

Calidad del agua de los manantiales del humedal natural “Ciénega de Tamasopo” en San Luis Potosí, México

Water quality of the wellsprings from the natural wetland “Cienega de Tamasopo” in San Luis Potosí, Mexico

Cynthia Wong-Arguelles¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9637-5023>

Angel J. Alonso-Castro², ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2660-8156>

Candy Carranza-Álvarez³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6456-3035>

¹Programas Multidisciplinarios de Posgrado en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, San Luis Potosí, México, cwongar13@gmail.com

²Departamento de Farmacia, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México, angeljosabad@hotmail.com

³Unidad Académica Multidisciplinaria Zona Huasteca, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Ciudad Valles, San Luis Potosí, México, candy.carranza@uaslp.mx

Autora para correspondencia: Candy Carranza-Álvarez, candy.carranza@uaslp.mx

Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar la calidad del agua de 11 manantiales del humedal natural "Ciénega Tamasopo", los cuales son la principal fuente de agua disponible para uso humano entre la población alrededor de este humedal. Actualmente no existe información suficiente de los parámetros fisicoquímicos y biológicos de tales manantiales. El análisis microbiológico y los parámetros *in situ* como temperatura, pH, sólidos totales disueltos y turbidez se midieron en los 11 manantiales en dos temporadas de muestreo. Los resultados obtenidos se compararon con las legislaciones nacionales (Criterios Ecológicos de Calidad del Agua, 1989, Norma Oficial Mexicana Modificada NOM-127-SSA1-1994) e internacionales (Agencia de Protección Ambiental y Organización Mundial de la Salud) para determinar si la calidad del agua de los manantiales es adecuada para el consumo humano. La problemática que enfrentan los manantiales es variada debido a las actividades antrópicas y de agricultura. Por ello es necesario emprender actividades y proyectos para su protección y un buen aprovechamiento, a fin de evitar su deterioro.

Palabras clave: calidad de agua, humedal natural, manantiales.

Abstract

The aim of this work was to evaluate the water quality of 11 springs of the natural wetland "Ciénega Tamasopo", which are the main source of water available for human use among the population around this wetland. Currently, there is insufficient information about the physicochemical and biological parameters of these springs. The microbiological analysis and *in situ* parameters such as temperature, pH, total dissolved solids, and turbidity were measured in the 11 springs in two sampling seasons. The results obtained were compared with national (Ecological Criteria for Water Quality, 1989, Official Mexican Standard Modified NOM-127-SSA1-1994) and international legislations (Environmental Protection Agency and World Health Organization) to determine whether the quality of spring water is adequate for human consumption. The problems faced by these springs are varied due to anthropogenic and agricultural activities. Therefore, it is necessary to undertake activities and projects for their protection and good use to avoid their deterioration.

Keywords: Water quality, natural wetlands, springs.

Recibido: 27/01/2020

Aceptado: 22/10/2020

Introducción

Los humedales son unos de los ecosistemas más importantes de la Tierra. Desempeñan un papel clave para evitar las inundaciones y depurar el agua de contaminantes o exceso de nutrientes (Guo, Li, Sheng, Xu, & Wu, 2017), dado que actúan como trampas de sedimentación o como detoxificantes químicos (Suhani, Monika, Vaish, Singh, & Singh, 2020). Además, favorecen la recarga de los mantos freáticos y sistemas superficiales (Conanp, 2020; Ramsar, 2020). En estos sistemas acuáticos, el agua es el principal factor que determina el tipo de plantas y animales que habitarán en ellos (Moreno-Casasola, 2016). En algunas zonas rurales, los humedales representan una fuente de abastecimiento de agua, y la calidad de ella está directamente relacionada con la forma de vida, la salud y las actividades económicas de sus pobladores (Musalem, Jiménez, & McDonald, 2014; Kaur, Walia, Mabwoga, & Arora, 2017).

En México existen 142 humedales de importancia internacional, lo cual lo ubica como el segundo país en importancia mundial de acuerdo con su superficie por la presencia de tales ecosistemas (Conanp, 2020). El estado de San Luis Potosí, México, cuenta con un humedal natural de agua dulce denominado Ciénega de Tamasopo. Este humedal está en la Región Hidrológica del Pánuco (RH-26), en la subregión de Bajo Pánuco (Carbajal *et al.*, 2015), la cual forma parte de la Microcuenca No. 40 (denominada también "Ciénega de Tamasopo"), y tiene una superficie de 26 452.96 hectáreas. Es uno de los últimos humedales lénticos de clima neotropical del estado potosino, por lo que es prioritaria su protección y conservación. Las entradas de agua de este humedal provienen del agua

de lluvia y de los manantiales caracterizados en la parte superior de la cuenca (Pérez-Castillo, Alfaro-De-la-Torre, Pérez-Rodríguez, & Comín Sebastián, 2017). Para este humedal, los manantiales son de gran importancia, pues alimentan la columna de agua de manera permanente. Los manantiales son afloramientos de agua subterránea en superficie que, cuando son de buena calidad, pueden usarse como fuente de agua para consumo humano. Sin embargo, la calidad natural del agua de los mismos depende de las condiciones geológicas del medio en el que circulen debido a que antes de que el agua emerja a la superficie terrestre puede enriquecerse con minerales, o bien puede contaminarse por la influencia de actividades antrópicas (Derso, Beyene, & Getachew, 2015; Silva-García, Ochoa-Estrada, Cruz-Cárdenas, Nava-Velázquez, & Villalpando-Barragán, 2016). Por ello, es importante conocer la calidad de los manantiales que abastecen de agua a los humedales. Actualmente dichos ecosistemas están experimentando una disminución en la calidad de su agua debido a los bajos niveles de sedimentación, presencia de sales y alta de concentración de nutrientes (Kulinkina *et al.*, 2016; Lintern *et al.*, 2018).

Dada la importancia de estos cuerpos de agua, el objetivo del presente estudio fue evaluar la calidad de agua de los 11 manantiales que abastecen al humedal Ciénega de Tamasopo. Para ello se determinaron algunos parámetros fisicoquímicos (temperatura, sólidos totales disueltos, conductividad eléctrica, turbidez, dureza total, dureza de calcio y aniones (SO_4^{-2} y NO_3^{-}), y microbiológicos en dos épocas del año.

