

Análisis de la calidad del agua de manantial: caso de estudio en el Estado de México

Analysis of Spring Water Quality: A Case Study in the State of Mexico

Ana Elisa Alcántara Valladolid¹, Juan Manuel Esquivel Martínez^{2*}, Carolina Alvarez Bastida³, Carlos Roberto Fonseca Ortiz¹, José Alfredo Flores Ronces⁴

¹Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) de la Universidad Autónoma del Estado de México, Carretera Toluca-Atlacomulco, km 14.5, Toluca, México, C.P. 50295. aealcantarav@uaemex.mx, crfonsecao@uaemex.mx, <https://orcid.org/0000-0002-5677-0739>, <https://orcid.org/0000-0002-3377-6564>

²Secihti - Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) de la Universidad Autónoma del Estado de México, Carretera Toluca-Atlacomulco, km 14.5, Toluca, México, C.P. 50295. jmesquivel@secihti.mx, <https://orcid.org/0000-0003-1864-4501>

³Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro Coatepec s/n Ciudad Universitaria, Toluca de Lerdo, México, C.P. 50110. calvarezb@uaemex.mx, <https://orcid.org/0000-0002-4041-8124>

⁴Facultad de Ecología Marina de la Universidad Autónoma de Guerrero, Gran Vía Tropical 20, Las Playas, Acapulco de Juárez, C.P. 39390. ron_alf23@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0186-4743>

*Autor(a) de Correspondencia

Recibido: 18/09/2025. Aceptado: 25/11/2026. Publicado: 05/02/2026.

Cómo citar este artículo: Alcántara Valladolid, A. E., Esquivel Martínez, J. M., Alvarez Bastida, C., Fonseca Ortiz, C. R. y Flores Ronces, J. A. (2026). Análisis de la calidad del agua de manantial: caso de estudio en el Estado de México. *Geografía Aplicada*, 2(1), 112-135.

Resumen

Los manantiales desempeñan un papel fundamental en el abastecimiento de agua para comunidades urbanas y rurales, además son clave para la conservación y el uso sostenible de los cuerpos y ecosistemas acuáticos. El objetivo de este estudio fue analizar la calidad del agua de manantial utilizada por la población tanto para el consumo humano como para actividades domésticas, con el fin de promover su uso sostenible en una zona cercana a la cabecera municipal de Almoloya de Juárez, Estado de México. La calidad del agua del manantial se estableció mediante la determinación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en dos manantiales ubicados en el área de estudio (ojo de agua y cabecera). Las determinaciones se realizaron conforme a los procedimientos establecidos por la normatividad oficial mexicana y se consideró los siguientes parámetros: pH, sólidos totales (ST), sólidos disueltos totales (SDT), sólidos suspendidos totales (SST), turbidez, color, conductividad eléctrica, dureza total, alcalinidad total, cloruros (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}), nitratos (N-NO_3^-), nitritos (N-NO_2^-), fosfatos (PO_4^{3-}), coliformes fecales (CF) y coliformes totales (CT). La interpretación se realizó con base en la Norma NOM-127-SSA1-2021, la cual establece los límites máximos permisibles para el uso y consumo humano. El único parámetro que excedió los límites fue el de coliformes totales en ambas fuentes de abastecimiento, mientras que el resto se mantuvo dentro de los rangos permitidos. Finalmente, la investigación ofrece información valiosa sobre la calidad del agua de manantial.

Palabras clave: calidad del agua, manantial, agua de consumo humano.

Abstract

Springs play a fundamental role in providing water to urban and rural communities and are key to the conservation and sustainable use of aquatic bodies and ecosystems. The objective of this study was to analyze the quality of spring water used by the population for both human consumption and domestic activities, with the goal of promoting its sustainable use in an area near the municipal seat of Almoloya de Juárez, State of Mexico. The quality of the spring water was established by measuring physicochemical and microbiological parameters in two springs located in the study area (ojo de agua and cabecera). The determinations were carried out in accordance with the procedures established by Mexican official regulations and the following parameters were considered: pH, total solids (TS), total dissolved solids (TDS), total suspended solids (TSS), turbidity, color, electrical conductivity, total hardness, total alkalinity, chlorides (Cl^-), sulfates (SO_4^{2-}), nitrates (N-NO_3^-), nitrites (N-NO_2^-), phosphates (PO_4^{3-}), fecal coliforms (CF) and total coliforms (CT). The interpretation was based on Standard NOM-127-SSA1-2021, which establishes the maximum permissible limits for human use and consumption. The only parameter that exceeded the limits was total coliforms in both supply sources, while the rest remained within the permitted ranges. Finally, the research offers valuable information on the quality of the spring water.

Keywords: water quality, spring, drinking water

1. Introducción

Los manantiales de agua dulce se distribuyen ampliamente en los territorios y suministran agua vital para fines de consumo humano, doméstico, agrícola e industrial, personas en todo el mundo, especialmente a los territorios rurales; además, el agua de manantial es considerada un recurso primordial para el desarrollo sostenible (Cantú, 2025; Colín *et al.*, 2025; Bhat *et al.*, 2022; Moldavan *et al.*, 2020). Ante este escenario y de acuerdo con el Objetivo 6 de Desarrollo Sostenible (ODS) es necesario analizar fuentes de agua consideradas esenciales para el abastecimiento humano, con el fin de garantizar la

disponibilidad y acceso al agua de consumo humano, el saneamiento, y gestión sostenible del recurso para la población hacia el 2030 (Prince y Espinoza, 2021).

Los manantiales cumplen con una función importante para el consumo humano, preservación de ecosistemas, así como ciclo hidrológico (López *et al.*, 2016; Rosca *et al.*, 2020). Sin embargo, la calidad del agua en los manantiales se ve amenazada por factores como: el uso intensivo, el cambio climático, y mayormente por contaminación antropogénica (proliferación de innumerables focos de contaminación) y mínimamente por contaminación natural (fuentes geogénicas y calidad del agua de recarga) (Davraz y Batur, 2021; Rosca *et al.*, 2020). Por lo tanto, conocer las características hidrogeoquímicas del agua de manantial es vital para la determinación de su uso y la gestión adecuada.

