

DETERMINACIÓN HISTÓRICA DE ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA EN OBSERVATORIOS PARTICIPATIVOS EN EL NORTE DE MÉXICO

Historical determination of water quality indices in participatory observatories in northern Mexico

Diego Gerardo PUENTE MIRANDA, Luz Idalia VALENZUELA GARCÍA
y María Teresa ALARCÓN HERRERA*

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C., Calle CIMAV 110, Ejido Arroyo Seco, C.P. 34147
Victoria de Durango, Durango, México.

*Autora para correspondencia: teresa.alarcon@cimav.edu.mx

(Recibido: diciembre 2021; aceptado: enero 2023)

Palabras clave: calidad microbiológica del agua, evaluación de recursos hídricos, zonas áridas.

RESUMEN

Los índices de calidad del agua (ICA) son herramientas para comunicar la calidad del agua a una audiencia no especializada, basándose en los datos del monitoreo de los cuerpos de agua. El objetivo de este proyecto fue determinar el ICA en cinco observatorios participativos (OP) ubicados en el norte de México, además de generar mapas y cuadros que presenten la información de forma concreta y clara sobre la calidad del agua y zonas de riesgo. Utilizando los datos de la Comisión Nacional del Agua se determinó la calidad de agua con los índices de León y del Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente, así como la calidad microbiológica con base en los reportes de coliformes fecales. Se clasificaron los sitios de los OP, en cuanto a la calidad microbiológica, de “excelente” a “fuertemente contaminada”. De acuerdo con los límites permisibles por las normas oficiales mexicanas para agua de consumo humano y riego agrícola, se aplicó una escala relativa con un puntaje de 0 a 100, para los índices determinados en los OP. Los resultados indican a través de los mapas desarrollados en el estudio, la presencia de tres sitios fuertemente contaminados microbiológicamente. En lo referente a la calidad requerida para consumo humano, el índice canadiense califica la calidad del agua como “pobre” en todos los sitios estudiados, mientras que el índice de León la clasifica en la escala de “contaminada” a “levemente contaminada”. Ambos índices indican la necesidad imperiosa de un tratamiento antes de ser destinada al uso de consumo humano.

Key words: arid zones, microbiological water quality, water resources assessment.

ABSTRACT

The Water Quality Indices (WQI) are tools that help to communicate the status of quality to a non-specialized audience, they are based on the existing regulations of the region. The objective of this project was to determine the WQI in five Participatory Observatories (PO) located in the north of Mexico, in addition to generating maps and charts that present information in a concrete and clear way on water quality and risk areas. Using data from the Comisión Nacional del Agua, the water quality was

evaluated with the León and Canadian Council of Ministers of the Environment indices, as well as the microbiological quality based on fecal coliform reports. PO sites are classified, in terms of microbiological quality, from “excellent” to “heavily contaminated”. Under the permissible limits by the official Mexican standards for water for human consumption and agricultural irrigation, a relative scale was applied with a score of 0 to 100, for the indices determined in the POs. The results indicate, through the maps developed in the study, the presence of three microbiologically contaminated sites. Regarding the quality required for human consumption, the Canadian index classifies the quality of the water as “poor” in all the sites studied, while the León index classifies it on the scale of “contaminated” to “slightly contaminated”. Both indices indicate the imperative need for treatment before being used for human consumption.

INTRODUCCIÓN

La calidad del agua describe su condición de acuerdo con sus características químicas, físicas y biológicas, que permiten su uso para un determinado fin. Es decir, la calidad necesaria para consumo humano no es la misma que la calidad para sostener vida acuática, o la de la destinada para fines de riego o recreación (WHO 2017). El agua segura debe de ser apta para uso y consumo, así como ser de buena calidad y no generar enfermedades. El agua clasificada como potable no debe representar un riesgo para la salud cuando se consume durante toda la vida (OPS-WHO 2017, OPS 2022).

Existen contaminantes que afectan la calidad del agua que se clasifican, según los parámetros para evaluarlos, en físicos, químicos, radiológicos y biológicos (Samboni-Ruiz et al. 2007). Entre los contaminantes químicos del agua subterránea se encuentran elementos potencialmente tóxicos como el arsénico (As) y los fluoruros (F), entre otros, los cuales, dependiendo de los usos del agua pueden causar efectos en la salud (Ali et al. 2013). Es conocido que el As puede translocarse en algunas plantas y bioacumularse en la parte comestible, incrementando la dosis de exposición en la gente que las consume a través de la cadena trófica (Ali et al. 2013). En cuanto a los contaminantes microbiológicos, la Organización Mundial de la Salud (OMS 2022) estima que 829 000 personas mueren cada año por enfermedades relacionadas con la insalubridad del agua o una mala higiene, por ello es de alta importancia determinar la calidad microbiológica del agua en las fuentes de abastecimiento y dar a conocer los riesgos a la salud en las comunidades.

El monitoreo del agua permite conocer su calidad a través del tiempo, la cual se determina analíticamente por diferentes parámetros físicos, químicos y biológicos, en función del uso al cual va a ser destinada. Si no se cuenta con esta información histórica,

difícilmente se pueden llevar a cabo tanto el seguimiento como las acciones requeridas para mejorar la calidad o para evitar el deterioro de los cuerpos de agua (León-Vizcaíno 1974, Valcarcel et al. 2009).

