidos industriales. Son nutrientes básicos precursores de la eutrofización de cuerpos
12	Sulfatos (SO_4)	lénticos de agua, toxicidad en plantas, y afectan la osmorregulación de invertebrados
13	Fósforo Total (P-Total)	y peces de agua dulce.
Microbiológicos		
14	Coliformes Totales	Indicador biológico de contaminación. Es la prueba presuntiva de contaminación por desechos fisiológicos humanos y de animales superiores de sangre caliente.
15	Coliformes Fecales	Indicador biológico de contaminación. Es la prueba confirmativa de contaminación por desechos fisiológicos humanos y de animales superiores de sangre caliente.

Fuente: Elaboración propia.

(*) Se considera en el ICA propuesto la suma de los Nitritos (NO_2) más los Nitratos (NO_3), no por separado. Por esta razón el número de parámetros se reduce a 15 parámetros (NO_2+NO_3).

Paso 2. Establecimiento de los pesos (P_i) de cada parámetro considerado en el ICA-Av.

Contemplando los parámetros considerados en la formulación del ICA-Av, mediante investigación documental, consultas con inteligencia artificial y su posterior validación mediante juicio de expertos, se establecieron los pesos (P_i) de cada parámetro, los cuales se presentan en la Tabla 2, en una escala creciente de 1 a 10 en orden de importancia e influencia en la calidad del agua.

En términos operativos, el índice funciona a través de dos componentes principales: los pesos de ponderación (P_i) y las funciones de transformación (Q_i). A cada parámetro se le otorgó un peso en una escala del 1 al 10, donde los valores más altos denotan una mayor incidencia en la calidad sanitaria y ecológica.

El proceso de validación incluyó el juicio de expertos para asegurar que los pesos asignados correspondieran a la realidad ambiental de la Amazonía venezolana.

Tabla 2. Peso (P_i) de cada parámetro contemplado en la formulación del ICA-Av.

Parámetro	Peso	Parámetro	Peso	Parámetro	Peso
pH	9	SST	7	NO_2+NO_3	7
CE	5	Aceites y grasas minerales	6	SO_4	4
OD	10	Aceites y grasas orgánicas	5	P total	7
DBO	9	Turbidez	8	Coliformes Totales	3
DQO	8	Incremento de Temperatura del agua (ΔT)	2	Coliformes Fecales	10

Fuente: Elaboración propia.

Paso 3. Clasificación por rangos de valores para cada parámetro.

Basado en investigación documental, consultas con inteligencia artificial y su posterior validación mediante juicio

de expertos, se establecieron los rangos de valores de cada parámetro correspondientes a su clasificación cualitativa, los cuales se presentan en la Tabla 3. Esta información permitió el desarrollo de las funciones de transformación.

PROPUESTA DE UN ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA PARA
LA AMAZONÍA VENEZOLANA

Tabla 3. Rangos de valores de cada parámetro correspondientes a su clasificación cualitativa

Nº	Parámetro	Unidades	Buena	Regular	Deficiente	Mala
1	pH		6,5 a 7,5	6,0 a 6,4 7,6 a 8,0	5,5 a 5,9 8,1 a 8,5	<5,5 >8,5
2	CE	µS/cm	10 a 100	101 a 300	301 a 700	>700
3	Oxígeno Disuelto	% saturación	85 a 100	70 a 84	50 a 69	0 a 49
4	DBO	mg/l	<2	2 a 4	4,1 a 8	>8
5	DQO	mg/l	<5	5 a 15	15,1 a 30	>30
6	SST	mg/l	<25	25 a 50	51 a 100	>100
7	A y G minerales	mg/l	<0,1	0,1 a 0,49	0,5 a 1,0	>1,0
8	A y G orgánicas	mg/l	<1	1 a 4	4,1 a 8	>8
9	Turbidez	UNT	<5	5 a 15	15,1 a 50	>50
10	Incremento de Temperatura ΔT	°C	±2	±3 a 5	±6 a 8	>±8
11	NO ₂ +NO ₃	mg/l	<0,2	0,2 a 1,0	1,1 a 5,0	>5
12	SO ₄	mg/l	<25	25 a 50	51 a 100	>100
13	P Total	mg/l	<0,02	0,02 a 0,10	0,11 a 0,5	>0,5
14	Coliformes Totales	NMP/100ml	<10	10 a 100	101 a 1000	>1000
15	Coliformes Fecales	NMP/100ml	0	1 a 10	11 a 100	>100

Fuente: Elaboración propia.