Ante la posible contaminación del agua de manantial, los ecosistemas acuáticos podrían estar en peligro y la población de las zonas rurales es más propensa a consumir agua no segura, lo que podría reflejar un impacto negativo en la salud humana a través de enfermedades hídricas como: diarrea, colera, salmonelosis, disentería, fiebre tifoidea, abortos espontáneos, síndrome del niño azul o metahemoglobinemia, cáncer, fluorosis dental y esquelética, osteoporosis, problemas de la glándula tiroides, enfermedades cardiovasculares, renales y pulmonares (Ather *et al.*, 2022; El Mountassir *et al.*, 2022).

De acuerdo con Núñez (2024), la contaminación del agua en México se considera un problema grave causado por descargas urbanas, industriales y agrícolas, sin tratamiento previo debido a escasas plantas de tratamiento de aguas residuales en operación. Ante este escenario, cuando las aguas superficiales son insuficientes o están muy contaminadas, el agua subterránea se convierte en la principal fuente de abastecimiento en muchas áreas urbanas y rurales, y en algunos casos puede ser la única fuente de abastecimiento.

En la última década se han presentado incrementos y decrementos en relación con los volúmenes concesionados para los usos consuntivos. En México, el 60.1% del agua de uso

y consumo se abastece de fuentes superficiales y el 39.9% corresponde a fuentes subterráneas. Ante este escenario, en 2022, en relación con el uso de fuentes subterráneas, agrícola y abastecimiento público representaban el 92% del volumen concesionado a nivel nacional (CONAGUA-SEMARNAT, 2024). Por tal motivo, disponer de agua subterránea en cantidad y calidad suficiente para la población se vuelve un tema necesario, ya que es un recurso esencial utilizado para el consumo humano y uso doméstico (Gobierno de México, 2025). Además, el estado de su calidad puede incidir positiva o negativamente en la salud del ser humano.

El agua subterránea puede ser obtenida a través de pozos, norias y manantiales. En diversos territorios del Estado de México se utiliza el agua de manantial debido a su excelente calidad y fácil acceso. El objetivo fue analizar la calidad del agua de manantial con vista a facilitar su uso sostenible, considerando como caso de estudio a dos manantiales situados en las cercanías del municipio de Almoloya de Juárez, México.

2. Metodología

El estudio de calidad de agua en manantiales es fundamental para garantizar el uso adecuado, minimizando las posibles consecuencias en su uso y consumo humano. En la tabla 1, se presentan los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y su método correspondiente avalado por la norma NMX-AA-116-SCFI-2001 (DOF,2001). En la tabla 1, se presenta el proceso metodológico utilizado para la determinación de cada parámetro.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua.

Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos	Norma mexicana/método
Acidez	NMX-AA-036-SCFI-2001
Alcalinidad	
Cloruros (Cl ⁻)	NMX-AA-073-SCFI-2011
Color	NMX-AA-045-SCFI-2021
Conductividad Eléctrica (CE)	NMX-AA-093-SCFI-2000
Coliformes Totales (CT)	NMX-AA-42-1987
Coliformes Fecales (CF)	
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Ion selectivo

Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Método HACH
Dureza Total	NMX-AA-072-SCFI-2001
Fluoruros (F ⁻)	Ion selectivo
Fosfatos (PO ₄ ³⁻)	NMX-AA-029-SCFI-2001
Metales (Na, Mg, K, Cu, Fe, Zn, Cr, Pb)	NMX-AA-051-SCFI-2001
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	Ion selectivo
Nitritos (N-NO ₂ ⁻)	NMX-AA-079-SCFI-2001
Nitrógeno amoniacal (N-NH ₃ ⁻)	Ion selectivo
Oxígeno Disuelto (OD)	Método HACH
pH	NMX-AA-008-SCFI-2000
Sólidos Disueltos Totales (SDT) Sólidos Suspendidos Totales (SST) Sólidos Totales (STT)	NMX-AA-034-SCFI-2015
Sólidos Sedimentables	NMX-AA-004-SCFI-2000
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	NMX-AA-039-SCFI-2001
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	NMX-AA-074-SCFI-1981
Temperatura	NMX-AA-007-SCFI-2000
Turbidez	NMX-AA-038-SCFI-2001

Fuente: elaboración propia a partir de consultar diversas normas mexicanas (DOF, 2021).

2.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza de manera próxima a la cabecera municipal del municipio de Almoloya de Juárez, Estado de México (Figura 1). Esta ocupa una superficie aproximada de 9.7 km². El municipio de Almoloya de Juárez tiene innumerables manantiales, por ello los habitantes dependen del agua de estos cuerpos de agua para el consumo humano y actividades domésticas. En el área de estudio se analizaron dos manantiales de tipo fríos (ojo de agua y cabecera) cuyas características se presentan en la tabla 2.

El manantial Ojo de Agua es el más relevante del municipio debido a la presencia del fenómeno de la “raya del agua”, asociado al efecto Marangoni (Wissink y Herlina, 2023), y a su papel en el abastecimiento de seis comunidades. Las comunidades que utilizan el agua del manantial Ojo de Agua son: Barrio la Cabecera primera sección, la Cabecera, la Cabecera tercera sección, Barrio de San Pedro, San Mateo Tlalchichilpan y Villa Almoloya de Juárez (Figura 1). Por otro lado, el manantial la Cabecera se utiliza como fuente alterna al manantial

ojo de agua, sobre todo cuando se presentan fallas eléctricas, fallas mecánicas, mayor demanda de recurso y por falta de recursos económicos.

Tabla 2. Coordenadas de los manantiales.

ID	Manantial	UTM X (m)	UTM Y (m)	Altitud (msnm)
1	Ojo de Agua	420235	2141142	2602
2	Cabecera	421320	2140060	2637

Fuente: elaboración propia (trabajo de campo).