La calidad del agua de un sitio que va a ser destinado a diferentes usos se mide a través del índice de calidad del agua (ICA), el cual es el resultado de la conjunción matemática de los parámetros físicos, químicos y biológicos, que indican el grado de contaminación a la fecha de muestreo, expresado en porcentaje de agua pura, para facilitar su comunicación y comprensión a las comunidades a través de una escala relativa entre 0 y 100, donde el 0 % indica que el agua está fuertemente contaminada, mientras que el 100 % indica que el agua posee excelentes condiciones para un uso específico (CONAGUA 2000, Devi 2009). Existen diferentes metodologías de cálculo para los ICA (**Cuadro I**) las cuales pueden clasificarse de acuerdo con distintos criterios (Kachroud et al. 2019).

Los observatorios participativos, son regiones definidas por la Red Internacional para la Sostenibilidad de las Zonas Áridas (RISZA), con características específicas que incluyen pequeñas comunidades, en las cuales los habitantes participan en las diferentes acciones para monitorear cambios, conservar y mejorar su entorno. Estas regiones deben de ser representativas y deben de contribuir al intercambio de información para asegurar la preservación de la biodiversidad (RISZA 2017, RISZA 2018)

En el monitoreo de un cuerpo de agua para detectar su grado de contaminación se generan grandes cantidades de datos de los parámetros en medición, cuyos resultados son difíciles de interpretar por no expertos en el tema, y más aún de comunicar al público en general. La determinación de un ICA tiene como finalidad facilitar la comunicación al público, así como conocer el estado en el que se encuentra la calidad del agua en las zonas monitoreadas, identificando con ello las zonas de riesgo y acciones para cumplir con la calidad requerida para el uso

CUADRO I. CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA (ICA) POR SU METODOLOGÍA DE CÁLCULO.

Tipo de estructura	Índice de Calidad del Agua (ICA)	Método de agregación	Número de variables
Fórmulas	Horton	Promedio geométrico ponderado	10
	Nuevo ICA Said et al.2004	Logarítmico	5
	Bhargava	Producto ponderado	De acuerdo con el uso
	Canadian Council of Ministers of the Environment	Suma cuadrada armónica	Hasta 47
Diagramas	National Sanitation Foundation	Promedio geométrico ponderado	9
Ecuaciones	Dinnius	Promedio geométrico ponderado	12
	Oregon	Media cuadrada armónica no ponderada	8

Basado en Kachround et al. (2019).

específico al cual será destinada (CONAGUA 2000, Devi 2009). Dada la importancia de conocer la calidad del agua para consumo humano y el uso agrícola, el objetivo del presente estudio fue determinar el ICA en cinco observatorios participativos ecológicos (OPE) ubicados en el norte del país, además de generar mapas que muestren la información de forma concreta y clara sobre las zonas de riesgo.

delimitada para su estudio por la Red Internacional para la Sustentabilidad de Zonas Áridas (RISZA); los OP de Guadalupe, Seris, Cuahutémoc, Mapimi y Tokio. En la **figura 1** se presentan las zonas comprendidas por cada OP y su ubicación geográfica.

Se recopiló información para determinar el índice de calidad del agua usando la metodología de Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life (CCME 2017) y la metodología de León (León-Vizcaíno 1974) para los usos de consumo humano y riego agrícola. Para ello se utilizó la base de datos de las estaciones de monitoreo ubicadas en cada OP, publicada por la Comisión Nacional del Agua para el periodo 2015-2018 (CONAGUA 2021).

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó en las regiones de los cinco observatorios participativos (OP) presentados en la **figura 1**. La zona de cada OP fue establecida y

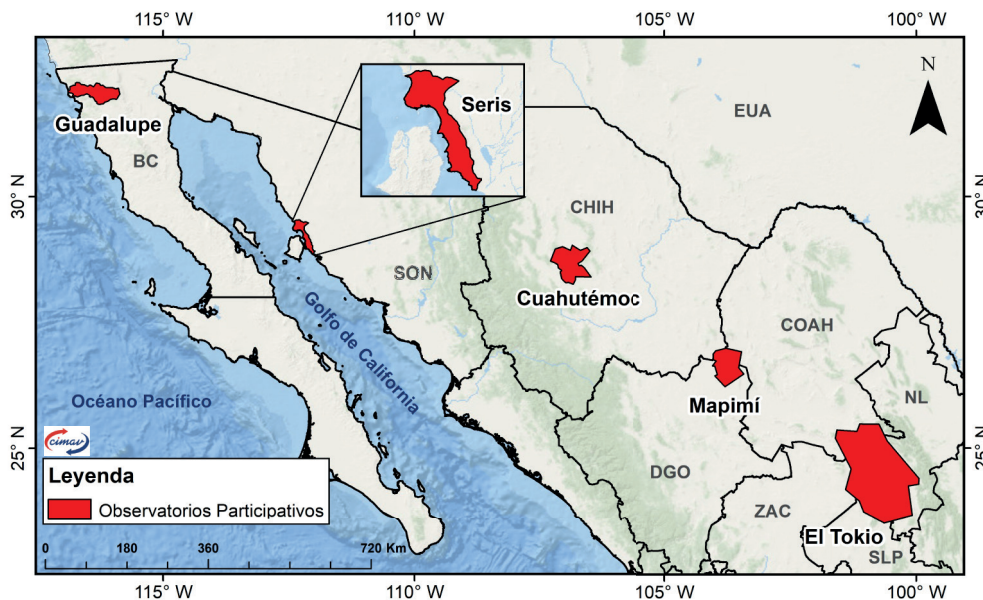


Fig. 1. Observatorios Participativos en el norte de México. Fuente: Creación propia con base en QGIS.

