

Artículo Original

Comparación de índices de calidad de agua para consumo humano en pozos profundos del municipio miranda (Zulia, Venezuela)

Comparison of water quality indices for human consumption in deep wells in the Miranda municipality (Zulia, Venezuela)

<https://doi.org/10.52808/bmsa.8e7.631.022>

Julio Marín ^{1,*}

<https://orcid.org/0000-0003-2770-5978>

Andrés Olivar ²

<https://orcid.org/0009-0009-6881-0230>

Víctor Sarcos ³

<https://orcid.org/0009-0000-5947-5295>

Janet Gutiérrez ⁴

<https://orcid.org/0009-0004-7460-6926>

Recibido: 14/11/2022
Aceptado: 15/02/2023

RESUMEN

El agua subterránea puede ser una fuente inagotable para las diversas actividades humanas; pero también, muy vulnerable a la contaminación química y microbiológica, por lo que debe monitorearse constantemente para conocer su calidad con relación a los diferentes usos que se hacen de los acuíferos. A su vez, los índices de calidad de agua (ICA) permiten transmitir información sobre la calidad del recurso hídrico, tanto a las autoridades competentes como al público en general, de una manera simple y concisa. En la presente investigación se compararon tres ICA diferentes (ICA-Aritmético ponderado, ICA-CCME e ICA-Bhargava) en 32 pozos profundos de una zona rural del municipio Miranda (Zulia, Venezuela), tomando en cuenta los parámetros: pH, turbidez, color, sólidos disueltos totales, cloruro, sulfato, sodio, dureza total, nitrato+nitrito, hierro total, manganeso total, bacterias coliformes totales y fecales. Los resultados destacan que, respecto al ICA-CCME, el 22% de los pozos posee una calidad "justa", mientras que para el ICA-Bhargava el 100% resultó "media", debido a la presencia de bacterias coliformes. Además, para el ICA-Aritmético ponderado, el 25% exhibió una clasificación "pobre". De manera general, el ICA-Aritmético ponderado e ICA-CCME develaron que el 75% y aproximadamente el 16% de los pozos respectivamente, poseen condiciones adecuadas para el consumo humano, mientras que para el ICA-Bhargava, ninguno es apto para dicho fin. Esta discrepancia entre los resultados de los distintos ICA, es debida a la cantidad y tipo de parámetros considerados. No obstante, ninguno de los pozos cumplió a cabalidad con los límites permisibles establecidos por la Organización Mundial de la Salud para el consumo humano, siendo inadecuados para este uso, por ende, el ICA que mejor se ajustó a la calidad de agua de la zona de estudio fue el ICA-Bhargava, ya que se corresponde con los resultados mostrados por las normas referidas.

Palabras clave: acuífero, agua subterránea, características fisicoquímicas, contaminación bacteriana, normas de calidad de agua.

ABSTRACT

Groundwater can be an inexhaustible source for various human activities; but also, very vulnerable to chemical and microbiological contamination, so it must be constantly monitored to know its quality in relation to the different uses made of the aquifers. In turn, the water quality indices (WQI) allow the transmission of information on the quality of the water resource, both to the competent authorities and to the general public, in a simple and concise manner. In the present investigation, three different ICA (weighted Arithmetic ICA, ICA-CCME and ICA-Bhargava) were compared in 32 deep wells in a rural area of the Miranda municipality (Zulia, Venezuela), taking into account the parameters: pH, turbidity, color, total dissolved solids, chloride, sulfate, sodium, total hardness, nitrate+nitrite, total iron, total manganese, total and fecal coliform bacteria. The results highlight that, with respect to the ICA-CCME, 22% of the wells have a "fair" quality, while for the ICA-Bhargava 100% were "average", due to the presence of coliform bacteria. In addition, for the weighted ICA-Arithmetic, 25.0% exhibited a "poor" classification. In general, the weighted ICA-Arithmetic and ICA-CCME revealed that 75% and approximately 16% of the wells, respectively, have adequate conditions for human consumption, while for the ICA-Bhargava, none is suitable for said purpose. This discrepancy between the results of the different ICAs is due to the number and type of parameters considered. However, none of the wells fully accomplished with the permissible limits established by the World Health Organization for human consumption, being unsuitable for this use, therefore, the ICA that best adjusted to the water quality of the area of study was the ICA-Bhargava, since it corresponds to the results shown by the referred norms.

Keywords: aquifer, groundwater, physicochemical characteristics, bacterial contamination, water quality standards.

¹ Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (DISA), Maracaibo, República Bolivariana de Venezuela

² Escuela de Ingeniería Civil, Maracaibo, República Bolivariana de Venezuela

³ Facultad de Ingeniería, Maracaibo, República Bolivariana de Venezuela

⁴ Universidad del Zulia, Maracaibo, República Bolivariana de Venezuela

*Autor para la correspondencia: julio.marin2789@gmail.com

Introducción

El agua subterránea es el recurso natural más importante utilizado para consumo humano por muchas personas en el mundo, especialmente en áreas áridas y semiáridas. No obstante, este recurso no puede utilizarse y mantenerse en



condiciones óptimas a menos que se analice regularmente la calidad del suministro (Sadat-Noori *et al.*, 2014). En este sentido, los cambios temporales en el origen y la constitución del agua recargada, los factores hidrológicos y humanos, pueden causar cambios periódicos en la calidad del agua subterránea (Vasanthavigar *et al.*, 2010). Así, esta agua es una fuente inagotable pero muy vulnerable a la contaminación por bacterias o virus, por lo que debe supervisarse en todo momento para evitar la proliferación de enfermedades hídricas y de otra índole, de acuerdo con los lineamientos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Torres *et al.*, 2009; OMS, 2018). Ellas abastecen aproximadamente una tercera parte de la población mundial, por ende, se han hecho los máximos esfuerzos para cuantificar su calidad, ya que en algunos sitios no resulta apta para ciertos usos (López & Palací, 2014). Entre los factores que influyen en la contaminación de las aguas subterráneas, se encuentran: la geología del acuífero, el clima y las actividades antropogénicas de la zona (Edokpayi *et al.*, 2018).

La contaminación del agua no solo afecta su calidad, sino que también amenaza la salud humana, el desarrollo económico y la prosperidad social (Milovanovic, 2007). Por ello, la calidad de las aguas subterráneas ha recibido una atención particular, ya que se requiere agua de alta calidad para las necesidades domésticas y de riego (Sadat-Noori *et al.*, 2014). En tal sentido, para conocer la calidad de las aguas subterráneas, se han aplicado diversos enfoques: i) análisis fisicoquímicos y biológicos (Sadat-Noori *et al.*, 2014; Yaseen Al-Araji, 2019), ii) sistemas de información geográfica (Sadat-Noori *et al.*, 2014; Singha *et al.*, 2015), iii) índices de calidad de agua (ICA) (Sánchez *et al.*, 2016; Khatri *et al.*, 2020), entre otros. Los ICA son expresiones matemáticas que consideran aspectos físicos, químicos, biológicos y otros (Sierra Ramírez, 2011), y que se han convertido en un instrumento fundamental para transmitir información sobre la calidad del recurso hídrico de una manera práctica y concisa, tanto a las autoridades competentes como al público en general (Caho & López, 2017). La aplicación de los ICA está ampliamente difundida en la literatura para diversos cuerpos de agua (Mahagamage & Manage, 2014; Salcedo *et al.*, 2015; Sánchez *et al.*, 2016; Mustafa *et al.*, 2017; Al-Musawi, 2018; Khatri *et al.*, 2020), convirtiéndose en un análisis versátil, de cálculo sencillo y fácil entendimiento.