El área de estudio se localiza dentro de la faja volcánica Transmexicana. En esta sobresalen tres unidades estratigráficas recientes del periodo Cuaternario con épocas del Pleistoceno al holoceno. A continuación, se presenta la descripción detallada de las formaciones (IFOMEGEM, 1994; Esquivel, 2015):

- Qal (aluvión): se caracteriza por la presencia de arena, limo y grava con interestratificación de ceniza volcánica, resultado de la actividad volcánica. Esta se localiza al noroeste del área de estudio y sobresale el manantial ID1.
- Qhv (derrames de lava): principalmente son de composición basáltica, dacítica y andesítica, con deposición de cineríticos además de rocas piroclásticas. Esta sobresale en la parte sur del área de estudio y en esta formación emana el manantial ID2.
- Qpla (sedimentos lacustres): incluyen una serie de conglomerados y rocas areniscas, así como limolitas semiconsolidadas, con interestratificaciones de capas de toba, pómez y diatomitas. Se puede observar esta formación en la parte noroeste.

Hidrogeológicamente, el espacio analizado se localiza en la porción noroeste del acuífero del Valle de Toluca (AVT) y se caracteriza por ser un área donde ocurre simultáneamente recarga y descarga del agua subterránea a través de manantiales. En el área de estudio se identifican dos tipos de unidades acuíferas: 1) unidad porosa (funciona como un acuífero libre) compuesta por depósitos de relleno clásticos no consolidados que rellenan el Valle de Toluca y en las estribaciones montañosa, además yace sobre unas tobas de baja permeabilidad (acuitardo) y 2) la unidad fracturada (funciona hidráulicamente como

acuífero confinado o semiconfinado) se localiza debajo de la unidad porosa y se relaciona con rocas volcánicas afectadas por tectonismo y con permeabilidad secundaria por fracturamiento (CONAGUA, 2024; Esquivel, 2022).

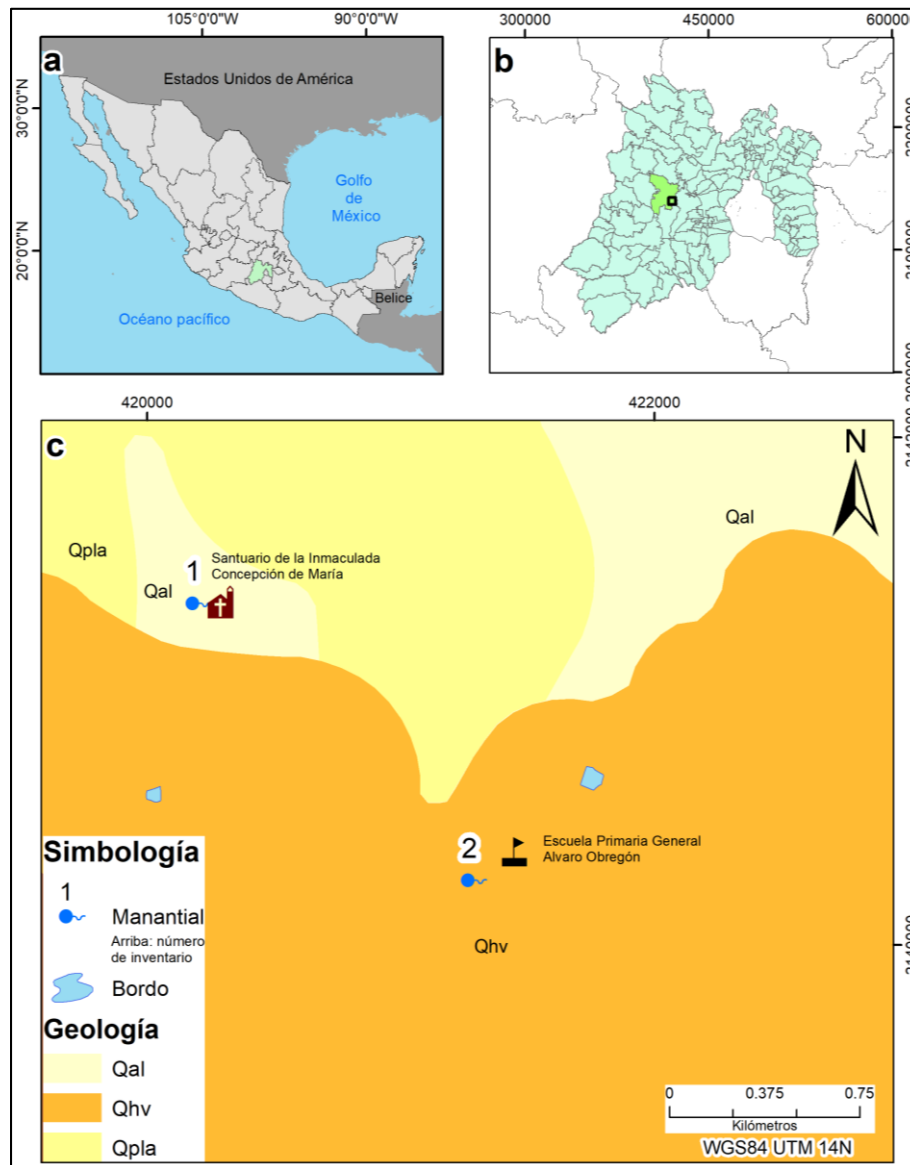


Figura 1. (a) Mapa de la ubicación geográfica, (b) Estado de México y municipio de Almoloya de Juárez, y (c) Geología y ubicación de los manantiales.

Fuente: elaboración propia con base en el marco geoestadístico del INEGI (2024) e IFOMEGEM (1994).

La unidad porosa está integrada por Qal (depósitos aluviales) y Qpla (depósitos lacustres), las cuales presentan poca de permeabilidad, lo que limita su aprovechamiento en la explotación del agua subterránea. Por el contrario, la unidad fracturada presenta una permeabilidad elevada y se conforma por Qhv (derrames de lava de composición basáltica y andesítica) considerada área de descarga en zonas bajas a través de manantiales (CNA, 2002b). Los manantiales analizados en este estudio emanan en el contacto entre las rocas más fracturadas del basalto con el basalto menos fracturado (Esquivel, 2008).