Además, se determinó el índice de calidad microbiológica tomando en cuenta los valores establecidos por la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua. Para calcular el índice de calidad microbiológica del agua de cada OP, se analizaron los datos publicados por la CONAGUA (2021) de las estaciones de monitoreo ubicadas en cada OP, en los años 2012-2018.

En el OP Seris no se determinaron ICA debido a la falta de estaciones de monitoreo de la CONAGUA en la zona.

La determinación del índice microbiológico se llevó a cabo utilizando los parámetros establecidos por la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua para coliformes fecales (NMP/100 mL). Los valores se clasificaron en cinco categorías (CONAGUA 2019) y se presentan en el **cuadro II**. Los resultados se analizaron de acuerdo con tres escenarios, tomando en cuenta los valores mínimos, máximos y su media, de acuerdo con los datos de calidad microbiológica considerada por la CONAGUA (2019). En el primer escenario se utilizan los valores más altos de coliformes fecales (NMP/100 mL), en el segundo los valores más bajos y en el tercero la media de todos los valores.

El índice de León fue de los primeros índices desarrollados en México para interpretar la calidad de los diferentes cuerpos de agua, una de sus primeras aplicaciones fue la determinación de la calidad en el sistema Lerma-Chapala (León-Vizcaíno 1974). Dentro de los ICA mexicanos se consideró el índice

de León, debido a sus técnicas multiplicativas, que son mucho más sensibles y muestran con mayor representatividad la calidad del agua (León-Vizcaíno 1974, Fernández-Parada y Solano-Ortega 2005).

La fórmula (Ecuación 1) para calcular el índice de León es la siguiente (León-Vizcaíno 1974).

$$ICA = \prod_{i=1}^n Qi^{wi} \tag{1}$$

Donde:

n = número de parámetros elegidos.

Wi = los pesos específicos asignados a cada parámetro (i), y ponderados entre 0 y 1, de tal forma que se cumpla que la sumatoria sea igual a uno.

Qi = la calidad del parámetro (i), en función de su concentración y cuya calificación oscila entre 0 y 100.

El ICA de León se lleva a una escala adimensional de 0 a 100, siendo 0 la calidad más baja y 100 la más alta, dividiéndose en 6 rangos: (E) excelente; (A) aceptable; (LC) levemente contaminada; (C) contaminada; (FC) fuertemente contaminada y (EC) excesivamente contaminada, las cuales tienen diferente valor de acuerdo con el uso destinado (**Cuadro III**). Dicha escala se valora de acuerdo con un análisis de expertos en cada tipo de contaminante lo cual implica la consideración de estudios toxicológicos para definir los pesos ponderados para cada parámetro en el índice (León-Vizcaíno 1974).

CUADRO II. VALORES ESTABLECIDOS PARA COMUNICAR LA CALIDAD MICROBIOLÓGICA DEL AGUA POR COLIFORMES FECALES.

Coliformes fecales (NMP/100mL)		
0 < CF ≤ 100	Excelente	No contaminada o condición normal. No hay evidencia de alteración en los valores de la calidad bacteriológica para el cuerpo de agua superficial
100 < CF ≤ 200	Buena calidad	Aguas superficiales con calidad satisfactoria para la vida acuática y para uso recreativo con contacto primario, así como para otros usos. Indicios de alteración de la calidad bacteriológica
200 < CF ≤ 1,000	Aceptable	Aguas superficiales con calidad admisible como fuente de abastecimiento y para riego agrícola. Muestra bajos niveles de alteración como resultado de la actividad humana
1,000 < CF ≤ 10,000	Contaminada	Aguas superficiales con contaminación bacteriológica. Indica alteración sustancial con respecto a la condición normal
10,000 < CF -	Fuertemente contaminada	Aguas superficiales con fuerte contaminación bacteriológica. Alteración severa

Fuente: CONAGUA 2019.

CUADRO III. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS RANGOS EN EL ÍNDICE DE CALIDAD DE LEÓN PARA USO POTABLE Y AGRÍCOLA.*

Uso			
Fuente de agua potable		Agricultura	
90-100 E	No requiere tratamiento para consumo (Desinfección)	90-100 E	No requiere tratamiento para riego
80-90 A	Tratamiento primario y desinfección	70-90 A	Purificación menor para cultivos que requieran alta calidad de agua
70-80 LC	Tratamiento secundario y desinfección	50-70 LC	Utilizable en mayoría de cultivos (algodón, soya, trigo)
50-70 C	Tratamiento terciario y desinfección	30-50 C	Tratamiento requerido para la mayoría de los cultivos
40-50 FC	Dudoso incluso con tratamiento	20-30 FC	Uso sólo en cultivos muy resistentes
0-40 EC	Inaceptable para consumo	0-20 EC	Inaceptable para riego

Fuente: León Vizcaino 1974.