Entre los ICA usados frecuentemente para calificar la calidad general del agua, se encuentran: i) ICA-Aritmético ponderado (Sánchez *et al.*, 2016; Khatri *et al.*, 2020), ii) ICA-CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment) (Mahagamage & Manage, 2014; Salcedo *et al.*, 2015; Khatri *et al.*, 2020) e iii) ICA-Bhargava (Mustafa *et al.*, 2017; Al-Musawi, 2018); los cuales han servido para analizar el agua tanto para uso general como para consumo humano (Hop *et al.*, 2008). De esta manera, la presente investigación tuvo como objetivo comparar tres ICA diferentes, en función del tipo y número de parámetros considerados, en pozos profundos de una zona rural del municipio Miranda (Zulia, Venezuela), determinando su adecuación con respecto a los límites permisibles establecidos por la OMS para agua destinada a consumo humano (OMS, 2018) e informar su calidad de una manera simple y precisa, considerando que en la mayoría de los casos las dependencias gubernamentales competentes no realizan los monitoreos oportunos, ni informan a la población local sobre las amenazas relacionadas con la ingesta de agua no apta para este fin.

Materiales y métodos

Área de estudio

El presente estudio se desarrolló en una zona rural del municipio Miranda, ubicado en el extremo nororiental del estado Zulia, Venezuela; limitando al norte con el Golfo de Venezuela, al sur con los municipios Santa Rita y Cabimas, al este con el estado Falcón y al oeste con el Lago de Maracaibo (Figura 1). Sus características agroecológicas corresponden a las de un bosque seco tropical, con precipitaciones entre 800 y 1.000 mm³/año, distribuidas en dos temporadas y con temperaturas medias de 30 °C. La topografía es básicamente plana, con algunas lomas y suelos arenoso-arcillosos en su mayoría (Villaruel *et al.*, 2010). Dentro de este municipio existen conglomerados geológicos como la formación El Milagro, consistente de arenas friables, finas a gruesas, muy micáceas, de color crema a pardo-rojizo, limos micáceos de color gris claro interestratificados con arcillas arenosas, rojas y pardo-amarillentas, así como lentes lateríticos bien cementados (PDVSA, 1997; Ponce *et al.*, 2016).

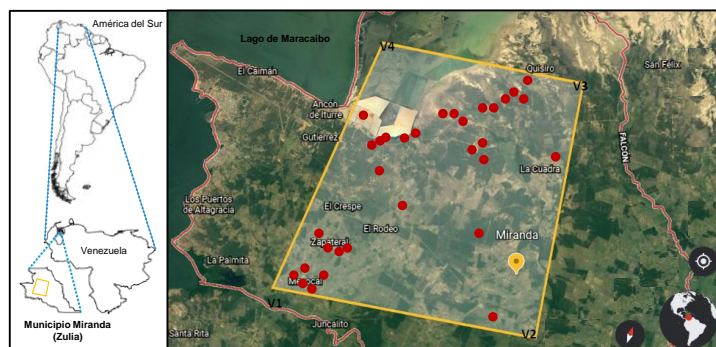


Figura 1. Área de estudio. Ubicación relativa de los pozos profundos (puntos rojos) en el municipio Miranda (Zulia, Venezuela). V1, V2, V3 y V4 corresponden a los vértices que limitan el área de muestreo (línea amarilla) (modificado de Google Earth)

El municipio tiene una superficie de 2.255 km², con una población estimada para el año 2011 cercana a los 125.000 habitantes. Es un municipio con bajo desempeño económico, cuyas actividades principales se encuentran en las áreas de pesca, ganadería y agricultura. Presenta una red hidrográfica pobre, ya que la mayoría de sus cursos de agua son intermitentes. Los principales ríos son aquellos que sirven como límite geográfico natural; estos son: río Cocuiza (límite entre el municipio Miranda y el estado Falcón) y río Ararure (límite entre los municipios Santa Rita y Miranda). Otra corriente hidrográfica es la quebrada El Chito, la cual se intercepta con el río Cocuiza para servir como límite entre el municipio Miranda y el estado Falcón. Otros factores hidrográficos de importancia son las lagunas de la zona norte y la ciénaga de Los Olivitos, la cual brinda un aporte turístico y económico a la región (Padrón, 2013).

Estrategia de muestreo

El área específica de muestreo estuvo comprendida geográficamente entre los vértices representados en la Figura 1, cuyas coordenadas son las siguientes: vértice 1 (V1) latitud 10° 37' 42,24" y longitud -71° 26' 7,44", vértice 2 (V2) latitud 10° 40' 4,8" y longitud -71° 12' 19,44", vértice 3 (V3) latitud 10° 53' 10,32" y longitud -71° 14' 42", y por último, vértice 4 (V4) latitud 10° 51' 28,8" y longitud -71° 25' 15,96". Esta área abarca una superficie de aproximadamente 54.869 ha, representando cerca del 29,3% del municipio.

De un total de 103 pozos inventariados y georreferenciados en la zona centroccidental del municipio (área de mayor densidad de pozos), se seleccionaron 32 pozos profundos (> 8 m) considerando: usos del agua (principalmente consumo humano), estado de funcionamiento, distancia entre pozos, datos generales (profundidad, uso, tiempo de funcionamiento, etc.) y accesibilidad (Figura 1, Tabla 1). En estos pozos se realizaron tres jornadas de muestreos puntuales (febrero, abril y junio) para recolectar muestras de 1 l en recipientes plásticos para la caracterización fisicoquímica y de 125 ml en botellas estériles de vidrio para la enumeración de bacterias del grupo coliformes, con ayuda de los sistemas de bombeo instalados en cada pozo. Estas muestras fueron identificadas y conservadas en una cava con hielo para su traslado al laboratorio.

Tabla 1. Identificación y coordenadas geográficas de los pozos profundos estudiados

Pozo	Sector	Coordenadas UTM	Pozo	Sector	Coordenadas UTM
P1	Cataneja	252865 1181224	P17	Mecocal	238736 1175973
P2	Clarín	250286 1192125	P18	Mecocal	237006 1176229
P3	Crespo	237131 1185420	P19	Palmarito	256942 1190505
P4	Dique	246832 1197482	P20	Quisiro	252557 1200494
P5	Entrada	249300 1191987	P21	Rocío	235977 1179100
P6	Entrada	243283 1189489	P22	Rocío	233417 1178575
P7	Entrada	242785 1187823	P23	Rocío	232646 1179665
P8	Guayabito	241523 1182794	P24	Rocío	235714 1178648
P9	Jagüey de Piedras	243767 1191487	P25	Rodeo	241315 1184820
P10	Jagüey de Piedras	242319 1188767	P26	San Francisquito	233632 1186420
P11	Jajatal	250755 1196800	P27	San Francisquito	236218 1187204
P12	Jeguey	241830 1191946	P28	San Francisquito	235360 1186988
P13	Jeguey	242201 1191704	P29	San Francisquito	231347 1190234
P14	Mecoc	237076 1177061	P30	Sarao	239277 1188419
P15	Mecoc	237726 1175765	P31	Sarao	240272 1188569
P16	Mecocal	238464 1177312	P32	Verdes	249716 1198061

Análisis de parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos

En las muestras de agua subterránea se analizaron los siguientes parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, de acuerdo con los requerimientos de los ICA estudiados: pH (método potenciométrico con electrodo de vidrio y potenciómetro OAKTON pH 510 Series), color (método de comparación visual con Aquatester ORBECO-HELLIGE), turbidez (método turbidimétrico con turbidímetro digital ORBECO-HELLIGE 965-10A), sólidos disueltos totales (SDT) (método potenciométrico con celda conductimétrica y potenciómetro OAKTON CON 510 Series), dureza total (método complexiométrico con titulante EDTA e indicador negro de eriocromo T), cloruro (método argentimétrico con titulante AgNO₃ e indicador K₂CrO₄), sulfato (método turbidimétrico con BaCl₂ y medición espectrofotométrica a 420 nm), sodio (método espectrométrico con fotómetro de llama CORNING 410), nitrito+nitrato (NO₂⁻+NO₃⁻) (método de reducción en la columna de cadmio y medición espectrofotométrica a 543 nm), hierro total (método colorimétrico con fenantrolina y medición espectrofotométrica a 510 nm), manganeso total (método colorimétrico con persulfato y medición espectrofotométrica a 525 nm), bacterias coliformes totales (BCT) y fecales (BCF) (técnica de fermentación en tubos múltiples con medios de cultivo HIMEDIA), según los métodos estandarizados señalados (APHA *et al.*, 2017). En total fueron 13 parámetros, 96 muestras y 1.248 valores.