2.2. Materiales y métodos

2.2.1. Muestreo y técnicas de medición

En el año 2023 se llevó a cabo una única campaña de muestreo en dos manantiales seleccionados: el manantial Ojo de Agua y el manantial cabecera. En cada manantial se determinaron parámetros *in situ*: pH, temperatura y conductividad eléctrica, mediante un equipo multiparamétrico marca HANNA (HI 9126) previamente calibrado. Posteriormente, se recolectaron muestras para la determinación en laboratorio de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos (Figura 2), los cuales fueron: turbidez, color, sólidos totales (ST), sólidos disueltos totales (SDT), sólidos suspendidos (SS), alcalinidad, acidez, demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), dureza total (DT), cloruros (Cl⁻), nitratos (N-NO₃⁻), nitritos (N-NO₂⁻), nitrógeno amoniacal (N-NH₃⁻), fosfatos (PO₄³⁻), sulfatos (SO₄²⁻), sustancias activas al azul de metileno (SAAM). Además, se determinaron microbiológicos: coliformes fecales (CF) y coliformes totales (CT), considerando los protocolos de preservación y toma de muestra basados en la normatividad mexicana NOM-014-SSA1-1993 (DOF, 1993), para cada uno de los parámetros y su posterior análisis en el laboratorio.

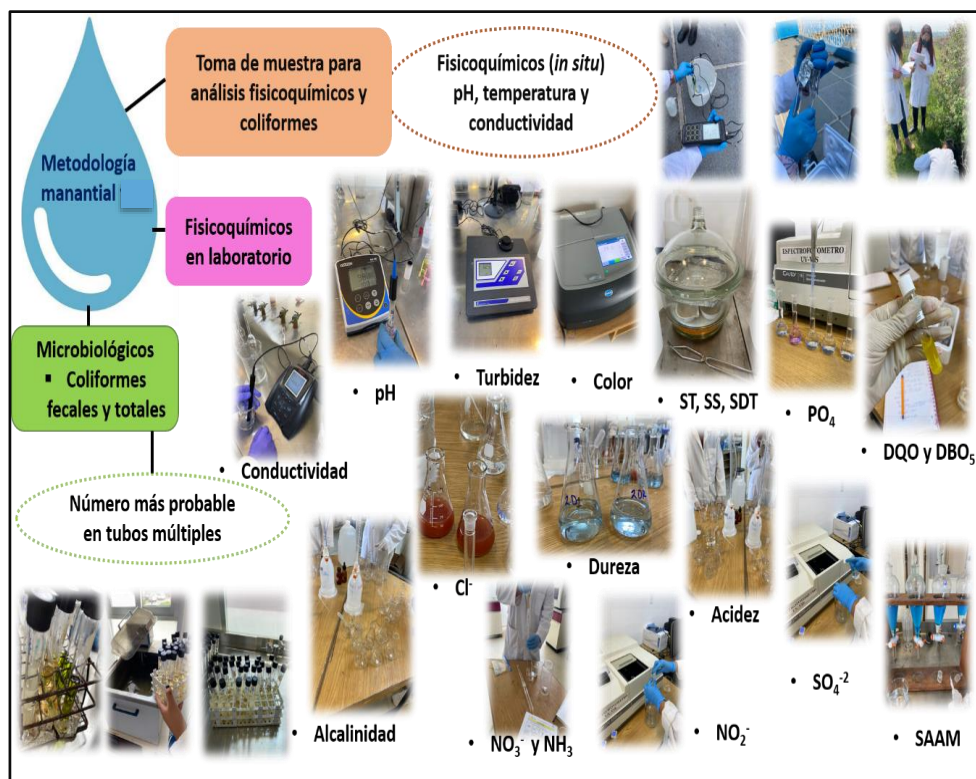


Figura 2. Parámetros físicoquímicos y microbiológicos.

Fuente: elaboración propia.

2.2.2. Parámetros físicoquímicos y microbiológicos

Los análisis físicoquímicos y microbiológicos se realizaron en el Laboratorio de Calidad del Agua del Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA), basados en la NOM-127-SSA1-2021 (DOF, 2021), que establece los límites máximos permisibles de los distintos parámetros para uso y consumo humano.

En laboratorio se realizó la caracterización de los parámetros, pH mediante el potenciómetro marca OAKTON modelo ION 700, conductividad eléctrica con un conductímetro marca Thermo Scientific modelo ORION STAR 212, la turbidez se determinó mediante un turbidímetro marca Scientific, Inc. modelo micro 100 turbidimeter, previamente calibrados con estándares de 0.2, 10 y 1000 UNT.

Los sólidos totales (ST), suspendidos (SS) y disueltos totales (SDT) fueron determinados en capsulas y crisoles de porcelana por métodos gravimétricos como marca la norma NMX-AA-034-SCFI-2015 (DOF, 2016a), por evaporación de la muestra en horno de calentamiento a temperatura de 105°C durante 3 h a sequedad.

La alcalinidad y acidez se analizaron de acuerdo con el procedimiento que marca la norma NMX-AA-036-SCFI-2001, dureza con la NMX-AA-072-SCFI-2001 y cloruros con la NMX-AA-073-SCFI-2001 mediante métodos volumétricos, la alcalinidad se determinó dentro de las primeras horas posteriores al muestreo utilizando H_2SO_4 , 0.02 N como titulante y fenolftaleína, verde de bromocresol y naranja de metilo como indicadores colorimétricos. Para la dureza se utilizó solución EDTA para titular, mientras que la acidez fue analizada mediante NaOH como titulante y fenolftaleína como indicador colorimétrico. Los cloruros (Cl^-), se analizaron utilizando nitrato de plata y como indicador colorímetro cromato de potasio según la NMX-AA-017-1985 (DOF, 2021).

A continuación, se enlistan los procedimientos colorimétricos empleados en la determinación de parámetros: demanda química de oxígeno (DQO), nitratos (N-NO_3^-), nitrógeno amoniacal (N-NH_3^-) se determinaron por método HACH avalado por la NMX-AA-116-SCFI-2001. La demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) por electrodo y soportado con la NMX-AA-116-SCFI-2001, nitritos (N-NO_2^-) mediante la NMX-AA-099-SCFI-2021, fosfatos (PO_4^{3-}) mediante la norma NMX-AA-029-SCFI-2001, sulfatos (SO_4^{2-}) con la NMX-AA-074-SCFI-2014 y sustancias activas al azul de metileno (SAAM) por medio de la NMX-AA-039-SCFI-2001, todos analizados por espectrofotometría de UV-VIS.