* El código de colores se agregó al índice de León para comunicar visualmente la categoría.

Con la finalidad de tener un análisis más sensible de la calidad del agua para los usos potable y agrícola, se utilizó la metodología del Índice Canadiense de Calidad de Agua, siguiendo las guías canadienses para la protección de la vida acuática (CCME, por sus siglas en inglés), debido a que en su metodología de cálculo considera como criterio, el número de veces que se exceden los límites máximos permisibles establecidos por normas para un determinado uso. Por lo que el índice es mucho más sensible y representativo ante los resultados de los muestreos y sus correspondientes determinaciones analíticas que los excedan. Se consideraron los límites máximos permisibles de las normas para uso y consumo humano NOM-127-SSA1-1994 (SSA 2000) NOM-041-SSA1-1993 (SSA 1994) y la norma para riego agrícola CE-CCA-001/89 (Semarnat 1989).

La fórmula (Ecuación 2) para calcular el índice de calidad del agua es la siguiente (CCME 2017):

$$CCMEWQI = 100 - \left(\frac{\sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1.732} \right) \quad (2)$$

Donde se incorporan 3 elementos:

- Alcance (F1): porcentaje de parámetros que exceden la norma.
- Frecuencia (F2): porcentaje de pruebas individuales de cada parámetro que excede la norma.
- Amplitud (F3): magnitud en la que excede la norma cada parámetro que no cumple.

El ICA de la CCME se lleva a una escala adimensional entre 0 y 100, en donde el 0 indica pésima calidad de agua, y el 100 calidad de agua óptima. Estos números se dividen en cinco categorías descriptivas para simplificar su presentación (**Cuadro IV**).

El Índice de Calidad del Agua (ICA) canadiense fue seleccionado por ser el más completo y flexible entre los índices disponibles en diferentes países (Hurley et al. 2012). Se calcularon los valores del ICA canadiense para dos periodos de tiempo distintos. El primer período abarcó de 2015 a 2018, mientras que el segundo se centró únicamente en 2018.

De acuerdo con el CCME (2017), es necesario utilizar al menos cuatro fechas de muestreo dentro de un mismo período para calcular el índice de calidad del agua. Cabe destacar que, para obtener el ICA canadiense en 2018, se emplearon los cuatro muestreos reportados por la CONAGUA en ese año. La razón detrás de esto fue comparar los resultados de 2018 con la tendencia histórica del periodo 2015-2018. Para llevar a cabo esta comparación, se examinó si había diferencias significativas entre la tendencia del periodo histórico (2015-2018) y los resultados del año 2018.

El mapa para representar la calidad del agua fue generado con el sistema de información geográfica de código abierto QGIS (versión 3.14.0) con base en los ICA de cada estación de monitoreo. El mapa permite visualizar los sitios de monitoreo de acuerdo con el grado de contaminación representado en colores.

CUADRO IV. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS CATEGORÍAS EN EL ÍNDICE DEL CCME.*

Categoría	Valor	Descripción
Excelente	95-100	La calidad del agua tiene condiciones muy cercanas a niveles naturales o deseables.
Buena	80-94	La calidad del agua se encuentra con un grado menor de deterioro, las condiciones rara vez se apartan de los niveles naturales o deseables.
Aceptable	65-79	La calidad del agua en ocasiones se ve amenazada o deteriorada; las condiciones a veces se apartan de los niveles naturales o deseables.
Marginal	45-64	La calidad del agua se ve frecuentemente amenazada o deteriorada; las condiciones a menudo se apartan de los niveles naturales o deseables
Pobre	0-44	La calidad del agua casi siempre se ve amenazada o deteriorada; las condiciones generalmente se apartan de los niveles naturales o deseables.

Fuente: CCME 2017.

* El código de colores se agregó al índice del CCME para comunicar visualmente la categoría.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calidad microbiológica

Los resultados de la puntuación que clasifica la calidad microbiológica en los años 2012-2018 para cada OP, se presentan en el **cuadro V**. Asimismo, la **figura 2** presenta los sitios donde se obtuvo la calidad microbiológica más baja. Estos corresponden al sitio DLCHI328 ubicado en el OP Cuauhtémoc (12098 NMP/100 mL) al sur de ciudad Cuauhtémoc, el sitio DLSAN2286 en el OP El Tokio (11 199 NMP/100 mL) y el sitio DLSAN2283 (17 329 NMP/100 mL). En los tres sitios el agua se cataloga como “fuertemente contaminada”, lo cual es una señal de alerta para los habitantes de las poblaciones, debido a que el agua de estos lugares no cumple con los requerimientos para consumo humano. En los sitios OCPBC4318, OCPBC4311 en el OP Guadalupe el agua se cataloga como “contaminada”, indicando que tampoco se cumplen con los requerimientos necesarios. El OP Mapimí presentó la puntuación “excelente” (5-20 NMP/100 mL), sin embargo, esto no es representativo ya que sólo se tiene un sitio de monitoreo.

Calidad física y química

Uso de consumo humano

En el **cuadro VI** se presentan los resultados obtenidos por los índices de León y el CCME para uso de consumo humano en los años 2015-2018. Se observa que la puntuación del índice de León en todos los OP varió entre 50 a 82 (contaminada, levemente contaminada). Ello indica que, para destinarse al uso potable, se requiere de un tratamiento secundario o

terciario para la remoción de agentes biológicos y constituyentes químicos nocivos a la salud y con ello darle la calidad de potable.