Paso 4. Determinación de valores para cada parámetro (subíndices) o desarrollo de las funciones de transformación

Para la determinación de los valores para cada parámetro o subíndice, se procedió a emplear el método de conversión del parámetro en un número adimensional por medio de diagramas de calibración o funciones de transformación. En estas funciones de transformación se indica la correlación entre el parámetro y su valor en la escala de calidad seleccionada (0 – 100), donde 0 es el peor escenario de calidad del agua y 100 representa un valor óptimo o excelente de calidad para el parámetro analizado.

Por su parte, las funciones de transformación permitieron normalizar los datos de calidad del agua en una escala común

de 0 a 100, eliminando la disparidad de magnitudes entre variables químicas y biológicas.

Con base en la Tabla 3, mediante investigación documental, consultas con inteligencia artificial y su posterior validación mediante juicio de expertos, se formuló para cada parámetro del ICA-Av una función de transformación, la cual permite normalizar la magnitud de cada parámetro expresado en sus respectivas unidades, en una escala adimensional de cero (0) a cien (100). El Apéndice 1 contiene las funciones de transformación generadas para cada uno de los parámetros del ICA-Av. La Tabla 4 presenta las ecuaciones de las funciones de transformación (Q_i) para cada parámetro considerado. En el Apéndice 1 se presentan las Funciones de Transformación de cada uno de los parámetros considerados para la formulación del ICA-Av.

Tabla 4. Ecuaciones de las funciones de transformación (Q_i) para cada parámetro considerado en el ICA propuesto.

Nº	Parámetro	Unidades	Función de transformación	R ²
1	pH		En la gráfica correspondiente	n/a
2	CE	µS/cm	Q ₂ =96,516 e ^{-0,001x}	0,9839
3	Oxígeno Disuelto	mg/l	Q ₃ =% saturación	n/a
4	DBO	mg/l	Q ₄ =100,23 e ^{-0,087x}	0,9992
5	DQO	mg/l	Q ₅ =97,81 e ^{-0,022x}	0,9923
6	SST	mg/l	Q ₆ =100,23 e ^{-0,007x}	0,9992
7	A y G minerales	mg/l	Q ₇ =95,771 e ^{-0,65x}	0,9700
8	A y G orgánicas	mg/l	Q ₈ =96,543 e ^{-0,082x}	0,9875
9	Turbidez	UNT	Q ₉ =92,485 e ^{-0,013x}	0,9451
10	Incremento de Temperatura ΔT	°C	Q ₁₀ =99,176-0,0954 x ² -5,4317x	0,9934
11	NO ₂ +NO ₃	mg/l	Q ₁₁ =88,986 e ^{-0,12x}	0,8911
12	SO ₄	mg/l	Q ₁₂ =100,23 e ^{-0,007x}	0,9992
13	P Total	mg/l	Q ₁₃ =88,986 e ^{-1,203x}	0,8911
14	Coliformes Totales	NMP/100ml	Q ₁₄ =86,299 e ^{-0,0006x}	0,8293
15	Coliformes Fecales	NMP/100ml	Q ₁₅ =86,299 e ^{-0,006x}	0,8293

Fuente: Elaboración propia.

Paso 5. Definición del Índice de Calidad del Agua para la Amazonía venezolana (ICA-Av)

La arquitectura del Índice de Calidad de Agua para la Amazonía venezolana (ICA-Av) se estructuró mediante un modelo paramétrico de promedio ponderado. Esta metodología permite la integración de variables con distintas unidades de medida en un valor adimensional único, facilitando una evaluación integral del estado del recurso hídrico.