En tubos múltiples se analizaron mediante el método de número más probable, los coliformes fecales (CF) y totales (CT), en tubos múltiples y utilizando para la prueba presuntiva un medio de cultivo de caldo de lactosado y una resiembra con medio de cultivo de verde brillante y EC-medio, según la NMX-AA-042-SCFI-2015 (DOF, 2016b).

2.2.3. Diagrama Hydra MEDUSA

Los diagramas de equilibrio químico son una herramienta en química que se utiliza para interpretar el comportamiento de las especies químicas en solución de acuerdo con los diversos parámetros medidos en un muestreo. El software tiene una base de datos con resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos y de laboratorio para alimentar el paquete computacional denominado “MEDUSA” (Make Equilibrium Diagrams Using Sophisticated Algorithms). El software proporciona una interfaz amigable que permite la entrada detallada de datos sobre los compuestos y condiciones experimentales con lo que permite generar varios tipos de diagramas a partir de las concentraciones de las distintas especies en mmol/L (Ibarra, 2025).

3. Resultados

Las tablas 3, 4, 5, 6, 7 y 8 muestran los parámetros analizados tanto en campo como en laboratorio para esta investigación, los cuales fueron contrastados con los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-2021 (DOF, 2021).

Los valores de pH *in situ* oscilaron entre 6.2 a 6.5, indicando un carácter ligeramente ácido, mientras que la temperatura se mantuvo entre 16.8 y 18 °C. Por otra parte, el pH medido en el laboratorio presento valores entre 7.1 a 7.5. El incremento en los valores de pH obtenidos en laboratorio puede estar asociado con la temperatura del cuerpo de agua (Londoño y Gutiérrez, 2010). La conductividad eléctrica (*in situ*) presento valores de 233.3 a 568.5 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$, siendo la muestra ID2 (manantial Cabecera) con el valor más alto de conductividad y por lo tanto con más contenido de sales disueltas (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros transitorios.

Tipo de muestreo		<i>in situ</i>		Laboratorio	
ID	Manantial	pH	Temperatura (°C)	pH	Conductividad eléctrica $\mu\text{S}/\text{cm}^2$
1	Ojo de Agua	6.2	18	7.1	233.3
2	Cabecera	6.5	16.8	7.5	568.5
Límites permisibles NOM 127		6.5 - 8.5	-	6.5 - 8.5	-

Fuente: elaboración propia (trabajo de campo y resultados de laboratorio).

Los ST, SST y SDT en las muestras de manantial presentaron valores heterogéneos. En la muestra ID1 perteneciente al manantial ojo de agua, presentó un promedio de ST menor con un valor de 250 mg/L, mientras que la muestra ID2 presentó valores más altos de ST de 392 mg/L. Los SST en las dos muestras ID1 y ID2 registraron un valor de 1 mg/L en este parámetro, en cuanto SDT se observa que el manantial ID2 presentó valores más altos que ID1, con un índice de 391 mg/L y del manantial ID1 de 249 mg/L, lo que está directamente relacionado con una alta conductividad eléctrica de 568.5 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ (Tabla 4).

Tabla 4. Parámetros de la calidad del agua: ST, SST y SDT.

Tipo de muestreo		Laboratorio		
ID	Manantial	ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)
1	Ojo de agua	250	1	249
2	Cabecera	392	1	391
Límites permisibles NOM 127		-	-	1000

Fuente:elaboración propia (resultados de laboratorio).

En cuanto a la alcalinidad total (mg/L) los valores registrados para los manantiales van de 119.4 a 149.3 mg/L de CaCO_3 , la acidez en las muestras registró valores de manantial Ojo de agua con ID1 de 14.7 mg/L de CaCO_3 y para manantial cabecera ID2 de 16.6 mg/L de CaCO_3 . La dureza total en las muestras de agua con menor valor se registró la muestra ID1 con 87 mg/L de CaCO_3 y la muestra ID2 se registró con mayor dureza de 175 mg/L. Los cloruros presentaron valores que van de 14.3 a 35.3 mg/L, siendo la muestra ID2 la que registra una tendencia con el valor más altos en ciertos parámetros (Tabla 5). En cuanto a color las muestras no registraron ningún valor de color aparente (0 PtCo) (Chacón, 2017). Mientras que, la turbiedad presenta valores de 0.3 a 0.2 UNT respectivamente, siendo la muestra ID1 del manantial ojo de agua la que presentara el valor más alto. En relación con la DQO y DBO_5 , la presencia de DQO en las muestras analizadas fue nula, el valor de DBO_5 para los dos manantiales fue de 7.3 mg/L O_2 . Por lo tanto, el agua no presenta niveles altos de contaminación en este parámetro (Tabla 6).

Los compuestos nitrogenados (N-NO_3^- , N-NO_2^- y N-NH_3^-) en los tres parámetros no rebasan el límite permisible de la norma 127, sin embargo, en N-NH_3^- no se obtuvieron valores para los manantiales. Los sulfatos (SO_4^{2-}) oscilan en un rango de 7.3 a 24.4 mg/L SO_4^{2-} , siendo ID2 la muestra con más concentración; sin embargo, se encuentran las dos muestras muy por debajo del límite permisible que establece la norma mexicana de agua (Tabla 7).

Tabla 5. Parámetros de la calidad del agua: alcalinidad, acidez, dureza y cloruros.

Tipo de muestreo		Laboratorio			
ID	Manantial	Alcalinidad mg/L	Acidez mg/L	Dureza mg/L	Cloruros mg/L
1	Ojo de agua	119.4	14.7	87	14.3
2	Cabecera	149.3	16.6	175	35.3
Límites permisibles NOM 127		--	--	500	700

Fuente: elaboración propia (resultados de laboratorio).

Tabla 6. Parámetros de la calidad del agua: color, turbiedad, DQO y DBO₅.

Tipo de muestreo		Laboratorio			
ID	Manantial	Color PtCo	Turbiedad UNT	DQO mg O ₂	DBO ₅ mg O ₂
1	Ojo de agua	0	0.3	0	7.3
2	Cabecera	0	0.2	0	7.3
Límites permisibles NOM 127		15	4	-	-

Fuente: elaboración propia (resultados de laboratorio).