La puntuación para el índice de la CCME en lo referente al agua para uso potable varió entre 25 a 38 calificando la calidad del agua como “pobre” en todos los sitios de los OP. Lo cual indica que en todos los poblados se requiere un proceso de potabilización para darle la calidad requerida al agua de consumo humano.

Uso de riego agrícola

Los resultados de la aplicación de los índices para el uso agrícola en los años 2015-2018, se presentan en el **cuadro VII**, observando que el agua puede ser utilizada en la mayoría de los cultivos. Sin embargo, en algunos sitios (DLCHI316, DLCHI317, DLCHI318, DLCOA492, DLCOA493, DLCOA473) el agua requiere un tratamiento para poderse utilizar en el riego de cultivos más delicados que requieran mejor calidad de agua, como en el caso del aguacate (*Persea americana*) y frijol (*Phaseolus vulgaris*), sensibles al sodio intercambiable (Cisneros y Saucedo 2016).

La clasificación obtenida por el índice CCME, para uso agrícola, ubica la calidad del agua en un amplio rango de “marginal” a “excelente” (53 a 100) indicando que el agua se ve frecuentemente amenazada y con altos niveles de deterioro en algunos sitios, variando hasta encontrarse en condiciones muy cercanas a niveles naturales o deseables.

El sitio con peor calidad, ubicado en Zacatecas (DLZAC2644), presentó una puntuación de 44 calificando el agua con calidad “pobre” (**Cuadro VII**). Ello debido a las altas cantidades de As, que sobrepasaron los límites para riego agrícola de 0.1 mg/L. Dado

CUADRO V. CALIDAD MICROBIOLÓGICA DEL AGUA DE ACUERDO CON LA RED NACIONAL DE MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA COLIFORMES FECALES (NMP/100ML) DE TODOS LOS OP EN LOS AÑOS 2012-2018.

OP	CLAVE SITIO	Coliformes fecales (NMP/100mL)		Clasificación		
		Escenario con valores		Escenario con valores		
		Media	Altos	Media	Altos	
Guadalupe	OCPBC4285	36.2	460	Excelente	Aceptable	
	OCPBC4318	618.3	2400	Aceptable	Contaminada	
	OCPBC4317, OCPBC4316, OCPBC4310		Excelente			
	OCPBC4311	607.0	2400	Aceptable	Contaminada	
Cuauhtémoc	DLCHI317, DLCHI318		Excelente			
	DLCHI328	13587.8	24196	Fuertemente Contaminada		
Mapimí	DLCHI400		Excelente			
El Tokio	DLCOA492, DLCOA493, DLCOA452, DLCOA443, DLCOA471, DLCOA472, DLCOA477, DLCOA430, DLCOA473, DLCOA440, OCRBR5109M1		Excelente			
El Tokio 2013-2018	DLCOA500	71.5	299	Excelente	Aceptable	
	DLCOA492, DLCOA493, DLCOA452, DLCOA443, DLCOA471, DLCOA472, DLCOA477, DLCOA430, DLCOA473, DLCOA440, OCRBR5109M1, DLSAN2282		Excelente			
	DLZAC2644	56.9	216	Excelente	Aceptable	
	DLSAN2283	2262.6	17329	Contaminada	Fuertemente Contaminada	
	DLSAN2284	43.5	218	Excelente	Aceptable	
	DLSAN2286	3723.3	11199	Contaminada	Fuertemente Contaminada	
	DLZAC2645	18.3	110	Excelente	Buena Calidad	
El Tokio 2014-2018	DLCOA500	94.7	299	Excelente	Aceptable	
	DLCOA492, DLCOA493, DLCOA452, DLCOA443, DLCOA471, DLCOA472, DLCOA477, DLCOA474, DLCOA506, DLCOA430, DLCOA473, DLCOA440, OCRBR5109M1, DLSAN2282, DLSAN2285M1, DLSAN5302		Excelente			
	DLZAC2644	75.2	216	Excelente	Aceptable	
	DLZAC2645	23.7	110	Excelente	Buena Calidad	
	DLSAN2283	128.2	520	Buena Calidad	Aceptable	
	DLSAN2284	55.8	218	Excelente	Aceptable	
	DLSAN2286	3539.2	11199	Contaminada	Fuertemente Contaminada	
	DLSAN5298	67.7	239	Excelente	Aceptable	
DLSAN5306	76.5	345	Excelente	Aceptable		