Materiales y métodos

Sitio de estudio

El humedal Ciénega Tamasopo es un pantano de agua dulce ubicado en el neotrópico en el centro de México (Ramsar, 2008). Es un captador de agua pluvial (aguas superficiales) y una zona de descarga de aguas subterráneas. Existe una corriente principal que fluye desde la parte superior (norte) que recoge agua de las corrientes secundarias formando el arroyo "El Trigo" o "Cabezas", el cual cuenta con una Declaratoria de Propiedad Nacional (No. 137), donde se menciona que brotan manantiales de carácter permanente y de afloramiento espontáneo denominados "El Trigo" o "Cabezas", "Ojo de Agua Grande", "Ojo de agua del Zopilote", "Ojo de Agua de Cofradía", "Ojo de Agua de la Presa Mocha", "Ojo de Agua de San Javier", "Ojo de Agua del Lagarto", "Ojo de Agua de Juan Shilote" y "Ojo de Agua de Capuchinas". El manantial El Trigo o Cabezas se considera como el origen del arroyo "El Trigo", la principal corriente dentro de la Ciénega (de unos 20 km de longitud), que en parte está bien definido, pero hay largos tramos donde las aguas desaparecen (Ramsar, 2008; Pérez-Castillo, Alfaro-De-la-Torre, Briones-Gallardo, & Medellín-Milán, 2015).

La precipitación media es de 1500 mm con precipitaciones intensivas de julio a septiembre. La precipitación provoca un aumento significativo en el nivel de la columna de agua e inunda los campos de caña de azúcar y algunas tierras de ganado. Durante las visitas de campo se pudo constatar que las casas cercanas no cuentan con sistemas de drenaje y usan letrinas (húmedas o secas).

En la microcuenca se desarrollan la agricultura y ganadería. La agricultura representa la actividad principal con el cultivo de caña de azúcar; mientras que la ganadería con la cría y engorda extensiva, semiintensiva e intensiva de bovinos. Dichas actividades impactan en los recursos naturales debido a la presión que ejercen, que se asocia con el costo ambiental por la expansión de la superficie y producción de caña de azúcar por el empleo de fertilizantes químicos y plaguicidas, así como por la explotación del uso del agua y suelo (Pérez-Castillo *et al.*, 2017).

En la Figura 1 se localizan los manantiales (11) alrededor del humedal Ciénaga de Tamasopo: "Cabezas" (M1), "Ecuranas 1" (M2), "Ecuranas 2 (M3), "El Cuajo" (M4), "San Isidro" (M5), "Cofradías" (M6), "Presa Mocha" (M7), "Agua de las Piedras" (M8), "Plan de Juanchilote" (M9), "Capuchinas" (M10) y "El 20" (M11).

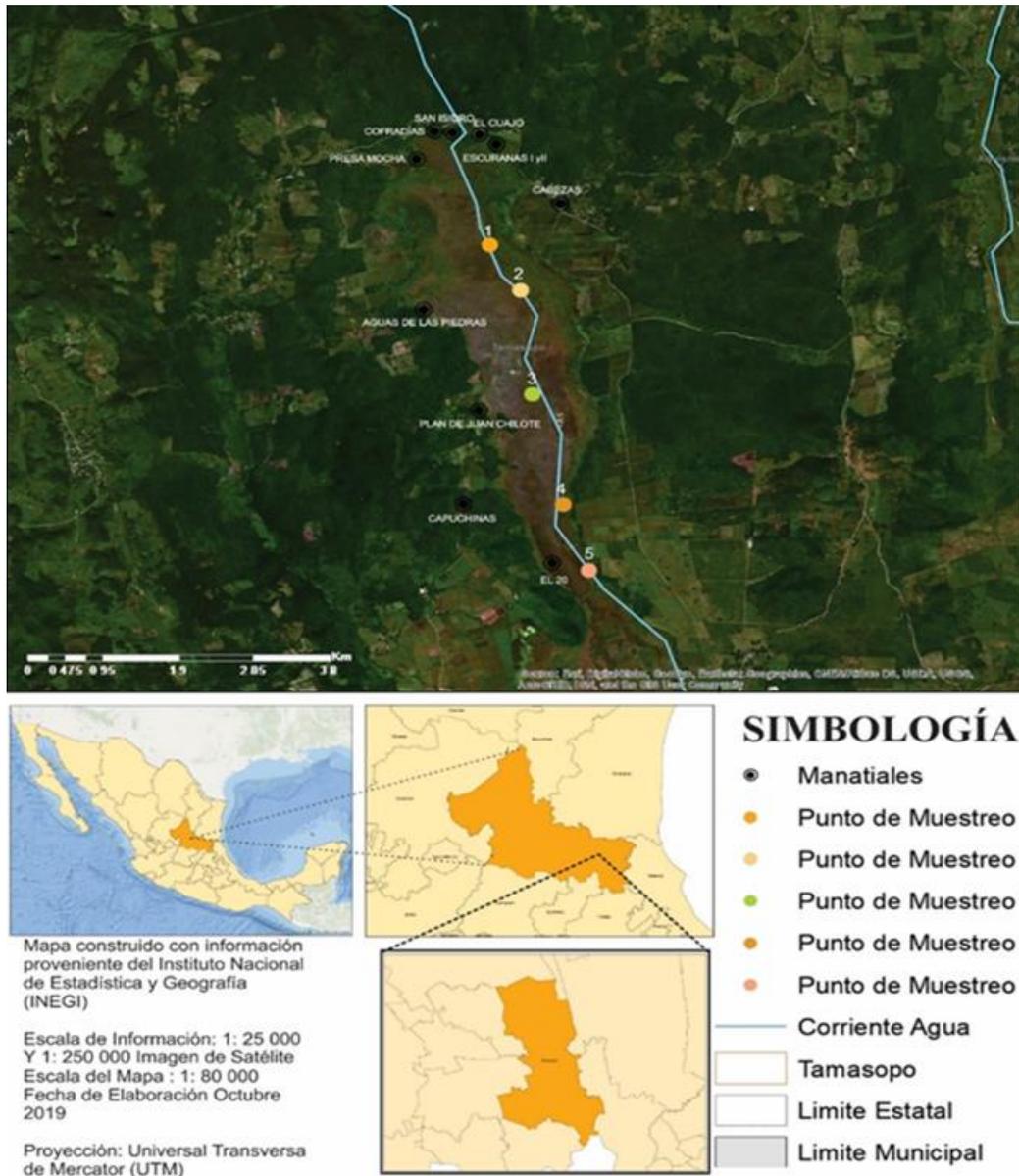


Figura 1. Localización de los manantiales aledaños al humedal natural Ciénega de Tamasopo, México. Elaboración propia con base en INEGI (2010).

Muestreo de agua y análisis de muestras

Las muestras de agua se colectaron de los manantiales (M1-M11) alrededor del humedal natural Ciénega de Cabezas en dos etapas de muestreo (julio y octubre de 2017). La profundidad de los manantiales varió entre 0.5 y 1.3 m; presentaban un lecho rocoso y plantas; en algunos se observaron bombas de agua, fauna (cerdos, ganado bovino y aves) y recipientes vacíos de fertilizantes; su acceso fue en función de la época de muestreo. El procedimiento de la toma de muestra para cada tipo de análisis se realizó de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-014-SSA1-1993 (SSA, 1994): "Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados". El muestreo fue simple y las mediciones realizadas para cada muestra se hicieron por triplicado.