Tabla 7. Parámetros de la calidad del agua: sulfatos, derivados del nitrógeno, nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal.

Tipo de muestreo		Laboratorio			
ID	Manantial	SO_4^{2-} mg/L	N-NO_2^- mg/L	N-NH_3^- mg/L	N-NO_3^- mg/L
1	Ojo de agua	7.3	0.08	0	2.7
2	Cabecera	24.4	0.06	0	8.3
Límites permisibles NOM 127		400	0.9	0.5	11

Fuente: elaboración propia (resultados de laboratorio).

Los fosfatos más bajos fueron dados por la muestra ID1 con un valor de 2.1 mg/L, mientras que el valor más alto corresponde a la muestra ID2 con 8.1 mg/L PO_4^{3-} . En las dos muestras de SAAM, no rebasó el límite máximo permisible con valores de 0.01 y 0.2 mg/L, este parámetro está relacionado con la presencia de sustancias artificiales como el uso de detergentes. Finalmente, en cuanto a los coliformes totales tuvo un valor de 7 el manantial (ID1) ojo de agua, mientras que la muestra ID2 fue la muestra que presentó más contaminación en este parámetro con un valor de 240 NMP/100 mL, respecto a los coliformes fecales no hay presencia en ambas muestras de agua (Tabla 8).

Tabla 8. Parámetros de la calidad del agua: fosfatos, SAAM, coliformes totales y coliformes fecales.

Tipo de muestreo		Laboratorio			
ID	Manantial	PO_4 mg/L	SAAM mg/L	Coliformes totales NMP/100 MI	Coliformes fecales NMP/100mL
1	Ojo de agua	2.1	0.01	7	0
2	Cabecera	8.1	0.2	240	0
Límites permisibles NOM 127		-	-	0	0

Fuente: elaboración propia (resultados de laboratorio).

La figura 3 muestra el diagrama obtenido mediante el software HYDRA-MEDUSA en el cual se observan las especies predominantes en solución, para el caso de estos cuerpos de agua son los bicarbonatos que aumenten en relación con el pH.

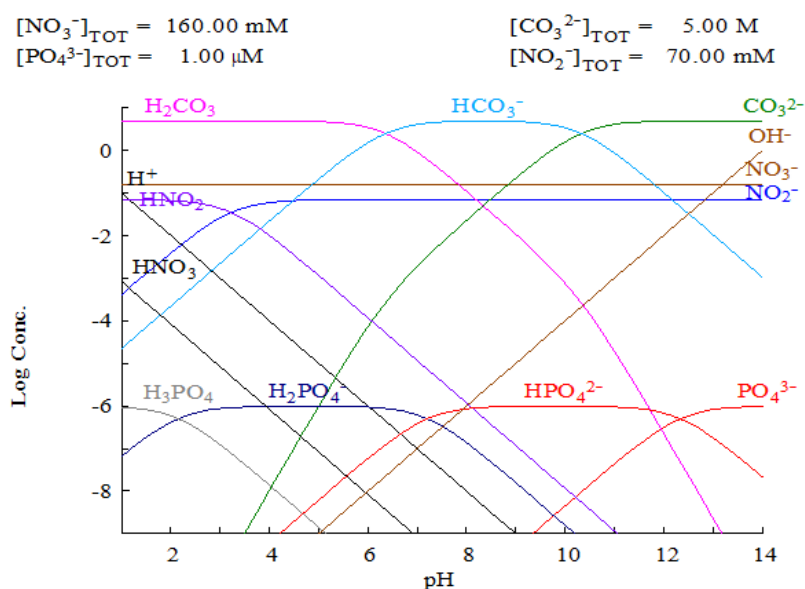


Figura 3. Diagrama de especies. Software HYDRA-MEDUSA.

Fuente: elaboración propia a partir del Software HYDRA-MEDUSA.

4. Discusión

En términos generales, los resultados analizados conforme a la NOM-127-SSA1-2021 se encuentran dentro de los límites máximos permisibles, con la excepción de los coliformes totales, cuya presencia no debería detectarse, indicando posibles riesgos microbiológicos.

La temperatura de las muestras varió entre 16 y 18.8 °C, un parámetro fundamental, ya que influye en la saturación del oxígeno disuelto, la actividad biológica y la concentración de bicarbonatos y carbonatos (Alvarez-Bastida, 2012). Temperaturas superiores a 15°C favorece el desarrollo de microorganismos, así como intensifica olores y sabores del agua (Rodier, 1998).

El pH mostró variación de aproximadamente un punto entre sitio y laboratorio. Esta alteración disminuye el oxígeno disuelto y aumenta los bicarbonatos, lo que resalta la importancia de medir el pH in situ (Custodio y Llamas, 1983).

La conductividad eléctrica más alta se registró en el manantial la cabecera ($568.5 \mu\text{S}/\text{cm}^2$), lo que reflejo un mayor grado de disociación de iones o mayor concentración de sales disueltas (Alvarez-Bastida, 2012). La acidez y alcalinidad observadas se deben principalmente a la disolución de CO_2 , carbonatos y bicarbonatos, predominando estos últimos, lo que concuerda con características típicas de aguas naturales (Torres, 2007). Los resultados indican que el agua del área de estudio va de ligeramente a moderadamente dura debido a la disolución de iones positivos (Fe^{3+} , K^{1+} , Ca^{2+} , Fe^{2+} y Al^{3+}) provenientes del subsuelo.

Entre los iones de atención destacan los nitratos, compuestos esenciales para la vida, sin embargo, en concentraciones elevadas generan efectos negativos en la salud humana. En los cuerpos de agua el contenido de estos suele no ser elevado salvo que exista contaminación por materia orgánica y/o fertilizantes, escorrentías, sistemas sépticos, aun cuando el límite permisible de la norma es $10\text{mg}/\text{L}$ se tienen evidencias que concentraciones arriba de $2.5\text{mg}/\text{L}$ causan enfermedades gastrointestinales, síndrome del bebé azul, así como cáncer en órganos genitales. Para el caso de estos cuerpos de agua las concentraciones de nitratos son considerables por lo que no debe utilizarse para uso y consumo humano, especialmente el manantial la cabecera el cuál presenta una concentración de $8.3\text{mg}/\text{L}$, aunque se encuentra por debajo de los límites máximos permitidos, considerada segura para el consumo humano esto puede representar una contaminación no reciente (Alvarez-Bastida, 2012).