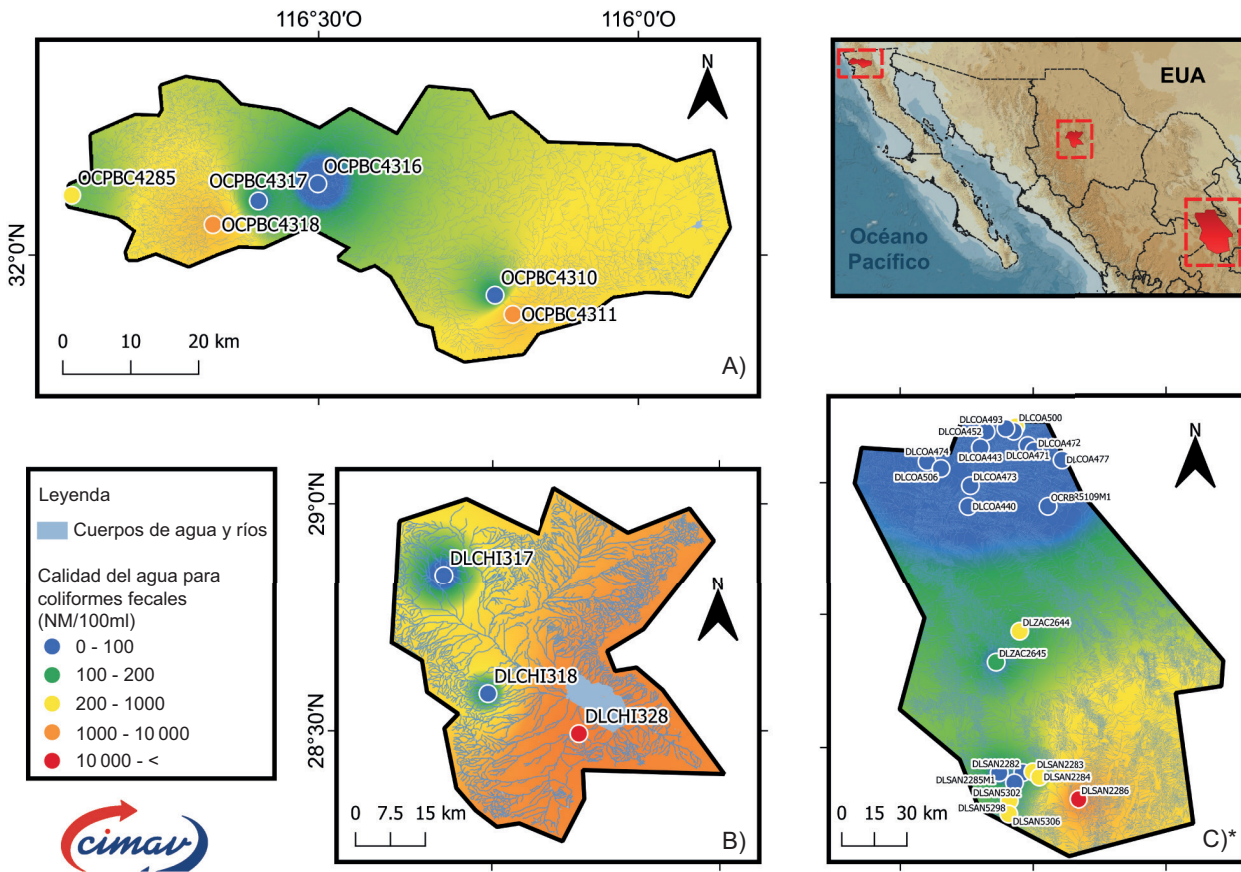


Fig. 2. Calidad microbiológica del agua considerando los valores más altos de los OP A) OP Guadalupe, B) OP Cuauhtémoc y C) OP El Tokio en los años 2012-2018. Fuente: Creación propia con base en QGIS.

*Se tomaron en cuenta los años 2014-2018 para el OP El Tokio debido a que en este periodo hay datos de un mayor número de estaciones de monitoreo.

que el agua de este sitio puede ser usada por los habitantes para consumo humano, es altamente recomendable llevar a cabo un monitoreo extensivo, así como implementar los sistemas de tratamiento requeridos para la remoción de contaminantes del agua debido a los efectos nocivos y problemas que se pudiesen generar en la salud. Algunos sitios como OCPBC4316, en Guadalupe; DLCHI317, DLCHI318, en Cuauhtémoc y DLCOA452, DLCOA474, DLCOA506, DLCOA473 y DLSAN2285M1, en El Tokio, sólo sobrepasaron los límites de fluoruros (1 mg/L).

El código de colores implementado en el ICA CCME ayuda a diferenciar qué tan contaminados están los sitios. El color rojo indica calidad del agua pobre, el único sitio con esta clasificación para uso de riego agrícola fue DLZAC2644 en El Tokio (Cuadro VII). El color naranja indica una calidad marginal y sólo tres sitios la obtuvieron. El color amarillo indica

calidad aceptable, 12 sitios obtuvieron esta clasificación. El color verde indica una buena calidad, diez sitios cuentan con ella. Finalmente, el color azul indica una calidad excelente, sólo tres sitios la tienen.

CONCLUSIONES

La calidad del agua, en lo referente al uso para consumo humano, en todos los OP, obtuvo una calificación entre 22 y 38, clasificando el agua de “pobre” calidad, lo cual implica que requiere ser potabilizada.

La calidad del agua para uso de riego agrícola fue clasificada entre “marginal a excelente” (entre 53 y 100) y puede ser utilizada en la mayoría de los cultivos. El único sitio que sale de este rango es el sitio DLZAC2644 con un ICA que califica el

CUADRO VI. CALIDAD DEL AGUA DE TODOS LOS OP DE ACUERDO CON LOS ÍNDICES DE CALIDAD DE LEÓN Y CCME PARA USO DE CONSUMO HUMANO EN LOS AÑOS 2015-2018.