Lo anterior indica que la ecuación básica del ICA es:

$$ICA = \frac{\sum_1^n (Q_i * P_i)}{\sum_1^n P_i}$$

Donde:

Q_i: es el valor de la función de transformación del parámetro i.

P_i: es el valor de ponderación del parámetro i.

n: es el número de parámetros considerados.

A diferencia de otros índices genéricos, el ICA-Av considera avalado mediante juicio de expertos, las particularidades hidrológicas y ecológicas de los ecosistemas amazónicos venezolanos.

Paso 6. Clasificación cualitativa del ICA-Av por rangos

Con base en los parámetros considerados, mediante investigación documental, consultas con inteligencia artificial y su posterior validación mediante juicio de expertos, se estableció la clasificación cualitativa del ICA-Av por intervalos o rangos, la cual se muestra en la Tabla 5.

La interpretación de los resultados se organiza en cuatro rangos cualitativos: Buena (85-100), Regular (70-84), Deficiente (50-69) y Mala (0-49). Este sistema de categorización no solo simplifica la comunicación técnica, sino que, tal como sostiene ESPINOSA (2025), se constituye en un mecanismo esencial de alerta temprana para la protección de la biodiversidad en un territorio con una alta vulnerabilidad ambiental como la Amazonía venezolana.

Tabla 5. Clasificación cualitativa del ICA-Av por intervalos o rangos.

Clasificación cualitativa del ICA	Intervalo o rango
Buena	85 a 100
Regular	70 a 84
Deficiente	50 a 69
Mala	0 a 49

Fuente: Elaboración propia con base al resultado del juicio de expertos.

Resultados y discusión

Como se puede observar en la Tabla 1 la justificación de los parámetros contemplados por sí misma establece un compromiso entre la calidad del agua que requieren los ecosistemas y los usos antrópicos potenciales del recurso.

En la Tabla 2 se muestra que los mayores pesos corresponden al oxígeno disuelto (OD) y a los coliformes fecales. El primero es vital para los ecosistemas acuáticos y el segundo constituye la prueba confirmativa de contaminación por desechos fisiológicos que restringe el uso del agua en abastecimiento humano y en agricultura.

En segundo lugar con 9 el pH y la DBO; el pH se relaciona con muchos procesos bioquímicos y fisicoquímicos de los ecosistemas acuáticos y la DBO que ejerce una demanda de oxígeno en el ecosistema y afecta el OD.

La DQO y la turbidez con peso 8. La DQO representa materia orgánica oxidable químicamente. La turbidez influye en la penetración de la luz solar en los ecosistemas acuáticos, afectando a los productores primarios y el balance de oxígeno disuelto.

Los SST y los nutrientes básicos con peso 7. Los SST representan sólidos suspendidos en la columna de agua que influyen en la turbidez. Los nutrientes básicos (N y P) representados por los NO₂, NO₃ y los Ptotales son indicadores de contaminación agrícola y urbana y potencian la eutrofización de ecosistemas acuáticos lénticos.

Aceites y grasas minerales con 6 y los aceites y grasas orgánicos con 5. Los aceites y grasas minerales para fines prácticos no son biodegradables, afectando la calidad de los ecosistemas y restringiendo el uso de sus aguas. Los aceites y grasas orgánicos son biodegradables pero de igual manera afectan los ecosistemas y restringen los usos del agua.

La conductividad eléctrica (CE) con 5 se asocia con el contenido de iones en el agua, que a su vez reflejan contaminación por actividad agrícola y representa la salinidad total.

Finalmente los sulfatos con peso 4 (indicadores de vertidos de drenajes ácidos de minas, uso de fertilizantes y vertidos industriales), los coliformes totales con peso 3 y la variación de la temperatura del agua con peso 2 que considera poco efecto en este parámetro por su localización geográfica de la Amazonía venezolana.