Respecto a los análisis fisicoquímicos realizados, se consideró la medición de los siguientes parámetros: temperatura, sólidos totales disueltos, conductividad eléctrica, turbidez y pH, los cuales fueron medidos *in situ* con un potenciómetro multiparamétrico (HACH Conductivity Probe 51975-00); además se consideró dureza total (mg/l CaCO₃), dureza de calcio (mg/l CaCO₃) y aniones (SO₄⁻² y NO₃⁻). Las muestras se colectaron en recipientes de polietileno de un litro de capacidad previamente lavados con Extran libre de fosfatos y enjuagados de forma abundante con agua desionizada; se almacenaron y transportaron a una temperatura de 4 °C para ser analizadas

posteriormente en el Laboratorio de Investigación en Ciencias Ambientales de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP).

Para la determinación de la dureza en las muestras de agua se utilizó el método de volumetría por EDTA de acuerdo con lo establecido por la normatividad mexicana (NMX-AA-072-SCFI-2001). El ion sulfato en aguas se realizó mediante el método turbidimétrico (Method 4 500-SO₄²⁻; APHA, 1992), con modificación sustentada y desarrollada por la American Society for Testing and Materials (ASTM D 516-90, Standard Test Method for Sulfate Ion in Water, 1995); para determinar la presencia del ion nitrato se utilizó el método de espectroscopia UV (Method 4 500-NO₃⁻; APHA, 1992). Para estos últimos tres parámetros se empleó un espectrofotómetro UV-Vis (AquaMate Plus Thermo Specific).

Las muestras de agua para realizar los análisis microbiológicos se colectaron en frascos estériles con tapa de rosca, con capacidad de 250 ml. El análisis microbiológico se realizó el mismo día del muestreo. Para ello se determinó el número más probable de coliformes totales de acuerdo con los procedimientos indicados en la Norma Oficial Mexicana NOM 112-SSA1-1994 (SSA, 1995), considerando que el agua fuera potable, es decir, para consumo humano. Además, se determinó el número más probable de coliformes fecales (termotolerantes) con base en lo señalado en la Norma Mexicana NMX-AA-042-SCFI-2015. Donde para confirmar la presencia de organismos coliformes fecales (termotolerantes) se incubaron los tubos con caldo lactosa bilis verde brillante sembrados a una temperatura de $44.5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ por $24\text{ h} \pm 2\text{ h}$, y se examinó la producción de gas. Mediante tablas estadísticas se calculó del número más probable (NMP) de organismos coliformes y organismos coliformes termotolerantes como contenidas en 100 ml de la

muestra a partir del número de tubos positivos en los resultados confirmativos.

Análisis estadístico

Los resultados se analizaron mediante el programa *Statistic* para Windows, versión 8.0; se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, y para la comparación de medias se usó el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher con una diferencia significativa ($p \leq 0.05$).

Resultados

En la Tabla 1 se muestran los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados al agua de los 11 manantiales (M1-M11) aledaños al humedal natural Ciénega de Tamasopo durante las dos temporadas de muestreo (julio y octubre de 2017). En el primer muestreo, los valores de pH (7.7-8.2) están dentro de los límites máximos permisibles propuestos en las

diferentes agencias de regulación para agua de consumo humano (DOF, 1989; EPA, 2009; SSA, 2000), al igual que la temperatura, la cual osciló de 23 a 25 °C.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos de los manantiales alrededor del humedal natural Ciénega de Tamasopo en dos temporadas de muestreo.

Manantial	pH		T (°C)		CE (µS/cm)		STD (mg/l)		Turbidez (UTN)	
	Jul	Oct	Jul	Oct	Jul	Oct	Jul	Oct	Jul	Oct
M1 "Cabezas"	7.7	7.2	24	23	575.3	13.31	287.6	5.8	59	ND
M2 "Oscuranas 1"	8.1	7.5	24	23	573.8	13.16	286.9	5.8	0.17	ND
M3 "Oscuranas 2"	8.1	7.5	23	22	636.9	13.29	38.4	5.8	0.20	ND
M4 "El Cuajo"	8.0	7.3	24	23	1.68	13.49	839.5	5.9	124	ND
M5 "San Isidro"	7.9	7.3	24	23	1.73	13.80	863.5	6.1	0.96	ND
M6 "Cofradías"	8.1	7.3	24	23.5	1.71	13.70	852.5	6.0	0.06	ND
M7 "Presa Mocha"	8.0	7.3	24	23	1.84	13.82	919	6.1	0	ND
M8 "Agua de las Piedras"	7.7	ND	25	ND	777.2	ND	388.6	ND	0.76	ND
M9 "Plan de Juanchilote"	8.1	8.2	24	24	1.86	13.51	927.5	5.9	0.41	ND
M10 "Capuchinas"	8.0	7.4	25	22	595.0	13.26	297.5	5.8	0.37	ND
M11 "El 20"	8.2	8.0	25	24	1.66	13.39	829.5	5.9	ND	ND
Leyes-normas										
Criterios Ecológicos, 1989	5.0-9.0		Cond. nat. +2.5		NC		1 000		Cond. nat.	

NOM-127-SSA1-1994, mod. 2000	6.5-8.5	NC	NC	1 000	5
EPA (2015)	5.0-9.0	NC	NC	250	NC
WHO (2018)	6.5-8.0	NC	NC	NC	NC
ND: no disponible; NC: no contemplado					

Por otra parte, los sólidos totales disueltos (STD) estuvieron en un rango de 38.4 a 927.5 ppm, siendo "El Cuajo" (M4), "San Isidro" (M5), "Cofradías" (M6), "Presa Mocha" (M7) y "El 20" (M11) los sitios con los valores más altos. En cuanto a la conductividad eléctrica, el sitio "Agua de las Piedras" (M8) presentó el valor más alto (777.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Para el segundo muestreo (octubre 2017) se midieron los mismos parámetros *in situ* (Tabla 1) a excepción de la turbidez debido a un mal funcionamiento del instrumento, que no se pudo reparar en campo. El rango de pH osciló de 7.2 a 8.4 y se observó una considerable disminución de los STD respecto al primer muestreo, con un rango de 5.8 a 6.1 ppm (M5 "San Isidro" y M7 "Presa Mocha", respectivamente). Por último, en cuanto a la conductividad eléctrica, el M2 "Oscuranas 1" presentó el menor valor con 13.16 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La temperatura del agua fue mayor en el primer muestreo con respecto al segundo muestreo en los manantiales M8 "Agua de las Piedras", M10 "Capuchinas" y M11 "El 20" (con 25°C). La conductividad eléctrica (CE) fue mayor en el primer muestreo (julio 2017) que en el segundo (octubre 2017). Los manantiales M3 "Oscuranas 2" (636.9

$\mu\text{S/cm}$), M8 "Agua de las Piedras" (772.2 $\mu\text{S/cm}$) y M10 "Capuchinas" (595.0 $\mu\text{S/cm}$) fueron los que presentaron los valores más altos de CE.