OP	CLAVE SITIzO	Poblado cercano	Índice de calidad para uso y consumo humano	
			León	CCME
Guadalupe	OCPBC4318	Ejido el Porvenir	52	25
	OCPBC4317	Valle de Guadalupe	62	25
	OCPBC4316	Valle de Guadalupe	63	31
	OCPBC4310	Real del Castillo Nuevo	69	35
	OCPBC4311	Puerta trampa	53	33
Cuauhtémoc	DLCHI316	Bachíniva	76	37
	DLCHI317	Porvenir de Bachíniva	79	37
	DLCHI318	Campo 5, Campo 6 ^a	80	38
Mapimí	DLCHI400	Laguna de Palomas (Carrillo)	64	30
El Tokio	DLCOA500	Saltillo	59	30
	DLCOA492	Saltillo	73	38
	DLCOA493	Saltillo	73	30
	DLCOA452	Saltillo	64	31
	DLCOA443	Saltillo	67	34
	DLCOA471	Fracc. Campestre La Montaña, Karibú	67	31
	DLCOA472	Pinares de Rancho Viejo	70	37
	DLCOA477	Tierras Prietas	69	SD*
	DLCOA474	El Porvenir, El Derramadero	70	34
	DLCOA506	San Juan de la Vaquería	68	35
	DLCOA430	San Juan de la Vaquería	68	35
	DLCOA473	Agua Nevada	71	37
	DLCOA440	Las Colonias	69	37
	OCRBR5109M1	Rancho Colonia Las Antonias, San Juan del Prado	68	37
	DLZAC2644	El Salvador	55	22
	DLZAC2645	Tanque Nuevo	61	34
	DLSAN2282	San Juan de Vanegas	65	33
	DLSAN2283	El Cuijal	67	38
	DLSAN2284	San Isidro	65	35
	DLSAN2285M1	Vanegas	65	37
	DLSAN2286	Los Pocitos	58	34
	DLSAN5302	San Juan de Vanegas	66	38
	DLSAN5298	La Palma	65	37
	DLSAN5306	Los Catorce	70	37

*SD (Sin datos) No se tienen datos por parte de las estaciones de monitoreo de la CONAGUA.

agua como “pobre”, presentando contaminación por arsénico en concentraciones altas inclusive para el riego de cultivos. Lo cual indica que el agua del sitio, está altamente contaminada, y se deben de tomar las precauciones y medidas de remediación en función de los usos a los cuales vaya a ser destinada.

Es indispensable que se sigan monitoreando sistemáticamente los diferentes cuerpos de agua para conocer su calidad a través del tiempo. Asimismo, es de alta importancia que la población conozca la calidad del agua de que dispone, principalmente en el caso del consumo humano, para que pueda tomar las acciones de prevención que

limiten la exposición a los contaminantes, sea de forma individual (cada familia) o bien a nivel de la comunidad.

Es altamente deseable que se cuente con un mayor número de estaciones de monitoreo sistemático, principalmente en las fuentes de abastecimiento público a las comunidades. La información sobre la calidad del agua debe de ser pública y de fácil acceso para que la población pueda conocer la calidad del agua con el fin de tomar precauciones y acciones necesarias, de modo que las autoridades encargadas del suministro de agua tomen las mejores decisiones para proteger a la población.

CUADRO VII. CALIDAD DEL AGUA DE LOS OP DE ACUERDO CON LOS ÍNDICES DE CALIDAD DE LEÓN Y CCME PARA RIEGO AGRÍCOLA EN LOS AÑOS 2015-2018.

OP	CLAVE SITIO	Poblado cercano	Índice de calidad para riego agrícola	
			León	CCME
Guadalupe	OCPBC4318	Ejido el Porvenir	52	53
	OCPBC4317	Valle de Guadalupe	62	63
	OCPBC4316	Valle de Guadalupe	63	70
	OCPBC4310	Real del Castillo Nuevo	69	100
	OCPBC4311	Puerta trampa	53	68
Cuauhtémoc	DLCHI316	Bachíniva	76	100
	DLCHI317	Porvenir de Bachíniva	79	87
	DLCHI318	Campo 5, Campo 6 ^a	80	91
Mapimí	DLCHI400	Laguna de Palomas (Carrillo)	64	56
El Tokio	DLCOA500	Saltillo	59	73
	DLCOA492	Saltillo	73	86
	DLCOA493	Saltillo	73	81
	DLCOA452	Saltillo	64	74
	DLCOA443	Saltillo	67	85
	DLCOA471	Fracc Campestre La Montaña, Karibú	67	80
	DLCOA472	Pinares de Rancho Viejo	70	80
	DLCOA477	Tierras Prietas	69	71
	DLCOA474	El Porvenir, El Derramadero	70	82
	DLCOA506	San Juan de la Vaquería	68	87
	DLCOA430	San Juan de la Vaquería	68	100
	DLCOA473	Agua Nevada	71	71
	DLCOA440	Las Colonias	69	86
	OCRBR5109M1	Rancho Colonia Las Antonias, San Juan del Prado	68	82
	DLZAC2644	El Salvador	55	44
	DLZAC2645	Tanque Nuevo	61	73
	DLSAN2282	San Juan de Vanegas	65	79
	DLSAN2283	El Cuijal	67	81
	DLSAN2284	San Isidro	65	75
	DLSAN2285M1	Vanegas	65	70
	DLSAN2286	Los Pocitos	58	SD*
	DLSAN5302	San Juan de Vanegas	66	SD*
	DLSAN5298	La Palma	65	SD*
DLSAN5306	Los Catorce	70	SD*	

*SD (Sin Datos). No se pudo calcular el ICA debido a la falta de datos por parte de las estaciones de monitoreo de CONAGUA.