La Tabla 3 presenta los rangos de valores de cada parámetro correspondientes a la clasificación cualitativa establecida (Buena, Regular, Deficiente y Mala calidad). Como ejemplo ilustrativo se explica el parámetro pH que considera buena calidad del agua valores cercanos al neutro (pH=7) en este caso entre 6,5 y 7,5. En la medida que el pH se ubica hacia las zonas ácida y alcalina se va clasificando como regular, deficiente y mala calidad. Procedimiento similar se aplica para los demás parámetros considerando sus particularidades.

Con base en la Tabla 3 se presenta la Tabla 4 Ecuaciones de las funciones de transformación (Q_i) para cada parámetro considerado en el ICA propuesto. En la misma se aprecia la buena correlación lograda (R²) en las funciones de transformación generadas.

La determinación de los pesos de ponderación (P_i) para los 15 parámetros que integran el ICA-Av revela una jerarquización orientada a la protección de procesos biológicos críticos y la salud humana en entornos de selva tropical. Como se detalla en la Tabla 2, el modelo otorga una carga relativa superior al Oxígeno Disuelto y a los Coliformes Fecales. Esta decisión técnica se fundamenta en que, en ríos de baja conductividad y alta carga de materia orgánica natural como los amazónicos, estas variables actúan como indicadores sensibles de desequilibrio. Asimismo, la inclusión de hidrocarburos (aceites y grasas) responde a la necesidad de cuantificar impactos derivados de la minería y el tráfico de barcas, factores que los índices genéricos suelen subestimar.

Los quince (15) parámetros seleccionados indican que la configuración paramétrica del índice no representa únicamente un ejercicio estadístico, sino una herramienta de gestión diseñada para subsanar las carencias en el monitoreo ambiental. La metodología adoptada permite que el sistema de alerta sea preventivo; al ajustar las funciones de transformación para que penalicen con mayor rigor el incremento de temperatura o la caída de oxígeno, se protege la biodiversidad acuática que es extremadamente sensible a cambios térmicos por deforestación de riberas. Este enfoque guarda coherencia con las observaciones de ESPINOSA (2025), quien destaca que la gestión de aguas en zonas prístinas requiere herramientas de alta sensibilidad a fin de evitar daños irreversibles. Estas herramientas se reflejan técnicamente en dos componentes fundamentales del ICA-Av: los Pesos de Ponderación (P_i) y las Funciones de Transformación (Q_i).

En conclusión, la escala cualitativa diseñada presentada en la Tabla 5 —desde Buena hasta Mala— traduce la complejidad fisicoquímica a un formato comprensible para la toma de decisiones institucionales. El ICA-Av no intenta ser un índice universal, sino una herramienta técnica adaptada para las condiciones hidroquímicas particulares de la Amazonía venezolana, garantizando que el monitoreo sea un reflejo fiel de la integridad ecológica de estos cuerpos de agua.

Del análisis de los resultados y su discusión se evidencia que la metodología del ICA propuesta busca un equilibrio entre la salud de los ecosistemas (enfoque ecocéntrico) y los usos beneficiosos del agua (enfoque antropocéntrico). Históricamente parte de la información existente sobre calidad del agua en Venezuela se orienta a muestrear parámetros de calidad de agua requeridos para la operación de plantas potabilizadoras (enfoque antropocéntrico).

Conclusiones y recomendaciones

La consolidación de esta primera versión del Índice de Calidad de Agua para la Amazonía venezolana (ICA-Av) representa un avance significativo en la estandarización del monitoreo ambiental regional. Al integrar 15 parámetros fisicoquímicos y microbiológicos propuestos por la Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada (RAISG), el índice logra un consenso técnico que facilita la comparabilidad de datos a escala transfronteriza, permitiendo

una lectura uniforme de las presiones ambientales sobre los ecosistemas acuáticos del sur de Venezuela.