Para determinar la adecuación del agua de los pozos al uso de consumo humano, así como en las estimaciones de los ICA, se aplicaron los límites permisibles establecidos por la OMS (Tabla 2; OMS, 2018); considerando que dichas aguas son destinadas principalmente para este fin por los habitantes de la zona, sin un tratamiento previo.

Tabla 2. Límites permisibles de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos (OMS, 2018) para determinar la adecuación del agua de los pozos al uso de consumo humano y para estimar los ICA en el presente estudio

Parámetro	Agua destinada a consumo humano
pH	6,50 - 9,20
Color (UC)	15
Turbidez (UNT)	4
SDT (mg/L)	1.000
Dureza total (mgCaCO ₃ /L)	200
Cloruro (mg/L)	250
Sulfato (mg/L)	250
Sodio (mg/L)	200
NO ₂ ⁻ +NO ₃ ⁻ (mg/L)	1
Fe total (mg/L)	0,31
Mn total (mg/L)	0,43
BCT (NMP/100 mL)	Ausentes
BCF (NMP/100 mL)	Ausentes

SDT: sólidos disueltos totales, BCT: bacterias coliformes totales, BCF: bacterias coliformes fecales.

Estimación de índices de calidad de agua

Se estudiaron tres ICA diferentes considerando su rango de aplicación, especificidad al tipo de muestras (agua subterránea), uso para consumo humano y diversidad de los parámetros considerados (Bhargava & Asce, 1985; Tyagi *et al.*, 2013; Sánchez *et al.*, 2016). A continuación, se detalla cada uno de ellos.

ICA-Aritmético ponderado

En 1970 Brown con el apoyo de la National Sanitation Foundation desarrolló e implementó un ICA de manera formal, basándose en la estructura del índice de Horton y el método Delphi en la definición de los parámetros (no biológicos), pesos ponderados, subíndices y clasificación a ser empleados en el cálculo. La clasificación consideró las características que debe presentar la fuente de captación para su uso de consumo humano (Brown *et al.*, 1970; Torres *et al.*, 2009). El cálculo incluye 7 parámetros fisicoquímicos (Sánchez *et al.*, 2016): pH, SDT, sodio, cloruro, dureza total, sulfato y NO₂⁻+NO₃⁻. Por lo tanto, inicialmente, se asignaron los pesos relativos de ponderación, acorde con la importancia relativa de la calidad de agua para consumo humano.

Las ponderaciones utilizadas estuvieron en el rango de 1 a 5, asignándole a los parámetros preponderantes un valor de 5 (SDT y NO₂⁻+NO₃⁻), 4 para sodio y cloruro, 3 para dureza total y sulfato, y 1 al parámetro menos relevante (pH). Seguidamente, se calculó el peso relativo (Wi), considerando cada parámetro, de acuerdo con la Ecuación 1 (Horton, 1965; Brown *et al.*, 1970; Sánchez *et al.*, 2016):

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=0}^n w_i} \quad (1)$$

Donde: Wi es el peso relativo del parámetro, wi la ponderación relativa del parámetro y n el número de parámetros.

Finalmente, se estableció una escala de valoración de la calidad de agua para cada parámetro, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100 \quad (2)$$

Donde: qi es la calificación de la calidad de agua, Ci la concentración del parámetro y Si el valor límite para agua destinada a consumo humano (OMS, 2018).

Luego, se calculó el subíndice de cada parámetro, según:

$$SI = W_i \times q_i \quad (3)$$

Donde: SI es el subíndice de cada parámetro y qi la calificación de la calidad de agua.

Así, el valor para el ICA-Aritmético ponderado, se obtuvo sumando los subíndices de cada parámetro (SI), de acuerdo con:

$$ICA - \text{Aritmético ponderado} = \sum SI \quad (4)$$

La interpretación de los valores del ICA-Aritmético ponderado se realizó empleando 5 categorías de calidad de agua: excelente (< 50), buena (50-100), pobre (100-200), muy pobre (200-300) y no apta para consumo humano (> 300) (Sánchez *et al.*, 2016).

ICA-Consejo canadiense de ministros de ambiente

Este ICA fue formulado por las jurisdicciones canadienses correspondientes para transmitir la información sobre la calidad del agua, tanto a la gerencia como al público. En su cálculo se recomienda usar al menos ocho parámetros fisicoquímicos, pero no más de veinte. En tal sentido, se aplicó la Ecuación 5 (CCME, 2017), usando las siguientes variables (11): pH, color, turbidez, SDT, dureza total, cloruro, sulfato, sodio, $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$, hierro total y manganeso total, mediante la determinación de tres factores que representan el alcance, frecuencia y amplitud. El alcance (F1) se calculó con la Ecuación 6, definiendo el porcentaje de muestras que presentaban valores por encima del límite permisible de la norma de referencia (OMS, 2018), respecto al total de muestras consideradas. La frecuencia (F2) se estableció usando la Ecuación 7, basándose en la relación entre la cantidad de valores por fuera de los niveles deseables, respecto al total de datos de las variables estudiadas. La amplitud (F3) se determinó con la Ecuación 7, y corresponde a la desviación que existe en los datos, determinada por la magnitud de los excesos de cada muestra que se encontraba fuera de límite, de acuerdo con la norma de referencia (OMS, 2018). A saber:

$$\text{ICA} - \text{CCME} = \frac{100 - \sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1,732} \quad (5)$$

Donde: F1 (alcance) es el número de variables cuyos límites no se cumplieron, según CCME (2017):

$$F1 = \frac{\text{Número de variables fallidas}}{\text{Total del número de variables}} \times 100 \quad (6)$$

F2 (frecuencia) es el número de veces que no se cumplieron los límites, según CCME (2017):

$$F2 = \frac{\text{Número de pruebas fallidas}}{\text{Total del número de pruebas}} \times 100 \quad (7)$$

F3 (amplitud) es la cantidad por la que no se alcanzan los límites, la cual se calculó mediante los tres pasos siguientes (CCME, 2017):

(i) El número de veces que una concentración individual es mayor o menor que el límite se denomina “excursión” y se expresa de las siguientes maneras:

Cuando el valor de la prueba supera el límite:

$$\text{Excursión} = \left(\frac{\text{Valor de pruebas fallidas}}{\text{Valor de referencia}} \right) - 1 \quad (8)$$

Para el caso que el límite sea un mínimo:

$$\text{Excursión} = \left(\frac{\text{Valor de referencia}}{\text{Valor de pruebas fallidas}} \right) - 1 \quad (9)$$

(ii) La variable nse es la sumatoria de las pruebas individuales que están fuera de límite y que son calculadas al sumar las excursiones para el objetivo de la evaluación y se divide entre el número total de pruebas (tanto las que cumplen los límites como las que no cumplen):

$$\text{nse} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Excursiones}}{\text{Número de pruebas}} \quad (10)$$

(iii) F3 se calculó entonces, mediante una función asintótica:

$$F3 = \frac{\text{nse}}{0,01 \times \text{nse} + 0,01} \quad (11)$$

La interpretación de los valores del ICA-CCME se realizó empleando 5 categorías de calidad de agua: excelente (95-100), buena (80-94), justa (60-79), marginal (45-59) y mala (0-44) (Tyagi *et al.*, 2013).