En cuanto a la calidad microbiológica, la presencia de coliformes totales, así como el riesgo potencial que producen las bacterias como *Salmonella* y *Shigella*, refleja la vulnerabilidad de los manantiales no protegidos y la posibilidad de contaminación por materia fecal (Rodier, 1998). Esto resalta la necesidad de implementar medidas de protección y monitoreo continuo para garantizar el agua de consumo humano tanto en cantidad y calidad.

De acuerdo con Ibarra (2025), una forma de analizar la variación de la calidad fisicoquímica es mediante diagramas. El uso del programa HYDRA-MEDUSA permitió visualizar las especies iónicas predominantes en función del pH, mostrando que los bicarbonatos son las especies predominantes en los cuerpos de agua analizados. Cada curva del diagrama representa la concentración de una especie química, indicando cuál predomina a un pH específico, lo que coincide con los valores de pH, alcalinidad y acidez observados (Figura 3).

Finalmente, los resultados obtenidos permitieron caracterizar la calidad del agua de los manantiales estudiados, sin embargo, el número limitado de muestras restringe la representatividad a nivel regional. Asimismo, la ausencia de muestreos en distintas temporadas impidió evaluar posibles variaciones estacionales en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, lo cual constituye una limitación del presente estudio y sugiere la necesidad de investigaciones futuras más amplias y sistemáticas.

5. Conclusiones

En relación con los manantiales analizados, el manantial de ojo de agua es el único que cumple con la mayoría de los parámetros de la NOM-127-SSA1-2021, por lo que su uso para consumo humano podría considerarse adecuado. Sin embargo, los coliformes totales excedieron los límites establecidos en ambas fuentes de abastecimiento.

El manantial ID2 presentó los valores más altos en comparación con el manantial ID1 en ciertos parámetros como: pH, conductividad eléctrica, ST, SST, SDT, alcalinidad total, compuestos nitrogenados, SAAM. Lo que sugiere que el agua del manantial ID2 presenta mayor concentración de sales posiblemente derivado de algún foco de contaminación cercano con el manantial.

El diagrama HYDRA-MEDUSA mostró que las especies predominantes en solución son los bicarbonatos, cuya concentración aumenta conforme se incrementa el pH. Este comportamiento coincide con los valores de pH asociados a la alcalinidad y acidez observados en los manantiales del estudio. El ácido carbónico se disocia principalmente a

bicarbonato y no a carbonato, lo que indica una adecuada capacidad amortiguadora que contribuye a mantener un pH estable.

La presente investigación proporciona información valiosa sobre la calidad del agua de manantial en el área de estudio, la cual podría servir de base para desarrollar estudios orientados en la preservación de la salud humana. Se recomienda implementar un programa anual de monitoreo de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para evaluar cambios en la calidad del agua y tomar decisiones oportunas, así como establecer zonas de protección y priorización de manantiales siguiendo los métodos propuestos por López *et al.* (2021) y Colín *et al.* (2023). Estas acciones contribuirían a prevenir la contaminación, conservar el entorno natural y garantizar el suministro de agua de calidad para las comunidades. Adicionalmente, se sugiere la realización de talleres de capacitación dirigidos a la población local, con el fin de involucrarla en el monitoreo de los manantiales, y la instalación de cercas perimetrales alrededor de los mismos para protegerlos de posibles fuentes de contaminación directa.

6. Agradecimientos

Agradecemos a las autoridades locales del municipio de Almoloya de Juárez por facilitar el acceso a las fuentes de abastecimiento, así como al Laboratorio de Calidad del Agua del IITCA por su valiosa colaboración en el análisis de las muestras de agua de manantial. Finalmente, expresamos nuestro agradecimiento a los revisores y editores por sus valiosas observaciones y sugerencias, que permitieron fortalecer este artículo.

7. Conflicto de intereses

Los/as autores/as de este trabajo declaran bajo protesta de decir la verdad que este es un trabajo original y que no existen conflictos de interés. Así mismo, los autores de este artículo nos responsabilizamos del contenido del mismo, donde se aplicaron las mejores prácticas éticas.

8. Referencias

- Alvarez-Bastida, C. (2012). Variabilidad Temporal de la Calidad del Agua del Municipio de Villa de San Antonio la Isla. Tesis de Maestría. Maestría en Ciencias Ambientales. Facultad de Química. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Ather, D., Muhammad, S., y Ali, W. (2022). Fluoride and Nitrate Contaminations of Groundwater and Potential Health Risks Assessment in the Khyber District, North-Western Pakistan. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 1–16. <https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2098475>
- Bhat, S.U., Nisa, A.U., Sabha, I., y Mondal, N.C. (2022). Spring water quality assessment of Anantnag district of Kashmir Himalaya: towards understanding the looming threats to spring ecosystem services. *Appl Water Sci*, 12:180. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01691-7>
- Cantú, P. C. (2025). Agua para lograr el desarrollo sostenible. *Sustentabilidad Ecológica*, 28(130), pp. 66-72. https://www.researchgate.net/publication/389515538_AGUA_PARA_LOGRAR_EL_DESARROLLO_SUSTENTABLE
- Chacón, M. Y. (2017). Análisis físico y químico de la calidad del agua. Ediciones USTA.
- CONAGUA. (2024). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Toluca (1501), Estado de México. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/edomex/DR_1501.pdf
- Colín, M. A., Esquivel, J.M., y Salcedo, E.R. (2025). Evaluación multicriterio: un método para proponer una red de monitoreo de calidad. Caso de estudio. En UAEMéx (ed.), *Ordenación territorial hacia la sostenibilidad* (pp. 45-60). UAEMéx. <http://www.uaemex.mx>