Se recomienda investigar en los ríos de la Amazonía venezolana el efecto de "enmascaramiento por dilución" de los contaminantes vertidos debido a los extraordinarios caudales de la cuenca amazónica. Las descargas contaminantes suelen ser subestimadas, ya que la masa de agua reduce las concentraciones a niveles difíciles de detectar en puntos alejados de la fuente. Esta situación, sumada a la dificultad logística para realizar muestreos en las inmediaciones de las descargas, justifica la adopción de una metodología de promedio ponderado. Esta estructura permite que, en el futuro, la inclusión de nuevos parámetros representativos de actividades antrópicas —como metales pesados o trazas de hidrocarburos— penalice drásticamente el índice, clasificando el agua como "Mala" incluso si el resto de los parámetros se mantienen estables.

El ICA-Av posee una naturaleza evolutiva. La ejecución de sucesivas campañas de muestreo no solo proveerá de datos para validar el modelo, sino que permitirá el ajuste de los rangos normalizados de cada parámetro. Este proceso de retroalimentación es indispensable para incrementar la precisión del instrumento y asegurar que las funciones de transformación respondan fielmente a la dinámica hidroquímica de los ríos de aguas blancas, negras y mixtas presentes en la región.

Se recomienda la necesidad de realizar estudios geoquímicos que permitan establecer la "línea base" de las cuencas amazónicas. Sin una caracterización de las concentraciones naturales de referencia, resulta complejo distinguir entre la presencia geogénica de ciertos elementos y el aporte derivado de actividades antrópicas. Conocer el estado prístino de estas aguas es el primer paso para una gestión ambiental responsable y científicamente sustentada.

Finalmente, se exhorta a la comunidad académica y a los organismos de gestión a implementar el ICA-Av de manera paralela con otros índices de calidad de agua convencionales una vez publicado este trabajo. La comparación sistemática de resultados bajo una misma base de datos permitirá corroborar la mayor sensibilidad del modelo propuesto y consolidar su uso como un estándar técnico para salvaguardar la Amazonía venezolana.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada (RAISG) y a PROVITA AC, por el apoyo brindado en esta investigación.

Referencias Bibliográficas consultadas

ARANGUREN A. 2025. *La calidad del agua bajo el enfoque ecocéntrico*. Memorias del Primer Simposio Venezolano sobre Calidad del Agua. Boletín de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat, N° 67: 265-280. Caracas, Venezuela.

Disponible en:

<https://acading.org.ve/wp-content/uploads/2025/07/Memorias-del-Primer-Simposio-Venezolano-sobre-Calidad-del-Agua.pdf>

BAEZA GÓMEZ E. 2016. *Calidad del agua*. Departamento de Estudios, Extensión y Publicaciones. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, BCN.

Disponible

en:

<https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/23747/2/Calidad%20del%20Agua%20Final.pdf>

BITTON G. 1994. *Wastewater microbiology*. Wiley-Liss. NY, USA.

CASTRO M., ALMEIDA J., FERRER J. y DÍAZ D. 2014. *Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencias a nivel global*. Ingeniería Solidaria, vol. 10, n.º 17: 111-124.

ESPINOSA C. 2022. *Protección del recurso hídrico*. Apuntes de clase. Maestría en Gestión de Recursos Naturales Renovables, CIDIAT – ULA.

ESPINOSA C. 2025. *Índice de calidad del agua*. Memorias del Primer Simposio Venezolano sobre Calidad del Agua. Boletín de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat, N° 67: 265-280. Caracas, Venezuela.

Disponible en:

<https://acading.org.ve/wp-content/uploads/2025/07/Memorias-del-Primer-Simposio-Venezolano-sobre-Calidad-del-Agua.pdf>

FERNÁNDEZ, N., et al. 2005. *Los índices de calidad de agua (ICA) como herramientas de gestión*. Revista Ciencia e Ingeniería, 26(2), 43-49.

LESTER J. N. y BIRKETT. 1999. *Microbiology and Chemistry for Environmental Scientists and Engineers*. 2nd Edition. E & FN SPON. Taylor and Francis Group. NY, USA.

OLIVO Y. 2022. *Protección del recurso hídrico*. Apuntes de clase. Maestría en Gestión de Recursos Naturales Renovables, CIDIAT – ULA.

REPÚBLICA DE VENEZUELA. 1995. *Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos*. Gaceta Oficial Extraordinaria 5.021. Decreto N° 883. Caracas.