ICA-Bhargava

En 1974 Walski y Parker plantearon una serie de ecuaciones y curvas derivadas para conocer la calidad de agua, limitándose al uso recreacional. Cada una de las curvas consideradas desarrollaban un peso ponderado a cada una de las variables en estudio, sin embargo, en su modelo no pudieron reflejarse racionalmente los valores del índice calculado, debido a la dificultad de asignar pesos adecuados para un uso determinado (Walski & Parker, 1974). Posteriormente, un enfoque simplificado incluyó el efecto de la variable en la función de sensibilidad, para reflejar la importancia de cada parámetro de manera más significativa en cada uso del agua. Este enfoque elimina la inclusión del factor de ponderación de cada variable en la expresión del índice para cada uso, y el cálculo se simplifica, además de hacerse racional. Esto se plantea a través de tres categorías: físicas, químicas y biológicas, sin límites en cuanto a la cantidad de parámetros a considerar. Sin embargo, no todas las variables son perjudiciales para todos los usos; cualquiera puede tener una gran

importancia en un uso, pero no para otro (Bhargava, 1983). De esta manera, el manejo del ICA-Bhargava se enfoca en incluir la importancia de cada variable en la función de sensibilidad, la cual varía entre 0 y 1, permitiendo diferenciar los parámetros de calidad en cuatro grupos distintivos (Tabla 3), en función del daño que pueden ocasionar sobre la salud humana (Bhargava & Asce, 1985). Los parámetros considerados, fueron los siguientes (13): pH, color, turbidez, SDT, cloruro, dureza total, sulfato, sodio, hierro total, manganeso total, $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$, BCT y BCF.

Tabla 3. Descripción de las variables e importancia relacionada con la salud de las personas, de acuerdo con el ICA-Bhargava (Bhargava & Asce, 1985)

Grupo	Parámetro	Ecuación	Descripción
1	Bacterias coliformes	$f_i = e^{(-16(C-1))}$	Esta variable tiene una implicación directa en la salud del consumidor
2	Metales: cadmio total, bario, cromo, níquel, sodio, entre otros	$f_i = e^{(-4(C-1))}$	Posee un efecto tóxico acumulativo en el consumidor
3	Olor, color, turbidez y otras cualidades estéticas	$f_i = e^{(-2(C-1))}$	Factores importantes en la aceptación y confianza de los ciudadanos en un sistema público de agua
4	Cloruro, sulfato, espumantes, hierro, manganeso, zinc, cobre y sólidos disueltos totales	$f_i = e^{(-2(C-1))}$	Sustancias inorgánicas y orgánicas no tóxicas

f_i : función de sensibilidad, C: concentración relativa.

La variable C en la Tabla 3 representa la relación entre la concentración del contaminante y el nivel máximo permisible del mismo, de acuerdo con la norma de referencia (OMS, 2018). Esta variable es un número sin unidades. C tomará un valor de 1 cuando el valor del contaminante sea menor a su valor permisible y se representa con la siguiente ecuación (Bhargava & Asce, 1985):

$$C = \frac{C_i}{C_{ml}} \quad (12)$$

Donde: C_i es la concentración del contaminante y C_{ml} el valor permisible del contaminante, según la norma de referencia (OMS, 2018).

El modelo de simplificación del ICA-Bhargava, sería entonces (Bhargava, 1983):

$$\text{ICA - Bhargava} = \left(\prod (f_{ipi})^{\frac{1}{n}} \right) \times 100 \quad (13)$$

Donde: f_{ipi} es la función de sensibilidad de la variable y n el número de variables consideradas.

La interpretación de los valores del ICA-Bhargava se realizó empleando 5 clases de calidad de agua: I excelente (90-100), II buena (89-65), III media (64-35), IV inadecuada (11-34) y V muy mala (10-1) (Hop *et al.*, 2008).

Análisis estadístico de datos

Se calculó la estadística descriptiva (máximo, mínimo, media aritmética y desviación estándar) para los parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos e ICA, empleando el programa Excel para Windows 2010. Se realizó un análisis de varianza (ADEVA) de un factor y la prueba *a posteriori* de Tukey, con la finalidad de determinar las diferencias significativas entre los valores de los ICA con respecto al pozo de agua (variabilidad espacial), usando el programa SPSS Statistics versión 20. Antes de realizar el ADEVA se comprobaron, tanto la homogeneidad de las varianzas (prueba de Bartlett) como la distribución normal de los residuos (prueba de Kolmogorov-Smirnov).

Resultados

Parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos

En la tabla 4 se presentan las medias aritméticas, desviaciones estándares, mínimos y máximos para los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos medidos en el agua de los pozos profundos. Los rangos de valores para pH, color y turbidez, fueron: 5,20-7,65 unidades, <0,5-200,0 UC y <0,1-368,2 UNT. Se observó que el agua de 59,4 (19 pozos: P3, P5, P7, P8, P9, P10, P16, P17, P21, P22, P24, P25, P26, P27, P28, P29, P30, P31 y P32); 31,2 (10 pozos: P2, P6, P8, P14, P17, P18, P21, P24, P25 y P31) y 46,9% de los pozos (15 pozos: P2, P7, P8, P14, P17, P18, P21, P22, P24, P25, P26, P27, P29, P30 y P31), no cumplieron con los límites permisibles establecidos por la OMS (2018) para consumo humano (Tabla 2), respectivamente.

Los niveles de SDT se encontraron entre 375,74 y 2.671,14 mg/L (Tabla 4), develando que el agua de 28,10% de los pozos (9 pozos: P1, P4, P11, P13, P15, P17, P19, P20 y P32), no contenía el nivel de aceptabilidad requerido para consumo humano (Tabla 2). Para dureza total, el 21,90% (7 pozos: P4, P11, P19, P20, P23, P28 y P32) presentó valores superiores al establecido por la OMS (2018). También, el 37,50% (12 pozos: P4, P9, P12, P13, P15, P17, P22, P23, P26, P27, P28 y P29) de los pozos incumplió dichas normas respecto a las concentraciones de cloruro, cuyas magnitudes

estuvieron entre 48,95 y 487,65 mg/L (Tabla 4). En tanto que 21,90% (7 pozos: P4, P11, P15, P17, P19, P20 y P32), excedieron el valor permisible de sulfato (OMS, 2018), con niveles entre 3,80 y 889,55 mg/L.

Tabla 4. Valores medios y desviaciones estándares para los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos en agua de pozos profundos del área de estudio

Parámetro	Media±DE	Mínimo	Máximo
pH	6,41 ± 0,49	5,20	7,65
Color (UC)	16,10 ± 26,80	<0,50	200,00
Turbidez (UNT)	13,70 ± 47,40	<0,10	368,20
SDT (mg/L)	832,79 ± 511,57	375,74	2.671,14
Dureza total (mgCaCO ₃ /L)	157,29 ± 109,80	40,42	498,18
Cloruro (mg/L)	194,06 ± 101,10	48,95	487,65
Sulfato (mg/L)	148,18 ± 223,24	3,80	889,55
Sodio (mg/L)	188,89 ± 127,64	78,26	625,32
NO ₂ +NO ₃ (mg/L)	0,71 ± 2,42	0,10	17,60
Fe total (mg/L)	2,72 ± 3,14	0,07	11,99
Mn total (mg/L)	0,31 ± 0,45	<0,01	1,74
BCT (NMP/100 mL)	3,20 ± 3,40	<2,20	>16,00
BCF (NMP/100 mL)	2,40 ± 1,50	<2,20	>16,00

n= 96, DE: desviación estándar, SDT: sólidos disueltos totales, BCT: bacterias coliformes totales, BCF: bacterias coliformes fecales.