Con base en las determinaciones realizadas respecto a la TB, el valor más alto se encontró en el primer muestreo en el M4 "El Cuajo" (124 UTN), seguido por el M1 "Cabezas" (59 UTN). Es importante mencionar que el agua del manantial M1 "Cabezas" se utiliza sobre todo para uso doméstico, dado que es el sitio de bombeo para distribuir a la población del Ejido Cabezas; mientras que en el M4 "El Cuajo" se observó la instalación de una bomba hacia las casas cercanas, lo cual puede causar la resuspensión de los sedimentos del fondo en el punto de muestreo.

Además, se llevó a cabo la determinación de algunos parámetros de gran importancia en la zona, como son dureza total, dureza debido al calcio, sulfatos y nitratos para complementar los análisis fisicoquímicos (Tabla 2).

Tabla 2. Determinación de dureza total, calcio (CaCO_3), sulfatos (SO_4^{2-}) y nitratos (NO_3^-) de los manantiales alrededor del humedal Ciénega de Cabezas (primer y segundo muestreo).

Manantial	Dureza total (mg/l CaCO_3)		Dureza Ca (mg/l CaCO_3)		Sulfatos (mg/l SO_4^{2-})		Nitratos (mg/l NO_3^-)	
	Jul	Oct	Jul	Oct	Jul	Oct	Jul	Oct
M1 "Cabezas"	285.33±8.33	246.67±2.31	276.00±4.00	233.33±2.31	42.17±0.19	28.74±0.20	ND	1.01±0.001
M2 "Oscuranas 1"	306.67±6.11	229.33±8.33	201.33±2.31	166.67±2.31	85.35±0.48	37.16±0.56	ND	0.59±0.01
M3 "Oscuranas 2"	344.00±4.00	253.33±2.31	218.67±6.11	185.33±11.55	126.82±0.63	37.88±0.69	ND	0.48±0.01
M4 "El Cuajo"	749.33±11.31	388.00±8.00	418.67±11.31	206.67±6.11	302.30±4.00	218.21±1.31	ND	0.51±0.01
M5 "San Isidro"	944.00±2.83	628.00±4.00	672.00±11.31	421.33±4.62	278.23±0.65	277.39±1.12	ND	0.26±0.005

M6 "Cofradías"	937.33±8.49	361.33±6.11	622.67 ±2.83	280.00±4.00	279.00±0.43	235.32±1.94	ND	0.50±0.01
M7 "Presa Mocha"	1030.67±8.33	689.33±11.31	620.00 ±8.00	476.00±4.00	285.13±0.69	275.71±2.75	ND	0.21±0.004
M8 "Agua de las Piedras"	398.67±6.11	ND	333.33 ±8.49	ND	98.99±1.44	ND	ND	ND
M9 "Plan de Juanchilote"	302.67±4.62	456.00±8.00	253.33 ±2.31	340.00±4.00	285.65±1.09	230.94±0.20	ND	0.30±0.004
M10 "Capuchinas"	1009.33±8.49	258.67±2.31	628.00 ±19.80	242.67±2.31	64.73±0.001	34.40±0.66	ND	0.68±0.002
M11 "El 20"	846.67±4.62	321.33±6.11	698.67±2.31	224.00±8.00	271.54±1.68	133.01±3.19	ND	0.59±0.10
Leyes-normas								
Criterios Ecológicos-1989	NC		NC		500			5
NOM-127-SSA1-1994, mod. 2000	500		NC		400			10
EPA (2015)	500		NC		NC			NC
WHO (2018)	NC		NC		NC			50
ND: no disponible NC: no contemplado								

Los valores de dureza total (mg/l de CaCO₃) oscilaron desde 285.33 ± 8.33 a 1 030.67 ± 8.33 mg/l para el primer muestreo (julio 2017); considerando que esta agua es consumida directamente por los habitantes de las comunidades aledañas, se tomaron como referencia los valores de la Norma Oficial Mexicana Modificada NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000), la cual establece un límite máximo permisible para la dureza total de hasta 500 mg/l. Los resultados del primer muestreo indicaron valores superiores a los establecidos en la norma para los manantiales M7 "Presa Mocha" con 1 030.67 ± 8.33 mg/l, seguido del M10 "Capuchinas" con 1 009.33 ± 8.49 mg/l; M5 "San Isidro" con 944.00 ± 2.83 mg/l; M6 "Cofradías" con 937.33 ± 8.49 mg/l; M11 "El 20" con 846.67 ± 4.62 mg/l y, M4 "El Cuajo" con 749.33 ± 11.31 mg/l; en el resto de los manantiales este parámetro se encontraba dentro del límite permisible.

En cuanto a la determinación de dureza de Ca (mg/l CaCO₃), los valores obtenidos oscilaron desde 201.33 ± 2.31 hasta 698.67 ± 2.31

mg/l; mientras que para el segundo muestreo (octubre 2017), los valores de dureza total (CaCO_3) se detectaron en un rango de 229.33 ± 8.33 mg/l a 689.33 ± 11.31 mg/l.

El análisis de los aniones durante el primer muestreo mostró la presencia de sulfatos en un rango de 64.73 a 302.30 ± 4.0 mg/l. Los manantiales en donde se detectaron las concentraciones más altas de sulfatos fue el M4 "El Cuajo" con 302.30 ± 4.00 mg/l, seguido del M9 "Plan de Juanchilote" con 285.65 ± 1.09 mg/l y el M7 "Presa Mocha" con 285.13 ± 0.69 mg/l. Por otra parte, el análisis de sulfatos y nitratos en el segundo muestreo mostró la presencia de ambos en concentraciones que oscilaron de 34.40 ± 0.66 a 277.39 ± 1.12 mg/l para sulfatos y de 0.21-1.01 mg/l para nitratos. Se encontró una mayor concentración de sulfatos en los manantiales M5 "San Isidro" y M7 "Presa Mocha", en donde se detectaron 277.39 ± 1.12 y 275.71 ± 2.75 mg/l, respectivamente; mientras que para nitratos la concentración más alta determinada fue para el M1 "Cabezas" (1.01 mg/l) y M10 "Capuchinas" (0.68 mg/l).

Finalmente, en la Tabla 3 se presentan los resultados de los análisis microbiológicos realizados a las muestras de agua de los 11 manantiales en estudio durante el segundo muestreo (octubre 2017). Dada la naturaleza de este tipo de análisis se decidió realizarlo sólo después de la época de lluvia para determinar el aporte microbiológico provocado por la mezcla de aguas pluviales y superficiales; se tomó en cuenta la consideración de la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2018): "la lluvia puede aumentar en gran medida los niveles de contaminación microbiana en las fuentes de agua y los brotes de enfermedades transmitidas por el agua son frecuentes después de periodos de lluvias".

Tabla 3. Análisis microbiológico de los manantiales alrededor del humedal Ciénega de Cabezas (segundo muestreo).