REPÚBLICA DE VENEZUELA. 1998. *Normas sanitarias para la calidad del agua potable*. Resolución N° SG-018-98. Gaceta Oficial N° 36.395. Caracas.

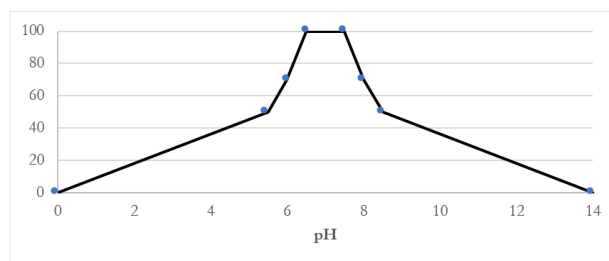
RHEINHEIMER G. 1987. *Microbiología de las aguas*. Editorial ACRIBIA, S.A. Zaragoza, España.

SCHNOOR J. 1996. *Environmental Modeling: fate and transport of pollutants in water, air and soil*. John Wiley & Sons, INC. NY, USA.

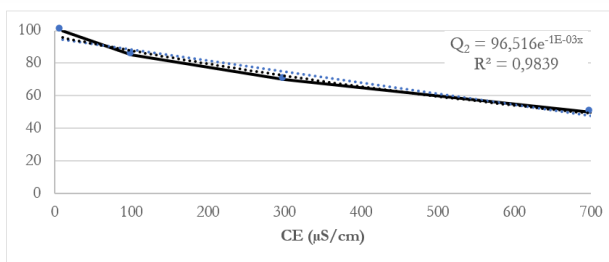
TCHOBANOGLIOUS G. y SCHROEDER E. 1987. *Water Quality: Characteristics, modeling and modification*. Addison Wesley Publishing Company, Inc. USA.

ZÚÑIGA M. 1996. *Contaminación de corrientes acuáticas*. Departamento de Procesos Químicos y Biológicos. Universidad del Valle, Cali, Colombia.

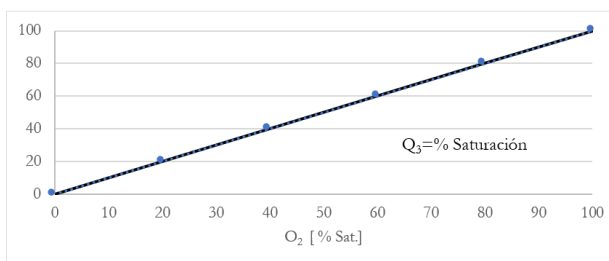
APÉNDICE 1



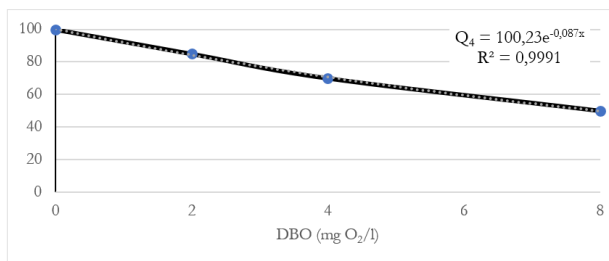
1. Función de transformación: pH



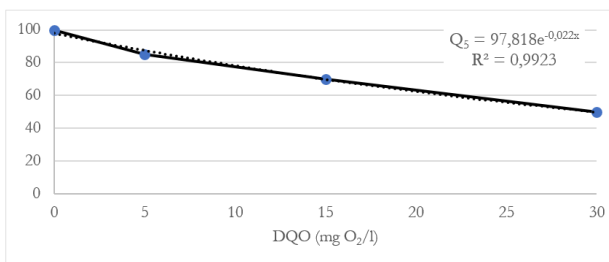
2. Función de transformación: Conductividad Eléctrica



3. Función de transformación: Oxígeno Disuelto



4. Función de transformación: Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO



5. Función de transformación: Demanda Química de Oxígeno, DQO

PROPUESTA DE UN ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA PARA
LA AMAZONÍA VENEZOLANA