Las concentraciones de sodio en el agua de los pozos estuvieron entre 78,26 y 625,32 mg/L (Tabla 4), observándose que 31,20% (10 pozos: P1, P4, P11, P12, P13, P15, P17, P19, P20 y P32) de los pozos no cumplieron con la calidad de agua para consumo humano (Tabla 2). Por su parte, los contenidos de NO₂⁻+NO₃⁻ denotaron un rango de 0,10 - 17,60 mg/L, con valores superiores al límite en 9,4% (3 pozos: P6, P30 y P31). En el mismo orden de ideas, las concentraciones de hierro total se encontraron entre 0,07 y 11,99 mg/L y de manganeso total entre <0,01 y 1,74 mg/L, con un 96,90 (31 pozos: todos excepto P3) y 21,90% (7 pozos: P10, P17, P22, P26, P29, P30 y P31) de los pozos por encima de los niveles aceptados para consumo humano (OMS, 2018), respectivamente. En tanto que las BCT y BCF se presentaron en densidades desde <2,20 hasta >16,00 NMP/100 ml, con presencia en 100% de los pozos y siendo superiores a las establecidas para dicho uso (Tabla 2); hecho posiblemente relacionado con la cercanía entre pozos de agua, pozos sépticos y letrinas.

De manera general, considerando la norma de calidad de agua de la OMS (2018), ninguno de los pozos analizados presentó una calidad apta para consumo humano (principalmente debido a: pH, turbidez, hierro total, BCT y BCF), ya que no cumplieron con todos los límites permisibles de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos monitoreados. Así, P3 fue el pozo que incumplió la menor cantidad de parámetros (3: pH, BCT y BCF), mientras que P17 fue el que presentó un mayor número de parámetros por encima de la norma de referencia (11: todos, excepto dureza total y NO₂⁻+NO₃⁻). En tal sentido, algunos de los posibles efectos sobre la salud humana relacionados con la ingesta de esta agua, son: deterioro de la palatabilidad, intoxicación, cianosis infantil, dolencias renales y enfermedades hídras (cólera, disentería, influenza, hepatitis, disentería bacilar, gastroenteritis, otras) (OMS, 2018).

Índices de calidad de agua

Los valores de los ICA calculados para el agua de pozos profundos del área de estudio: ICA-Aritmético ponderado, ICA-CCME e ICA-Bhargava, estuvieron entre: 29 (P7) y 212 (P4), 37 (P17) y 93 (P5), y entre 39 (P32) y 59 (P23 y P28), respectivamente (Figura 2), con diferencias espaciales altamente significativas para ICA-Aritmético ponderado (p<0,001; factor de Fisher 15,300) e ICA-CCME (p<0,001; factor de Fisher 23,135), y significativas (p<0,05; factor de Fisher 1,642) para ICA-Bhargava (Tabla 5).

Tabla 5. Análisis de varianza (ADEVA) de un factor (variabilidad espacial) para los índices de calidad de agua (ICA) en pozos profundos del área de estudio

Variable	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	p
ICA-AP	137.094,40	31	4422,40	15,300	<0,001
ICA-CCME	14.145,89	31	456,32	23,135	<0,001
ICA-Bhargava	1.438,26	31	46,40	1,642	0,047

AP: aritmético ponderado, CCME: Canadian Council of Ministers of the Environment, gl: grados de libertad, F: factor de Fisher, p: nivel de significancia.

Discusión

Variabilidad espacial de los índices de calidad de agua

Los ICA estudiados en el presente trabajo permitieron conocer el nivel de aceptabilidad del agua de los diferentes pozos analizados para consumo humano, usando ecuaciones definidas y reconocidas a nivel mundial. En cuanto al ICA-Aritmético ponderado, la prueba de Tukey (p<0,05) mostró 7 grupos distintivos, donde P2, P3, P5, P6, P7, P8, P10, P14,

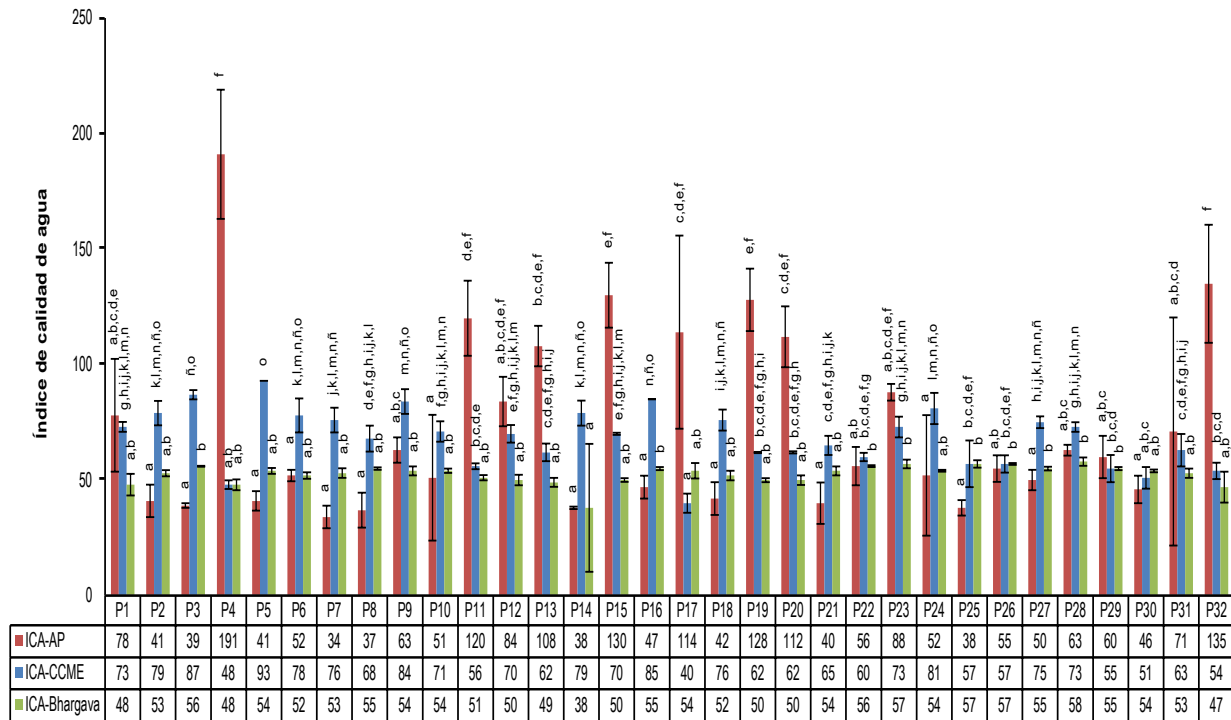


Figura 2. Valores medios y desviaciones estándares (barras verticales, n= 3) para los índices de calidad de agua (ICA) en pozos profundos del área de estudio. Letras distintas para un mismo ICA indican diferencias significativas (p<0,05), según la prueba de Tukey (variación espacial). AP: aritmético ponderado, CCME: Canadian Council of Ministers of the Environment

P16, P18, P21, P24, P25, P27 y P30 experimentaron los valores menores y P4 los mayores (Figura 2). Así, el 34,40% de los pozos muestreados (11 pozos: P2, P3, P5, P7, P8, P14, P16, P18, P21, P25 y P30) se clasificó con una calidad de agua “excelente”, el 40,60% (13 pozos: P1, P6, P9, P10, P12, P22, P23, P24, P26, P27, P28, P29 y P31) como “buena” y el 25,00% (8 pozos: P4, P11, P13, P15, P17, P19, P20 y P32) se designó como “pobre” (Figura 2, Tabla 6). Esta última categorización para 8 de los pozos hace referencia a que el agua no es apta para consumo humano, debido a que algunos de los parámetros considerados en este ICA no cumplieron con la norma de calidad de referencia (OMS, 2018); principalmente: SDT, sodio y sulfato.