- Colín, M. A., Esquivel, J. M., Salcedo, E. R., Álvarez, C., Padilla, J. G., Lopezaraiza, M. E., y Talavera, Ó. (2023). Human Health Risk and Quality Assessment of Spring Water Associated with Nitrates, Potentially Toxic Elements, and Fecal Coliforms: A Case from Southern Mexico. *Water*, 15(10), 1863. <https://doi.org/10.3390/w15101863>
- CONAGUA-SEMARNAT. (2024). Estadística del agua en México 2023. Edición, 2024. México. https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Descargas/pdf/EAM2023_f.pdf
- Custodio, E. y Llamas, M. R. (1983). Hidrología Subterránea. Ed. Omega. 2ª Edición Tomo I y Tomo II, Barcelona.
- Davraz, A., y Batur, B. (2021). Hydrogeochemistry Characteristics of Groundwater and Health Risk Assessment in Yalvaç–Gelendost Basin (Turkey). *Applied Water Science*, 11, 67. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01401-9>
- DOF. (1993). Norma Oficial Mexicana NOM-014-SSA1-1993. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo. Diario Oficial de la Federación, México, D.F.
- DOF. (2016a). Norma Oficial Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de agua-medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba. Diario Oficial de la Federación, México, D.F.
- DOF. (2016b). Norma Oficial Mexicana NMX-AA-042-SCFI-2015. Análisis de agua-enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y escherichia coli-método del número más probable en tubos múltiples. Diario Oficial de la Federación, México, D.F.
- DOF. (2021). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. Uso y consumo humano Límites permisibles de calidad del agua. Secretaría de Economía. Diario Oficial de la Federación, México, D.F.

- El Mountassir, O., Bahir, M., Ouazar, D., Chehbouni, A., y Carreira, P.M. (2022). Temporal and Spatial Assessment of Groundwater Contamination with Nitrate Using Nitrate Pollution Index (NPI), Groundwater Pollution Index (GPI), and GIS (Case Study: Essaouira Basin, Morocco). *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 29, 17132–17149. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16922-8>
- Esquivel, J. M. (2008). Evaluación del peligro de contaminación de las aguas subterráneas como herramienta para facilitar su uso sustentable: manantiales de Almoloya de Juárez, Estado de México. Tesis de Licenciatura. Licenciatura en Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México.
- Esquivel, J.M., Expósito, J.L., Esteller, M.V., Gómez, M.Á., Medina, C.M., y Fonseca, C.R. (2022). Prioritization of areas for groundwater monitoring using analytic hierarchy process method in Geographic Information Systems: a case of Mexico. *Int J Environ Sci Technol*, 20:5965–5982. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04383-6>
- Esquivel, J. M. (2015). Diseño óptimo de redes dinámicas de monitoreo de agua subterránea mediante el uso de SIG y escenarios hidrogeológicos. Tesis de Doctorado. Posgrado en Ciencias del Agua de la Universidad Autónoma del Estado de México.
- Gobierno de México (2025). Plan Nacional de Desarrollo 2025 - 2030, México, Gobierno Federal. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/981072/PND_2025-2030_v250226_14.pdf
- Ibarra, L.E. (2025). Uso del Software HYDRA-MEDUSA como herramienta para predecir y validar especies químicas: Síntesis y Caracterización de precipitados. Tesis de Licenciatura. Licenciatura en Ingeniería de Materiales. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería.
- IFOMEGEM. (1994). Carta Geológica del Estado de México *escala 1:250,000*. Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México.

- INEGI. (2024). Marco geoestadístico. En Shapefile capas vectoriales de entidades y del Estado de México. <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/#descargas>.
- Londoño, A., Giraldo, G. I., y Gutiérrez, A. A. (2010). Métodos analíticos para la evaluación de la calidad fisicoquímica del agua. Recuperado de: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/54604>.
- López, S., Expósito, J.L. y Esteller, M.V. (2016). Regionalización y clasificación de manantiales en el Estado de México. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, 10(1), 453-459. https://www.researchgate.net/publication/383265457_Regionalizacion_y_clasificacion_de_manantiales_en_el_estado_de_Mexico
- López S., Expósito, J.L., Esteller, M.V., Gómez, M.A., Paredes, J., y Esquivel, J.M. (2021). Delineation of protection zones for springs in fractured volcanic media considering land use and climate change scenarios in central Mexico region. *Environ Earth Sci.* 80, 366. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09662-y>
- Moldovan, A., Hoaghia, M.A., Kovacs, E., Mirea, I. C., Kenesz, M., Arghir, R. A., Petculescu, A., Levei, E. A., y Moldovan, O. T. (2020). Quality and Health Risk Assessment Associated with Water Consumption—A Case Study on Karstic Springs. *Water*, 12(12), 3510. <https://doi.org/10.3390/w12123510>
- Núñez, J.M. (5 de abril de 2024). *Opinión: Los desafíos de México frente a la crisis por escasez de agua*. IBERO. <https://ibero.mx/prensa/opinion-los-desafios-de-mexico-frente-la-crisis-por-escasez-de-agua>.
- Prince F.J., y Espinoza B.M. (2021). Una Mirada a la calidad del agua. Secretaría de Medio Ambiente-IMTA. Sección Políticas Públicas de la Agenda Nacional. 03. México. <https://www.gob.mx/imta/es/articulos/una-mirada-a-la-calidad-del-agua?idiom=es>

- Rodier, J. (1998). Análisis de aguas. Aguas naturales, aguas residuales, agua de mar. 1ª Edición, Editorial Omega S.A. Barcelona.
- Roşca, O.M., Dippong, T., Mariana, M., Mihalia, C., Mihalescua, L., Hoaghiab, M.A., y Jelea M. (2020). Impact of anthropogenic activities on water quality parameters of glacial lakes from Rodnei mountains Romania. *Environmental Research*, 182:109136.
- Torres, M. (2007). Evaluación de la Calidad del agua de la Cuenca Lerma-Chapala. Trabajo de servicio social. Universidad Autónoma Metropolitana. México.
- United Nations-UN. (2018). European global navigation satellite system and copernicus: supporting the sustainable development goals: building blocks towards the 2030 agenda. United Nations Ofce, Vienna.
- Wissink, J. G., y Herlina, H. (2023). Surface-temperature-induced Marangoni effects on developing buoyancy-driven flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 962, A23. <https://doi.org/10.1017/jfm.2023.263>