Manantial	Coliformes totales (NMP/100 ml)	Coliformes fecales (NMP 100/ml)
M1 "Cabezas"	< 3	< 3
M2 "Oscuranas 1"	7	< 3
M3 "Oscuranas 2"	< 3	< 3
M4 "El Cuajo"	28	< 3
M5 "San Isidro"	< 3	< 3
M6 "Cofradías"	< 3	< 3
M7 "Presa Mocha"	< 3	< 3
M8 "Agua de las Piedras"	ND	ND
M9 "Plan de Juanchilote"	21	< 3
M10 "Capuchinas"	< 3	< 3
M11 "El 20"	< 3	< 3
Criterios Ecológicos-1989	< 2	< 3
NOM-127-SSA1-1994, mod. 2000	Ausencia o no detectable	Ausencia o no detectable
WHO (2018)	NC	No detectable
	Límite de confianza del 95%	
ND: no disponible; NC: no contemplado		

Los resultados de la Tabla 3 muestran la presencia de coliformes totales en los manantiales M2 "Oscuranas 1" (7NMP/100 ml), M4 "El Cuajo" (28 NMP/100 ml) y M9 "Plan de Juanchilote" (21 NMP/100 ml); mientras que para coliformes fecales, todos los manantiales presentaron la ausencia de estos organismos o no fueron detectados (< 3 NMP/100 ml), excepto en el manantial M8 "Agua de las Piedras", en donde no se cuantificaron debido a la inundación del terreno e imposible acceso al manantial para la obtención de las muestras.

Discusión

En este estudio se determinó la calidad del agua de los manantiales (M1-M11) que rodean al humedal natural Ciénega de Tamasopo por su importancia para el enriquecimiento de la columna de agua. Los parámetros fisicoquímicos determinados en este estudio se realizaron tomando en consideración que el agua es de manantial y por su origen no presenta perturbación por contaminación antrópica. Sin embargo, dado que los habitantes de las comunidades aledañas al humedal consumen tal agua como potable, fue necesario conocer estos parámetros para determinar si era apta o no para consumo humano, así como el aporte que tienen estos manantiales hacia el humedal.

De acuerdo con la reglamentación vigente establecida en la Norma Oficial Mexicana modificada NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000), el rango de pH permisible para calidad del agua para uso y consumo humano es de 6.5-8.5, por lo que todos los sitios cumplen con este criterio en los dos muestreos realizados y se interpretan como un medio neutro alcalino, propios de sistemas continentales de 6.25 a 7.67 en los manantiales que alimentan al humedal Ciénega de Tamasopo (Pérez-Castillo, 2017). Asimismo, Puczko, Zieliński y Jusik (2018) reportaron valores muy parecidos de pH (7.8-8.2) en los manantiales del parque forestal Knyszyn, Polonia. Mientras que Silva-García *et al.* (2016) indican valores de pH entre 7 y 7.5 en los manantiales del río Duero, Michoacán, México; es decir, aguas de alcalinidad básica y dentro de los límites permisibles.

El pH es un parámetro importante que se relaciona de modo cercano con la productividad biológica del sistema y puede ser afectado por la actividad antrópica: descargas de aguas no municipales, escorrentías agrícolas y deposición atmosférica de sustancias que forman ácidos (Ramos-Herrera, Broca-Martinez, Laines-Canepa, & Carrera-Velueta, 2012). Otras razones de valores alcalinos de pH se pueden deber a que está controlado por los iones $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, los cuales se forman durante los procesos hidrotermales debido a la presencia del dióxido de carbono disuelto (Roy, Kumar, Chowdhury, Singh, & Ray, 2018).

La lixiviación y disolución del material del acuífero, así como la mezcla de fuentes salinas generalmente contribuyen a un valor de conductividad eléctrica (CE) alto en agua. Un amplio rango de valores de CE en muestras de agua es indicativo de múltiples fuentes de iones, como la contaminación atmosférica, geogénica y antrópica (Leite *et al.*, 2018; Thakur, Rishi, & Sharma, 2018).

Roy *et al.* (2018) realizaron un estudio en los manantiales termales de Bakreswar, India. Obtuvieron valores de CE entre 410 y 783 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que se atribuyen al proceso de mineralización y la meteorización de las rocas huésped que promueven la solubilidad de los iones y, a su vez, pueden mejorar el nivel de sólidos totales disueltos (STD) en agua. Los STD son uno de los parámetros que permite evaluar la salinización de aguas subterráneas (Semarnat, 2018). Si los niveles de STD en agua exceden los 1 000 mg/l, se considera no apta para el consumo humano (DOF, 1989; SSA, 2000); de acuerdo con este criterio, todos los valores obtenidos en los dos muestreos realizados se pueden considerar aptos para el consumo, pues están por debajo del valor mencionado.

La Organización Mundial de la Salud (WHO, 2018) no establece un valor guía para el contenido de sólidos totales presentes en el agua potable debido a que no se consideran como un parámetro de preocupación para la salud humana. Sin embargo, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2015) recomienda un valor límite de 250 mg/l para agua de consumo humano. Siendo así, los sitios M4 "El Cuajo", M5 "San Isidro", M6 "Cofradías", M7 "Presa Mocha", M9 "Plan de Juanchilote" y M11 "El 20" son los más altos y rebasan este límite; ello se puede deber a que los sólidos disueltos pueden provenir de fuentes naturales como hojas, sedimentos, rocas y aire, así como de aguas residuales y escorrentía de fertilizantes y plaguicidas. Estos valores son más altos que los reportados por Aksever, Davraz y Bal (2016) en los manantiales de Başköy, Turquía (130-490 mg/l), donde los valores de STD varían durante la circulación debido al contacto con las rocas, el tiempo de residencia prolongado del agua y la recarga de los manantiales desde una mayor altitud. Rivera-Rodríguez, Beltrán-Hernández y Lucho-

Constantino (2019) reportan que los valores encontrados para CE de 319-516 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y para STD de 139-258 mg/l en los pozos subterráneos en Apan, Hidalgo, indican poca mineralización en esa área debido a un bajo tiempo de residencia del agua.

Para el agua de consumo humano, un valor de TB de 5 UTN es por lo general aceptable (SSA, 2000), aunque esto puede variar de acuerdo con las características de la fuente. Además, no se ha reportado ningún efecto sobre la salud provocado por un valor alto de TB (Chacón-Chumacero, Pinedo-Álvarez, & Rentería-Villalobos, 2016).

La dureza es un parámetro útil para indicar la calidad del agua para uso doméstico e industrial. El Ca y Mg disueltos en agua son los dos minerales que determinan la dureza del agua; son los iones dominantes del agua subterránea y la disolución de minerales de carbonato (Aksever *et al.*, 2016; Singh, Kaur, & Katnoria, 2017). La alta concentración de dureza total y dureza de calcio observada en los sitios M5 "San Isidro", M6 "Cofradías" y M7 "Presa Mocha" puede atribuirse a la localización de estos manantiales, pues se encuentran cerca del cerro y en general los suelos son calcáreos, por lo que durante la infiltración o a lo largo del flujo el agua subterránea puede disolver el CaCO_3 y el $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ presentes en las rocas, y con ello la concentración de calcio del agua subterránea aumenta (Aksever *et al.*, 2016).