Tabla 6. Cantidad de pozos profundos de acuerdo con las categorías de los índices de calidad de agua (ICA) estudiados

Calidad de agua para consumo humano	ICA-AP	ICA-CCME	ICA-Bhargava
Excelente	11	0	0
Buena	13	5	0
Pobre, justa o media	8	19	32
Muy pobre, marginal o inadecuada	0	7	0
Mala, muy mala o no apta	0	1	0
Total	32	32	32

AP: aritmético ponderado, CCME: Canadian Council of Ministers of the Environment.

Al contrastar los resultados obtenidos en este índice con los reportados para otros acuíferos, se observan algunas semejanzas (Tabla 7). Por ejemplo, Sánchez *et al.* (2016) en su estudio al sur de Quintana Roo (México), encontraron que solo el 1% de los pozos analizados resultaron “extremadamente pobres”, como consecuencia de las altas concentraciones de sulfato y cloruro, ocasionadas por la gran infiltración de agua marina hacia las capas freáticas, por desechos de agua residual producto de la densidad poblacional y la actividad agropecuaria en la zona. También en Gujarat (India), Khatri *et al.*, (2020) evaluaron 50 pozos usando ICA, tales como el ICA-Aritmético ponderado, tomando como referencia principal los valores máximos permisibles de la OMS. Allí, el 54% de las muestras presentó una calidad “muy pobre”, 24% “pobre”, 16% “buena” y 6% “no apta”; siendo los factores más influyentes para la disminución de la calidad de agua: SDT, dureza total y alcalinidad, como resultado de su aporte a partir de los estratos geológicos y el aumento de la producción de iones de calcio y magnesio provenientes de minerales presentes en los acuíferos.

Tabla 7. Comparación entre los índices de calidad de agua (ICA) en el área de estudio y otros cuerpos de agua en el mundo, con fines de consumo humano

Tipo de agua y localidad	ICA-AP	ICA-CCME	ICA-Bhargava	Referencia
Agua subterránea; Zulia, Venezuela	29-212 [40,60%: buena]	37-93 [59,40%: justa]	39-59 [100%: media]	Este trabajo
Agua subterránea; Quintana Roo, México	14-174 [58%: excelente]			Sánchez <i>et al.</i> (2016)
Agua subterránea; Gujarat, India	14,32-258,43 [54%: muy pobre]	39,35 - 88,33 [46%: buena]		Khatri <i>et al.</i> (2020)
Agua de río; Nallathaniya, Thaligama, Hanwella, Mattakkuliya, Sri Lanka		29-64 [77,80%: pobre]		Mahagamage & Manage (2014)
Agua subterránea; Valle de Puebla, México		30-100 [>60%: excelente]		Salcedo <i>et al.</i> (2015)
Agua de río; Al-Najat, Irak			10,78 - 43,65 [58,3%: inadecuada]	Mustafa <i>et al.</i> (2017)
Agua de río; Diyala, Irak			0-76,13 [66,7%: muy mala]	Al-Musawi (2018)

AP: aritmético ponderado, CCME: *Canadian Council of Ministers of the Environment*. Entre corchetes se indica la calidad de agua con respecto al porcentaje mayor de muestras.

Por su parte, para el ICA-CCME se obtuvo una diferenciación espacial de 16 grupos, de acuerdo con la prueba de Tukey ($p < 0,05$), donde los valores menores se presentaron en P17 y los mayores en P5; el resto de los pozos exhibió valores intermedios (Figura 2). De acuerdo a esto, el 15,60% de los pozos (5 pozos: P3, P5, P9, P16 y P24) se clasificó con una calidad de agua “buena”; 59,41% (19 pozos: P1, P2, P6, P7, P8, P10, P12, P13, P14, P15, P18, P19, P20, P21, P22, P23, P27, P28 y P31) como “justa”; 21,93% (7 pozos: P4, P11, P25, P26, P29, P30 y P32) como “marginal” y el 3,12% (1 pozo: P17) como “mala” (Figura 2, Tabla 6). Ninguno de los pozos entró en la categoría de “excelente”. El criterio de calidad “mala” fue resultante de que nueve de los once parámetros fisicoquímicos incluidos (excepto dureza total y $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$), sobrepasaron los límites máximos establecidos para consumo humano (OMS, 2018).

Los valores obtenidos para el ICA-CCME son comparables, por ejemplo, a los observados en la cuenca del río Kelani (Sri Lanka), con una calidad de agua “marginal” y “pobre” en la mayoría de los lugares de muestreo (Tabla 7), en cuyo estudio se utilizaron como referencia las directrices de la OMS. Se destaca que dicha contaminación pudo ser producto del ingreso de aguas residuales, residuos sólidos y sustancias químicas (Mahagamage & Manage, 2014). Similarmente, Salcedo *et al.* (2015) realizaron el estudio del este ICA en agua subterránea del acuífero del Valle de Puebla (México), usando como referencia una norma nacional para uso y consumo humano, observándose altas concentraciones de sulfato, calcio, magnesio, SDT y dureza total, cuyo origen estuvo asociado a la disolución de minerales sulfatados (yeso anhidrita) y carbonatados (calcita), que se encuentran en los materiales geológicos que conforman el acuífero. Esto demostró que a lo largo del tiempo ha existido un cambio en la calidad de agua en algunos pozos del sistema de abastecimiento, disminuyendo la categorización de “excelente” y aumentando la cantidad de pozos de menor nivel, debido a los parámetros antes referidos.

El ICA-Bhargava, por su lado, expuso que el 100% de los pozos (32 pozos: desde P1 hasta P32) se encontró en una calidad “media” (Figura 2, Tabla 6), destacando su uso inadecuado para consumo humano, como resultado de la inclusión de los indicadores bacteriológicos en su cálculo. Así, los parámetros que determinaron esta categorización, fueron básicamente: pH, turbidez, hierro total, BCT y BCF. Los valores obtenidos resultan análogos a los encontrados por Mustafa *et al.* (2017) en su estudio del río Éufrates (Al-Najat, Irak), donde analizaron la calidad de agua del mediante la estimación del nivel de aceptabilidad para consumo humano, con la aplicación del ICA-Bhargava (Tabla 7). Las muestras fueron recolectadas en dos estaciones, denominadas Al-Kufa y Manathira. El valor máximo para la estación Al-Kufa fue de 41,86; con una calificación “acceptable”, mientras que el más bajo de 21,49 indicó un nivel “inadecuado”. Para la estación Manathira el valor máximo encontrado fue de 43,65; para una clasificación de “acceptable”, y el mínimo de 10,78 hizo referencia a una calidad “no apta para consumo humano”. La causa principal del deterioro de la calidad de agua y del nivel de aceptabilidad, de acuerdo con el ICA-Bhargava, fue el alto contenido de SDT, sulfato, calcio y dureza total, resultante de los suministros de fuentes naturales, cloacas, escorrentía agrícola y agua residual.

Otro estudio con estimaciones del ICA-Bhargava es el realizado en el río Diyala (Irak); un afluente del río Tigris, que se centró en el análisis de la calidad de agua en tres estaciones (D12, D15 y D17), obteniéndose como resultado que la primera (D12) presentó una calidad “buena” para consumo humano, debido a que es el punto de origen del río y en sus alrededores no hay población en abundancia. En D15, el nivel fue “inadecuada”, por la alta influencia de contaminación de origen agrícola e industrial, mientras que D17 mostró una calidad “muy mala” resultante de las altas concentraciones de materia orgánica y otros residuos diversos que alteran las propiedades del agua (Al-Musawi, 2018).