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto CONACyT PN-5036 Titulado: "Observatorio participativo para la protección de la diversidad cultural y biótica de zonas áridas", cuya responsable técnica es la Dra. Elisabeth Huber Sannwald, en el cual se participó por la colaboración de la Dra. María Teresa Alarcón Herrera, del Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. (CIMAV). Se agradece la participación de los técnicos del Laboratorio de Medio Ambiente

del CIMAV subsede Durango, M. en C. Luis Arturo Torres Castañón y M. en C. Rafael Irigoyen Campuzano.

REFERENCIAS

Ali H., Khan E. y Sajad M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals-Concepts and applications. *Chemosphere* 91 (7), pp. 869-881. <http://doi:10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>

- CCME (2017). CCME Water Quality Index user's manual 2017 Update. Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. Canadian Council of Ministers of the Environment. Winnipeg, Manitoba, Canadá, 23 pp.
- Cisneros O. y Saucedo H. (2016). Reúso de aguas residuales en la agricultura. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, México, 170 pp.
- CONAGUA (2000). Índice de Calidad del Agua. Comisión Nacional del Agua, México [en línea]. http://www.paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas_2000/estadisticas_ambientales_2000/03_Dimension_Ambiental/03_02_Agua/III.2.2/RecuadroIII.2.2.2.pdf 1/02/2022
- CONAGUA (2019). Escalas de clasificación de la calidad del agua. Comisión Nacional del Agua, México [en línea]. <https://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=calidadAgua&ver=mapa&o=1&n=nacional> 21/02/2022
- CONAGUA (2021). Calidad del agua en México. Comisión Nacional del Agua, México [en línea]. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua> 21/02/2022
- Devi M. (2009). Water quality indexing for predicting variation of water quality over time. *University of Mauritius Research Journal* 15 (1), 186-199. <https://www.ajol.info/index.php/umrj/article/view/131034>
- Fernández-Parada N. J. y Solano-Ortega F. (2005). Índices de calidad (ICAs) de contaminación (ICOs) del agua de importancia mundial. En: *Índices de calidad y de contaminación del agua*. (N.J. Fernandez Parada y F. Solano Ortega, Eds.) Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, pp. 43-113.
- Hurley T., Sadiq R. y Mazumder A. (2012). Adaptation and evaluation of the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) for use as an effective tool to characterize drinking source water quality. *Water Research* 46 (11), 3544-3552. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.03.061>
- Kachroud M., Trolard F., Kefi M., Jebari S. y Bourrié G. (2019). Water quality indices: Challenges and application limits in the literature. *Water* 11 (2), 1-26. <https://doi.org/10.3390/w11020361>
- León-Vizcaíno L. F. (1974). Índices de calidad del agua (ICA), forma de estimarlos y aplicación en la cuenca Lerma-Chapala. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Cuernavaca, Morelos, México, 34 pp.
- OMS (2022). Agua para consumo humano. Organización Mundial de la Salud [en línea]. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water> 21/01/2022
- PS-OMS (2017). Guías para la calidad del agua de consumo humano. Cuarta edición que incorpora la primera adenda. Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud. Ginebra, Suiza, 631 pp.
- OPS (2022). Saneamiento básico: agua segura, disposición de excretas y manejo de la basura: cuadernillo para capacitaciones con enfoque intercultural en áreas rurales. Organización Panamericana de la Salud [en línea]. <https://iris.paho.org/handle/10665.2/5601401/02/2022>
- RISZA (2017). Informe final Diciembre 2017. Red Internacional para la Sostenibilidad de las Zonas Áridas [en línea]. <https://risza.mx/publicacionesred> 01/02/2022
- RISZA (2018). Observando juntos al desierto desde múltiples miradas. Evento Internacional. Red Internacional para la Sostenibilidad de las Zonas Áridas [en línea]. <https://risza.mx/publicacionesred> 01/02/2022
- Samboni-Ruiz N. E., Carvajal-Escobar Y. y Escobar J. C. (2007). A review of physical-chemical parameters as water quality and contamination indicators. *Ingeniería e Investigación* 27 (3), 172-181. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v27n3.14858>
- SEMARNART (1989). Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Diario Oficial de la Federación, México, 13 de diciembre de 1989.
- SSA (1994). Norma Oficial Mexicana NOM-041-SSA1-1993. Bienes y servicios. Agua purificada envasada. Secretaría de Salud. Diario Oficial de la Federación, México, 16 de mayo de 1994.
- SSA (2000). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Secretaría de Salud. Diario Oficial de la Federación, México, 22 de noviembre de 2000.
- Valcarcel L., Alberro N. y Frías D. (2009). El índice de calidad de agua como herramienta para la gestión de los recursos hídricos. *Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo* 10 (18) 1-5.
- WHO (2017). Guidelines for drinking water quality. 4a ed. World Health Organization, Ginebra, Suiza, 631 pp.