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2018), no se propone ningún valor de referencia basado en efectos sobre la salud humana para la dureza del agua de consumo. El valor del umbral gustativo del ion calcio se encuentra entre 100 y 300 mg/l. En algunos casos, los consumidores toleran una dureza del agua mayor que 500 mg/l.

El agua con una dureza mayor a 200 mg/l, en función de la interacción de otros factores, como el pH y la alcalinidad, puede provocar la formación de incrustaciones en las instalaciones de tratamiento, el sistema de distribución, las tuberías y los depósitos de los edificios. Otra consecuencia es el consumo excesivo de jabón y la consiguiente formación de restos insolubles de jabón. La aceptabilidad por la población del grado de dureza del agua va variar en gran medida de una comunidad a otra, en función de las condiciones de uso.

En cuanto a los aniones, durante el primer muestreo sólo se detectaron sulfatos, los cuales se encontraban en un rango de 64.73 a 302.30 \pm 4.0 mg/l. Los valores obtenidos de sulfatos mostraron mayor contenido durante el primer muestreo; es importante mencionar que los manantiales M4 "El Cuajo", M7 "Presa Mocha" y M9 "Plan de Juanchilote" se localizan rodeados de campos cañeros y en esta temporada de muestreo se observó aplicación de fertilizantes y corte de caña (periodo de zafra). De acuerdo con lo reportado por Almazán-Juárez *et al.* (2016), en la cuenca del río Papagayo, Guerrero, en los manantiales "Palo Gordo" y "Agua Caliente" se determinó el contenido de sulfatos (62.68 y 45.58 mg/l SO_4^- , respectivamente), considerando que no son valores altos si se comparan con otros mantos acuáticos como de zonas mediterráneas en donde los contenidos de sulfatos son mayores de 400 mg/l. La WHO (2018) no ha definido valores de referencia para establecer los límites máximos permisibles para los sulfatos en agua de acuerdo con los efectos que causan a la salud humana. Sin embargo, la presencia de éstos en el agua de uso y consumo humano puede generar un sabor perceptible y rechazo entre los usuarios en niveles superiores a los 1 000 mg/l, lo cual podría provocar un efecto laxante en consumidores no habituados. Por lo

general, se considera que el deterioro del sabor es mínimo cuando la concentración es menor a 250 mg/l; en este sentido, en los manantiales M4-M7 ("El Cuajo", "San Isidro", "Cofradías" y "Presa Mocha"), M9 "Plan de Juanchilote" y M11 "El 20" podría haber alteración una ligera alteración en el sabor del agua.

La presencia de SO_4^{-2} en el agua de manantiales es geogénico, es decir, producto de la mineralización (Roy *et al.*, 2018). En un trabajo realizado por Pérez-Castillo (2017) se reportaron valores de sulfatos entre 3.1 y 229 mg/l (noviembre 2010), y entre 13.1 y 128.6 mg/l (mayo 2012) en los manantiales del humedal Ciénega de Tamasopo, atribuyendo el contenido de sulfatos en el agua de los manantiales a las reacciones de disolución de minerales de azufre en depósitos geológicos durante el afloramiento y flujo del agua, procesos de oxidación de sulfuros de hierro (FeS_x) mediados por los nitratos en el agua al momento de aflorar y al proceso de karstificación (disolución del sustrato calcáreo debido a la infiltración del agua de lluvia).

En las zonas rurales, el uso de fertilizantes nitrogenados ha llevado a una mayor contaminación potencial del agua subterránea por un exceso de nutrientes, siendo los nitratos el contaminante frecuentemente introducido en los sistemas de agua subterránea (Aksever *et al.*, 2016). El límite máximo permisible de NO_3^- para agua de consumo humano es de 50 mg/l (WHO, 2018). Sin embargo, si la concentración de nitrato es superior a 10 mg/l, es indicativo de que el agua subterránea es afectada por factores antrópicos; en condiciones naturales su concentración es menor a 1 mg/l (Aksever, Davraz, & Karagüzel, 2015). Las concentraciones naturales de nitrato en aguas subterráneas bajo condiciones aeróbicas son de unos pocos miligramos por litro, y dependen

del tipo de suelo y la situación geológica (WHO, 2016). Por lo anterior, se puede decir que, en 10 de los 11 sitios de estudio, la concentración de nitratos es debida a su condición natural, mientras que en M1 “Cabezas” (1.01 ± 0.001 mg/l) se puede deber a la cercanía de la población y a la presencia de la estación de bombeo de distribución del agua, sin exceder los límites máximos permisibles.

En cuanto a la contaminación biológica, la presencia de coliformes totales y coliformes fecales es un indicador de la actividad antrópica, así como de las amenazas, impactos y presiones a las que pueden estar sometidos los manantiales en términos de la presencia de una fuente de contaminación, ya sea por aguas residuales, actividades agropecuarias, crecimiento demográfico, actividades recreativas, etcétera (Núñez, Fraile, & Lizarazu, 2009; Silva-García *et al.*, 2016; Murphy, Prioleau, Borchardt, & Hynds, 2017). Los coliformes fecales son uno de los parámetros de calidad del agua más importantes debido a su uso como indicador bacteriano de la contaminación fecal en aguas naturales y, por lo tanto, al estar presentes éstos y otros microorganismos patógenos pueden ocasionar enfermedades (Leite *et al.*, 2018).

De acuerdo con los resultados para coliformes totales en el M2 “Oscuranas 1” se obtuvo un valor de 7 NMP/100 ml, cuyo valor se puede deber a que en este sitio está colocada una bomba que distribuye el agua a casas aledañas, y su ubicación está a unos cuantos metros del camino que conduce a las comunidades circunvecinas. En el M4 “El Cuajo” es donde se encontró el mayor valor de coliformes totales con 28 NMP/100 ml, esto se puede atribuir a la presencia de animales de granja (cerdos), y a la apertura de caminos para la circulación de personas que acuden al manantial. En el M9 “Plan de Juanchilote” se detectaron 21 NMP/100 ml,

lo cual puede atribuirse a la presencia de trabajadores del corte de caña que acuden a este sitio a bañarse, y al escurrimiento de las heces de ganado que existen en uno de los corrales cercanos a dicho manantial.

Namihira-Santillán, Barrera-Escorcía y Márquez-García (2002) atribuyen los valores de coliformes totales (150-6 789 NMP/100 ml) y coliformes fecales (150-21 000 NMP/100 ml) del manantial externo al Lago Huayamilpas, Ciudad de México, al vertimiento intermitente de agua residual doméstica, y a que en los meses de lluvia (junio-septiembre) ocurre el lavado del terreno circundante.