Comparación de los índices de calidad de agua

Las diferencias obtenidas entre los niveles de clasificación en los ICA estudiados, en cuanto a la calidad de agua estimada para los pozos profundos, son debidas básicamente a la cantidad y tipo de parámetros utilizados en los cálculos. Como se ha mencionado anteriormente, cada uno de los distintos ICA emplea un número variable de parámetros,

pudiéndose dejar por fuera en algunos casos un parámetro que aporte información significativa en cuanto al nivel de contaminación de un sistema hídrico. Un caso muy particular ocurre con el ICA-Aritmético ponderado, que contempla solo parámetros muy básicos, como: pH, SDT, sodio, cloruro, sulfato, dureza total y $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$, obviando variables relevantes, tales como: color, turbidez, hierro total, manganeso total, BCT y BCF, que muchas veces se encuentran en cantidades sustanciales en las aguas subterráneas; por tanto, este índice no resulta un buen indicador para analizar el estado de este tipo de aguas. Además, las ecuaciones de los ICA de tipo aditivo o de suma ponderada tienen el inconveniente de ser menos sensibles a variaciones extremas en la calidad de agua (alta contaminación), de acuerdo con lo planteado por Cahó & López (2017).

En cuanto al ICA-CCME se puede mencionar que la ecuación no asigna ningún factor de ponderación a las variables usadas; sus suposiciones y metodología toman solo los parámetros que no se ajustan a los límites permisibles de la norma de referencia (Sabreen *et al.*, 2021). Aun así, este ICA no considera las densidades de parámetros clave como BCT y BCF, los cuales resultan preponderantes con respecto a la calidad de agua para consumo humano, ya que, mediante la ingesta de aguas contaminadas con estas bacterias, se pueden ocasionar daños a la salud del consumidor, de acuerdo con lo planteado anteriormente.

Por otra parte, el ICA-Bhargava incluye una diversidad más amplia de variables; valores de bacterias coliformes y metales, además de parámetros físicos que causan efectos nocivos, como: turbidez y color, y sustancias inorgánicas no tóxicas, tales como: sulfato, SDT, cloruro, entre otras (Banda & Kumarasamy, 2020). Además, Bhargava (1983) expresó que otras variables relevantes para la calidad de agua, y que pudieran aplicarse en este índice, son: oxígeno disuelto, demanda química y bioquímica de oxígeno, entre otras. Con este ICA se obtuvo una calidad de agua “media” en los 32 pozos (Figura 2, Tabla 6), debido a que se consideraron todos los parámetros en estudio, con atención especial al contenido bacteriano; aparte de que las funciones de sensibilidad incluyen los efectos de las concentraciones y su ponderación, con relación a su nivel de importancia en el cálculo (Banda & Kumarasamy, 2020).

De acuerdo con lo anterior, y con base en los resultados obtenidos en este trabajo, el ICA-Bhargava se considera el más adecuado para informar acerca de la calidad de agua en los pozos de la zona de estudio (100% calidad media para consumo humano), siendo su estimación y sensibilidad más ajustada, además de corresponderse de manera fehaciente con los resultados mostrados por el análisis respecto a las normas de calidad de agua de referencia (OMS, 2018), donde el 100% de las muestras resultó no apto para el consumo humano. No obstante, para estudios futuros, se recomienda incluir un mayor número de parámetros en los ICA para obtener una mayor sensibilidad en la calificación del agua o considerar otros índices que incluyan mayor peso ponderado en los parámetros clave, y así, estimar de manera más precisa la calidad del agua para consumo humano. En tal sentido, la relevancia de este estudio radica en la practicidad de informar acerca de la calidad del agua para consumo humano a los entes gubernamentales y al público en general, considerando el uso frecuente de este recurso subterráneo debido a su menor grado de exposición a la contaminación y a la capacidad de filtración del suelo, que lo hace generalmente más puro que otros (p.ej. aguas superficiales), además que los acuíferos por lo general son poco afectados por periodos prolongados de sequía (Vélez, 1999). En contraste, estos cuerpos de agua están sometidos a procesos geológicos dinámicos, así como de intrusión de agua salina, que se deben tener en cuenta al momento de seleccionar los ICA a aplicar, ya que son factores que influyen en los aumentos de concentraciones de ciertos parámetros (Erdogan *et al.*, 2019). Por último, el agua subterránea también es importante por tratarse de un recurso ampliamente distribuido y muy extenso, en comparación con el agua superficial, siendo los cambios en su cantidad y calidad frecuentemente muy lentos (Salcedo *et al.*, 2015).

Consideraciones Finales

El agua de los pozos profundos no presentó características fisicoquímicas y bacteriológicas aptas para consumo humano, ya que de los 32 estudiados ninguno se ajustó por completo a las especificaciones de la norma de referencia para el presente estudio, particularmente debido a los niveles de pH, turbidez, hierro total, BCT y BCF.

La estimación de los diferentes ICA mostró una variabilidad espacial significativa ($p < 0,05$), además de: i) ICA-Aritmético ponderado, el 25% de los pozos no es adecuado para consumo humano; ii) ICA-CCME, el 84,41% no es apropiado para dicho fin; iii) ICA-Bhargava, todos los pozos (100%) son inadecuados para consumo humano. Esta diferencia de calidad entre los tres ICA es debida al número y tipo de parámetros utilizados en los cálculos, particularmente relativo a los indicadores microbiológicos. De esta manera, se destaca que el ICA-Bhargava es el que tuvo mejor desempeño para estimar la calidad de agua de la zona de estudio, ya que sus resultados coinciden con los del análisis respecto a la normativa internacional de referencia. Este hecho destaca la importancia de considerar las densidades de BCT y BCF en las estimaciones de ICA que reflejen la calidad de agua para consumo humano, en especial referente a los aspectos sanitarios y de salud pública.

Finalmente, los trabajos de investigación de esta índole deben ser considerados por las dependencias gubernamentales competentes en cada país, para establecer planes de información y alertar a las poblaciones locales respecto al uso y calidad de las aguas subterráneas, a fin de minimizar su impacto negativo sobre la salud de las personas.

Conflicto de intereses

No se reporta conflicto de intereses.

Agradecimientos

A Dios por permitirnos la luz del entendimiento y la disposición para lograr todos nuestros objetivos.