Los manantiales M2 "Ecuranas", M4 "Cuajo" y M9 "Plan de Juan Chilote" no cumplen con el límite permisible de ausente o no detectables para coliformes totales que establece la Norma Oficial Mexicana Modificada NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000), por lo cual es necesario un proceso de potabilización en los mismos antes de consumir el agua que generan. Además, estos manantiales tampoco cumplen con los criterios ecológicos de la calidad del agua (CE-CCA-001/89) para agua potable, que es < 2 NMP de organismos coliformes totales/100 ml.

A pesar de que se determinaron coliformes totales en tres de los manantiales no se detectaron coliformes fecales en ninguno de los manantiales, por lo que cumplen con la Norma Oficial Mexicana Modificada NOM-127-SSA-1994 (SSA, 2000), que establece la ausencia o no detectables para coliformes fecales; sin embargo, en el caso de los microorganismos patógenos, no existe un límite inferior tolerable, por lo que el agua destinada al consumo, preparación de alimentos y bebidas, o higiene personal no debe contener ningún agente patógeno para el ser humano (Rivas-Robles, Espinosa-Niño, Hernández-Cruz, Guzmán-

Monterrosa, & Pérez-Hernández, 2017). Por ello, es importante realizar este tipo de análisis de manera frecuente y monitorear otras fuentes de abastecimiento, sobre todo en aquellos manantiales donde el agua se destina para consumo humano sin ningún tratamiento.

Los manantiales sin explotar están expuestos a la entrada de contaminantes patógenos debido principalmente a la cercanía con granjas domésticas o con terrenos dedicados a la ganadería. Sin embargo, aquellos manantiales que no presentaron contaminación *in situ* pueden ser vulnerables a contaminarse durante el traslado, dado que el agua de algunos de ellos es bombeada a tanques de almacenamiento al aire libre, como en el caso de los manantiales M1 "Cabezas" y M11 "El 20", situados en el centro de la población. De los manantiales estudiados, el 50 % se destina para consumo humano, y el resto desemboca en el humedal natural Ciénega de Tamasopo. Por ello, es aún más importante conocer la calidad de agua, para determinar también los posibles impactos ambientales que podría sufrir este ecosistema. La problemática que enfrentan los manantiales es variada debido a las actividades antrópicas y de agricultura, por lo que es necesario emprender actividades y proyectos para su protección y un buen aprovechamiento, para evitar así su deterioro.

Conclusiones

La calidad del agua de los manantiales que alimentan al humedal natural Ciénega de Tamasopo varía de acuerdo con la localización de cada uno de ellos en la microcuenca, y por las actividades antrópicas asociadas con ellos en las comunidades aledañas al humedal. Algunos de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos determinados en los manantiales rebasaron los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad para agua de consumo humano. Así, es recomendable establecer un plan de manejo de cada manantial para lograr un adecuado uso y distribución del agua a sus poblaciones. Además, es necesario implementar un monitoreo constante para observar la variabilidad de los parámetros fisicoquímicos en diferentes épocas del año y considerar algunos otros parámetros fisicoquímicos para garantizar la calidad del agua que llega a este humedal natural de importancia Ramsar.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), por el financiamiento brindado para la elaboración de la tesis de investigación de posgrado con el número 171739. A los habitantes del Ejido Cabezas, Tamasopo, San Luis Potosí, especialmente al C. Fortunato Landaverde por su apoyo en el muestreo y la localización de manantiales. A la doctora María Luisa Carrillo Inungaray y al químico Carlos Román del Laboratorio de Investigación de Alimentos de la Unidad Académica Multidisciplinaria Zona Huasteca-UASLP por la infraestructura facilitada en la determinación de coliformes totales y fecales.

Referencias

- Aksever, F., Davraz, A., & Bal, Y. (2016). Assessment of water quality for drinking and irrigation purposes: A case study of Başköy springs (Ağlasun/Burdur/Turkey). *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 748.
- Aksever, F., Davraz, A., & Karagüzel, R. (2015). Relations of hydrogeologic factors and temporal variations of nitrate contents in groundwater, Sandıklı Basin, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 73(5), 2179-2196.
- Almazán-Juárez, M. A., Almazán-Juárez, A., Carreto-Pérez, B., Hernández-Castro, E., Damián-Nava, A., & Almazán-Núñez, R. (2016). Calidad y clasificación de usos del agua en la cuenca baja del río Papagayo, Guerrero, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 3, 293-305.
- APHA, American Public Health Association. (1992). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (18th ed.). New York, USA: American Public Health Association.
- Carbajal, J., Sánchez-De-Llanos, J., González, J., Del-Río, O., Gonzalvo, J., García, F., & Gutiérrez, D. (2015). Capítulo 2: Hidrología del Pánuco. En: *Fondo de Agua Metropolitano de Monterrey. México*. Recuperado de <http://famm.mx/wp-content/pdf/capitulo2-hidrologia-del-panuco.pdf>
- Chacón-Chumacero, K. O., Pinedo-Álvarez, C., & Rentería-Villalobos, M. (2016). Evaluación de elementos traza en agua de río y manantial del área minera de Ocampo, Chihuahua, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(4), 375-384. DOI:10.20937/rica.2016.32.04.01

Conanp, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2020). ¿Por qué son importantes los humedales? Disponible en: http://www.conanp.gob.mx/conanp/dominios/ramsar/la_conanp_y_los_humedales.php

Norma Mexicana (2015). Norma 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*, 11 de febrero de 2016, México. DF. Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166147/nmx-aa-042-scfi-2015.pdf>

Norma Mexicana (2001). Norma Mexicana NMX-AA-072-SCFI-2001. Análisis de agua-Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba-(cancela a las NMX-AA-072-1981). *Diario Oficial de la Federación*, México. DF. Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166788/NMX-AA-072-SCFI-2001.pdf>

DOF, Diario Oficial de la Federación. (1989). Criterios ecológicos de calidad del agua. CEE-CCA-001/89. *Diario Oficial de la Federación*, 2 de diciembre, 26-36.