Referencias

- Al-Musawi, N. (2018). Evaluation water quality of Diyala River in Iraq using Bhargava method. MATEC Web of Conferences, 162, 1-7. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816205001>
- APHA, AWWA, & WEF. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater. 23th edition. American Public Health Association (APHA). Washington D.C., USA.
- Banda, D.T., & Kumarasamy, M. (2020). A review of the existing water quality indices (WQIS). Pollution Research, 39(2), 487-512. Disponible en: http://www.envirobiotechjournals.com/article_abstract.php?aid=10629&iid=305&jid=4 (Acceso enero 2023).
- Bhargava, S. (1983). Use of a water quality index for river classification and zoning of Ganga River. Environmental Pollution Series B, Chemical and Physical, 6(1), 51-57. [http://dx.doi.org/10.1016/0143-148X\(83\)90029-0](http://dx.doi.org/10.1016/0143-148X(83)90029-0)
- Bhargava, D.S., & Asce, F. (1985). Expression for drinking water supply standards. Journal of Environmental Engineering, 111(3), 304-316. Disponible en: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9372%281985%29111%3A3%28304%29> (Acceso febrero 2023).
- Brown, R.M, McClelland, N., Deininger, R., & Tozer, R. (1970). A water quality index: do we dare? Water Sewage Works, 117(10), 339-343. Disponible en: [https://www.scirp.org/\(S\(i43dyn45teexjx455qlt3d2q\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=56510](https://www.scirp.org/(S(i43dyn45teexjx455qlt3d2q))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=56510) (Acceso enero 2023).
- Caho Rodríguez, C.A., & Lopez-Barrera, E.A. (2017). Determinación del índice de calidad de agua para el sector occidental del humedal Torca-Guaymaral (Colombia) empleando las metodologías UWQI y CWQI. Producción + Limpia, 12(2), 35-49. <https://doi.org/10.22507/pml.v12n2a3>
- CCME. (2017). Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life. CCME water quality index user's manual. Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). Disponible en: <https://ccme.ca/en/res/wqimanualen.pdf> (Acceso enero 2023).
- Edokpayi, J., Enitan, A.M., Mutileni, N., & Odiyo, J.O. (2018). Evaluation of water quality and human risk assessment due to heavy metals in groundwater around Muledane area of Vhembe District, Limpopo Province, South Africa. Chemistry Central Journal, 12(2). <https://doi.org/10.1186/s13065-017-0369-y>
- Erdogan, I.G., Fosso-Kankeu, E., Ntwampe, S., Waanders, F.B., Hoth, N., & Rand, A. (2019). Groundwater as an alternative source to irregular surface water in the O’Kiep area, Namaqualand, South Africa. Physics and Chemistry of the Earth, 114. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.09.003>
- Hop, N., To, T., & Tung, T. (2008). Classification and zoning of water quality for three main rivers in Binh Tri Thien region (central Vietnam) based on water quality index. Asian Journal on Science and Technology for Development, 25(2), 435-444. <https://doi.org/10.29037/ajstd.274>
- Horton, R.K., Lyon, W.A. Hubbard, E.C & McCallum, G.E. (1965). An index number system for rating water quality. Journal Water Pollution Control Federation, 37(3), 300-306. Disponible en: [https://www.scirp.org/\(S\(lz5mqp453edsnp55rrgict55\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2053211](https://www.scirp.org/(S(lz5mqp453edsnp55rrgict55))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2053211) (Acceso enero 2023).
- Khatri, N., Tyagi, S., Rawtani, D., Tharmavaram, M., & Kamboj R.D. (2020). Analysis and assessment of ground water quality in Satlasana Taluka, Mehsana district, Gujarat, India through application of water quality indices. Groundwater for Sustainable Development, 10. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100321>
- López Rodriguez, M.I., & Palací, D.G. (2014). Estudio multivariante de la calidad del agua: aplicación al río Júcar en el período 1990-2013. Revista Electrónica@ de Medio Ambiente, 15(1), 37-52. http://dx.doi.org/10.5209/rev_MARE.2014.v15.n1.45568

- Mahagamage, Y., & Manage, P. (2014). Water quality index (CCME-WQI) based assessment study of water quality in Kelani River Basin, Sri Lanka. Environment and Natural Resources International Conference (ENRIC 2014). Bangkok, Thailand. Disponible en: <http://dr.lib.sjp.ac.lk/handle/123456789/1825> (Acceso febrero 2023).
- Milovanovic, M. (2007). Water quality assessment and determination of pollution sources along the Axios/Vardar River, Southeastern Europe. *Desalination*, 213, 159-173. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.06.022>
- Mustafa, N., Khalid, A., & Athraa, M. (2017). Evaluation of water quality using Bhargava water quality index method and GIS, case study: Euphrates River in Al-Najaf City. *International Journal of Science and Research*, 6(7), 1286-1295. Disponible en: https://www.ijsr.net/get_count_search.php?paper_id=ART20175545 (Acceso enero 2023).
- Organización mundial de la salud, OMS. (2018). Guías para la calidad de consumo humano. 4a edición. Organización Mundial de la Salud (OMS). Ginebra, Suiza. Disponible en: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf?ua=1> (Acceso febrero 2023).
- Padrón Pacheco, J.E., (2013). Plan de gobierno municipal del municipio Miranda, estado Zulia, 2013-2017. Disponible en: http://www.cne.gob.ve/divulgacion_municipal_2013/programas/21/308.5566.pdf (Acceso enero 2023).
- PDVSA. (1997). Código estratigráfico de las cuencas petroleras de Venezuela. Comité Interfiliar de Estratigrafía y Nomenclatura (CIEN). Petróleos de Venezuela, S. A. (PDVSA). Disponible en: <http://www.pdvsa.com/lexico/t29w.htm> (Acceso febrero 2023).
- Ponce-Calderón., Olivo-Garrido, M.L., & Ponce-Vásquez, R.A. (2016). Caracterización de un ambiente costero, sector Sabaneta de Palma en la parroquia San José, municipio Miranda, estado Zulia. *Terra Nueva Etapa*, 32(52), 41-69. Disponible en: http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_terr/article/view/11713 (Acceso febrero 2023).
- Kareem, S., Jaber, W., Al-Maliki, L., Al-Husseiny, R., Al-Mamoori, S., & Alansari, N., (2021). Water quality assessment and phosphorus effect using water quality indices: Euphrates River-Iraq as a case study. *Groundwater for Sustainable Development*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100630>
- Sadat-Noori, S., Ebrahimi, K., & Liaghat, A. (2014). Groundwater quality assessment using the water quality index and GIS in Saveh-Nobaran aquifer, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 71, 3827-3843. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2770-8>
- Salcedo Sanchez, E.R., Garrido Hoyos, S.E., Estheller Alberich, M.V. & Martínez Morales, M. (2015). Evaluación de la calidad del agua subterránea mediante la utilización del índice CCME, en el acuífero del valle de Puebla. *Revista Latinoamericana del Ambiente y las Ciencias*, 6(12), 831-837. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.11799/58686> (Acceso enero 2023).
- Sánchez, A.J., Álvarez, T., Pacheco, G.J., Carrillo, L., & González, A.R. (2016). Calidad del agua subterránea: acuífero sur de Quintana Roo, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(4), 75-96. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353549828005> (Acceso febrero 2023).
- Sierra Ramírez, C.A. (2011). Calidad del agua. Evaluación y diagnóstico. Ediciones de la Universidad de Medellín. Disponible en: <https://repository.udem.edu.co/handle/11407/2568> (Acceso enero 2023).
- Singha, S., Devatha, C., Singha, S., & Verma, M.K. (2015). Assessing ground water quality using GIS. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 4(11), 689-694. <https://doi.org/10.17577/IJERTV4IS110604>
- Tyagi1, S., Sharma, B., Singh, P., & Dobha, R. (2013). Water quality assessment in terms of water quality index. *American Journal of Water Resources*, 1(3), 34-38. <https://doi.org/10.12691/ajwr-1-3-3>
- Torres, P., Cruz Hernaández, C., & Patiño, P.J. (2009). 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*, 8(15), 79-94. Disponible en: <https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/59> (Acceso febrero 2023).
- Vasanthavigar, M., Srinivasamoorthy, K., Vijayaragavan, K., Rajiv, R., Chidambaram, S., Anandhan, P., Manivannan, R., & Vasudevan, S. (2010). Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar sub-basin, Tamilnadu, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 171, 595-609. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1302-1>
- Vélez Otálvaro, M.V. (1999). Hidráulica de aguas subterráneas. 2a edición. Editorial Todográficas Ltda. Medellín, Colombia. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Velez-Maria/publication/338778773_Hidraulica_de_Aguas_Subterranas/links/5e2a11f492851c3aadd512bb/Hidraulica-de-Aguas-Subterranas.pdf (Acceso enero 2023).

- Villaruel Regino, N., Pino Ramírez, D., Sánchez Villalobos, A., Bracho García, D., Boscán Ocando, J., & González Martín, J. (2010). Descripción de un brote de dermatitis digital bovina en el municipio Miranda del estado Zulia, Venezuela (primer reporte). *Revista Científica FCV-LUZ*, 20(6), 600-607. Disponible en: <https://produccioncientificaluz.org/index.php/cientifica/article/view/15605> (Acceso enero 2023).
- Walski, T.M., & Parker, F.L. (1974). Consumers water quality index. *Journal of the Environmental Engineering Division*, 100(3), 259-611. <https://doi.org/10.1061/JEEGAV.0000184>
- Yaseen Al-Araji, H.K. (2019). Evaluation of physical chemical and biological characteristics of underground wells in Badra City, Iraq. *Baghdad Science Journal*, 16(3). <https://doi.org/10.21123/bsj.2019.16.3.0560>