Derso, S., Beyene, A., & Getachew, M. (2015). Assessment of ecological quality of hot springs in the Eastern Amhara Region. *Environmental Systems Research*, 4, 19. Recuperado de <https://doi.org/10.1186/s40068-015-0044-z>

- EPA, Environmental Protection Agency. (2015). *National recommended water quality criteria- Human health criteria table* Recuperado de <https://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-quality-criteria-human-health-criteria-table>
- Guo, M., Li, J., Sheng, C., Xu, J., & Wu, L. (2017). Una revisión de la teledetección de humedales. *Sensores*, 17(4), 777.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2010). *Marco geoestadístico de Ciénega de Cabezas, Tamasopo, San Luis Potosí*. Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Kaur, J., Walia, H., & Mabwoga, S. O. (2017). Water quality monitoring of an international wetland at Harike, Punjab and its impact on biological systems. *Applied Water Science*, 7, 1107-1115. DOI: 10.1007/s13201-015-0347-2
- Kulinkina, A. V., Mohan, V. R., Francis, M. R., Kattula, D., Sarkar, R., & Plummer, J. D. (2016). Seasonality of water quality and diarrheal disease counts in urban and rural settings in south India. *Scientific Reports*, 6, 20521. DOI:10.1038/srep20521
- Leite, N., Stolberg, J., Purin, S., Tavela, A., Safanelli, J., Marchini, H., Exterkoetter, R., & Johnson, M. (2018). Hydrochemistry of shallow groundwater and springs used for potable supply in Southern Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 77. DOI:10.1007/s12665-018-7254-4
- Lintern, A., Webb, J. A., Ryu, D., Liu, S., Bende-Mich, I. U., Waters, D., Leahy, P., Wilson, P., & Western, A. W. (2018). Key factors

- influencing differences in stream water quality across space. *WIREs Water*, 5, (e1260), 31.
- Moreno-Casasola, P. (ed. 2016). *Servicios ecosistémicos de las selvas y bosques costeros de Veracruz*. Xalapa, México: Instituto de Ecología A.C., Organización Internacional de Maderas Tropicales, Comisión Nacional Forestal-Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- Murphy, H. M., Prioleau, M. D, Borchardt, M. A., & Hynds, P. D. (2017) Epidemiological evidence of groundwater contribution to global enteric disease, 1948-2015. *Hydrogeology Journal*, 25(4), 981-1001.
- Musalem, K., Jiménez, F., & McDonald, M. (2014). Application of a rapid assessment tool for integrated watershed management: A case study from La Plata River Basin in South America. *Aqua-LAC*, 5, 31-39.
- Namihira-Santillán, P. E., Barrera-Escorcia, G., & Márquez-García, A. Z. (2002). Contaminación por bacterias fecales en el Lago Huayamilpas, México, D.F. *Hidrobiológica*, 12(2), 129-136.
- Núñez, N., Fraile, I., & Lizarazu, J. (2009). Microorganismos patógenos del agua. Estudio de Molinao Erreka. *Meridies*, (13), 69-76.
- Pérez-Castillo, F. V. (2017). *Dinámica de C, N, P y Fe en agua y sedimentos en el humedal natural Ciénega de Tamasopo, S.L.P.* (tesis de doctorado). Programas Multidisciplinarios de Posgrado en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Pérez-Castillo, F. V., Alfaro-De-la-Torre, M. C., Pérez-Rodríguez, R. Y., & Comín Sebastián, F. A. (2017). Tracing anthropogenic disturbances of a wetland through carbon and nitrogen isotope analyses in

- sediments. *Journal of Natural Resources and Development*, 07, 22-29.
- Pérez-Castillo, F., Alfaro-De-la-Torre, M. C., Briones-Gallardo, R., & Medellín-Milán, P. (2015). Dinámica de nutrientes entre el agua y los sedimentos en el humedal natural Ciénega de Tamasopo, S. L. P. *1er Congreso Iberoamericano sobre sedimentos y ecología*, Querétaro, México.
- Puczko, K., Zieliński, P., & Jusik, S. (2018). Vascular plant and bryophyte species richness in response to water quality in lowland spring niches with different anthropogenic impacts. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, 338. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6703-6>
- Ramos-Herrera, S., Broca-Martinez, L. F., Laines-Canepa, J. R., & Carrera-Velueta, J. M. (2012). Tendencia de la calidad del agua en ríos de Tabasco, México. *Ingeniería*, 16, 207-217.
- Ramsar. (2020). *La importancia de los humedales*. Recuperado de <https://www.ramsar.org/es/acerca-de/la-importancia-de-los-humedales>
- Ramsar Sites Information Service. (2008). *Ciénega de Tamasopo*. Recuperado de <https://rsis.ramsar.org/ris/1814>
- Rivas-Robles, E., Espinosa-Niño, F., Hernández-Cruz, F., Guzmán-Monterrosa, H., & Pérez-Hernández, H. (2017). Caracterización fisicoquímica y bacteriológica del agua subterránea de Villa de Acapetahua (Chiapas, México). *Higiene y Sanidad Ambiental*, 17(3), 1541-1545.

- Rivera-Rodríguez, D. A., Beltrán-Hernández, R. I., & Lucho-Constantino, C. A. (2019). Water quality indices for groundwater impacted by geogenic background and anthropogenic pollution: Case study in Hidalgo, Mexico. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 2201-2214. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1852-2>
- Roy, S., Kumar, B., Chowdhury, A., Singh, U. K., & Ray, S. (2018). Characterization of hydrogeochemical process and evaluation of water quality of seven geothermal springs, Bakreswar, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 314. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3662-8>
- Semarnat, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018) *Estadísticas del agua en México, edición 2018*. Ciudad de México, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua.
- Silva-García, J. T., Ochoa-Estrada, S., Cruz-Cárdenas, G., Nava-Velázquez, J., & Villalpando-Barragán, F. (2016). Manantiales de la cuenca del río Duero Michoacán: operación, calidad y cantidad. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(1), 55-68.
- Singh, N., Kaur, M., & Katnoria, J. (2017). Spatial and temporal heavy metal distribution and surface water characterization of Kanjli Wetland (a Ramsar site), India Using Different Indices. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 99. DOI:10.1007/s00128-017-2194-3

- SSA, Secretaría de Salud. (22 de noviembre, 2000). Modificación a la norma 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. *Diario Oficial de la Federación*. México, DF, México: Secretaría de Salud.
- SSA, Secretaría de Salud. (19 de octubre, 1995). Norma Oficial Mexicana NOM-112-SSA1-1994. Bienes y servicios. Determinación de bacterias coliformes. Técnica del número más probable. *Diario Oficial de la Federación*. México, DF, México: Secretaría de Salud.
- SSA, Secretaría de Salud. (12 de agosto, 1994). Norma Oficial Mexicana NOM-014-SSA1-1993. Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados. *Diario Oficial de la Federación*. México, DF, México: Secretaría de Salud.
- Suhani, I., Monika, Vaish, B., Singh, P., & Singh, R. P. (2020) Restoration, construction, and conservation of degrading wetlands: A step toward sustainable management practices. In: Upadhyay, A. K. *et al.* (eds.). *Restoration of wetland ecosystem: A trajectory towards a sustainable environment*. Recuperado de https://doi.org/10.1007/978-981-13-7665-8_1
- Thakur, N., Rishi, M., & Sharma, D.A. (2018). Quality of water resources in Kullu Valley in Himachal Himalayas, India: Perspective and prognosis. *Applied Water Science*, 8, 20. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0668-z>

WHO, World Health Organization. (2018). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first addendum*. Geneva, Switzerland: World Health Organization.

WHO, World Health Organization. (2016). *Nitrate and nitrite in drinking-water, background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality*. Geneva, Switzerland: World Health Organization Press. Recuperado de https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/nitrate-nitrite-background-jan17.pdf