

Ciencia Nicolaita 85

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Evaluación de la calidad del agua de manantiales ubicados en la comunidad El Platanal, Michoacán, México

Evaluation of the water quality of springs located in the El Platanal community, Michoacán, Mexico

Claudia Alejandra Reyes Toscano*, Ruth Alfaro Cuevas Villanueva, Guadalupe Vázquez Mejía, Raúl Cortés Martínez, Dulce María Bocanegra Ramírez

Para citar este artículo: Claudia Alejandra Reyes Toscano*, Ruth Alfaro Cuevas Villanueva, Guadalupe Vázquez Mejía, Raúl Cortés Martínez, Dulce María Bocanegra Ramírez, 2022. Evaluación de la calidad del agua de manantiales ubicados en la comunidad El Platanal, Michoacán, México. Ciencia Nicolaita no. 85, 53-72. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi85.658>

Historial del artículo:



Recibido: 18 de mayo de 2022

Aceptado: 5 de septiembre de 2022

Publicado en línea: septiembre de 2022



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: crevest006@alumno.uaemex.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Evaluación de la calidad del agua de manantiales ubicados en la comunidad El Platanal, Michoacán, México

Evaluation of the water quality of springs located in the El Platanal community, Michoacán, Mexico

Claudia Alejandra Reyes Toscano^{1*}, Ruth Alfaro Cuevas Villanueva², Guadalupe Vázquez Mejía³, Raúl Cortés Martínez⁴, Dulce María Bocanegra Ramírez²

¹Universidad Autónoma del Estado de México, Doctorado en Ciencias Ambientales

²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra

³Universidad Autónoma del Estado de México, Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua

⁴Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Químico Farmacobiología

Resumen

Se evaluó la calidad del agua de seis manantiales que abastecen de agua potable y riego agrícola a la comunidad El Platanal, perteneciente al municipio de Jacona, Michoacán. Se realizaron dos campañas de colecta, la primera en mayo (estiaje) y la segunda en noviembre (precipitación pluvial). Se evaluaron algunos parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y elementos traza. El tipo de agua predominante en la zona de estudio, según lo establecido por el diagrama de Piper y las concentraciones de los iones mayoritarios, fue bicarbonatada-cálcica ($\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$), cuyo posible origen sea consecuencia del material geológico y a la interacción agua-roca. Se encontraron concentraciones de hierro (Fe) (0.8 mg/L) superiores a los límites máximos permitidos por las normas mexicanas para agua potable. El sitio S6 presentó las concentraciones más elevadas de algunos parámetros (nitratos (NO_3^-), fosfatos (PO_4^{3-}), coliformes fecales). El cálculo del Índice de Calidad del Agua (ICA) mostró que el agua en el área de estudio podría no ser apta para uso potable, pero sí para riego agrícola.

Palabras clave: especiación química, diagrama de Piper, río Duero, ICA, distribución espacial



Abstract

We evaluated the water quality of six springs that supply drinking water and agricultural irrigation of the El Platanal community, Jacona City, Michoacán. Two sampling campaigns were carried out, on May (dry season) and the second one in November (wet season). Physicochemical and microbiological parameters and trace elements were evaluated. The predominant type of water in the area, according to Piper diagram and mayor ions concentration was calcium bicarbonate ($\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$), which may be cause due to geological conditions and wáter-rock interactions. Above permissible Iron (Fe) concentrations (0.8 mg/L) were found according to Mexican standards for drinking water. The site S6 presented the highest concentrations of some parameters like nitrates (NO_3^-), phosphates (PO_4^{3-}), fecal coliforms. The Water Quality Index (WQI) showed that the water in the study area is not suitable for drinking, but it is suitable for agricultural irrigation.

Keywords: chemical speciation, Piper diagram, Duero River, WQI, spatial distribution

1. Introducción

Los manantiales juegan un papel importante en el suministro de agua superficial en las cuencas, ya que es utilizada para diversas actividades humanas (domésticas, agrícolas, industriales) (Dumaru *et al.*, 2021). La calidad de sus aguas varía según la ubicación geográfica y los factores ambientales, como la composición química de las rocas, las precipitaciones y la formación del suelo, así como factores antropogénicos. Por esta razón, el monitoreo y la conservación de estas fuentes son necesarias para conseguir una gestión adecuada del agua (Ameen *et al.*, 2019).

El estudio de la química del agua permite conocer los procesos que controlan su composición y ayudan a definir su idoneidad para cualquier uso (Gaikwad *et al.*, 2019). Por otro lado, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas que complementan los estudios de calidad del agua mediante la interpolación de datos obtenidos y, posteriormente, plasmados en mapas de distribución espacial con la finalidad de identificar zonas posibles de contaminación (Reyes *et al.*, 2020). Otra herramienta valiosa en los estudios de calidad del agua es el cálculo del Índice de Calidad del Agua (ICA), el cual engloba algunos parámetros y, a través de fórmulas matemáticas, proporciona un valor que especifica, de manera general, el grado de contaminación en la zona de estudio (Nnorom *et al.*, 2019).

La cuenca del río Duero, ubicada al noroeste del estado de Michoacán, ha experimentado cambios sustanciales en términos del uso de la tierra debido

al crecimiento urbano y al desarrollo de diversas actividades (CONAGUA, 2020). El Platanal, una comunidad localizada al norte del municipio de Jacona, Michoacán, colindante con el río Duero, se caracteriza por abastecerse de agua de seis manantiales para uso potable y agrícola. Por otra parte, en esta zona, la mayoría de los asentamientos son irregulares, es decir, no cuentan con instalaciones sanitarias adecuadas para las descargas de aguas residuales domésticas y las actividades agrícolas no han desarrollado alternativas de mejoras con respecto a las escombreras, por ello, fue de vital importancia conocer las características del agua en mención.

El objetivo de esta investigación estuvo centrado en evaluar la calidad del agua de seis manantiales que abastecen a la comunidad de El Platanal a través de una caracterización fisicoquímica, bacteriológica y de elementos traza, con el apoyo de herramientas digitales como SIG e ICA para una mejor comprensión del comportamiento químico del agua.

2. Materiales y métodos

2.1. Localización del área de estudio

La comunidad denominada El Platanal, se encuentra ubicada al norte del municipio de Jacona, en la región del bajío del estado de Michoacán y a 6 km de la cabecera municipal, entre las coordenadas $19^{\circ}55'53''$ y $102^{\circ}15'17''$ a una altitud de 1,597 m s.n.m. Colinda al norte con Zamora y al oeste con Tangancícuaro (Figura 1). Esta comunidad se caracteriza por estar ubicada en las faldas de los cerros de La Beata y La Beata. Cuenta con una población aproximada de 3,045

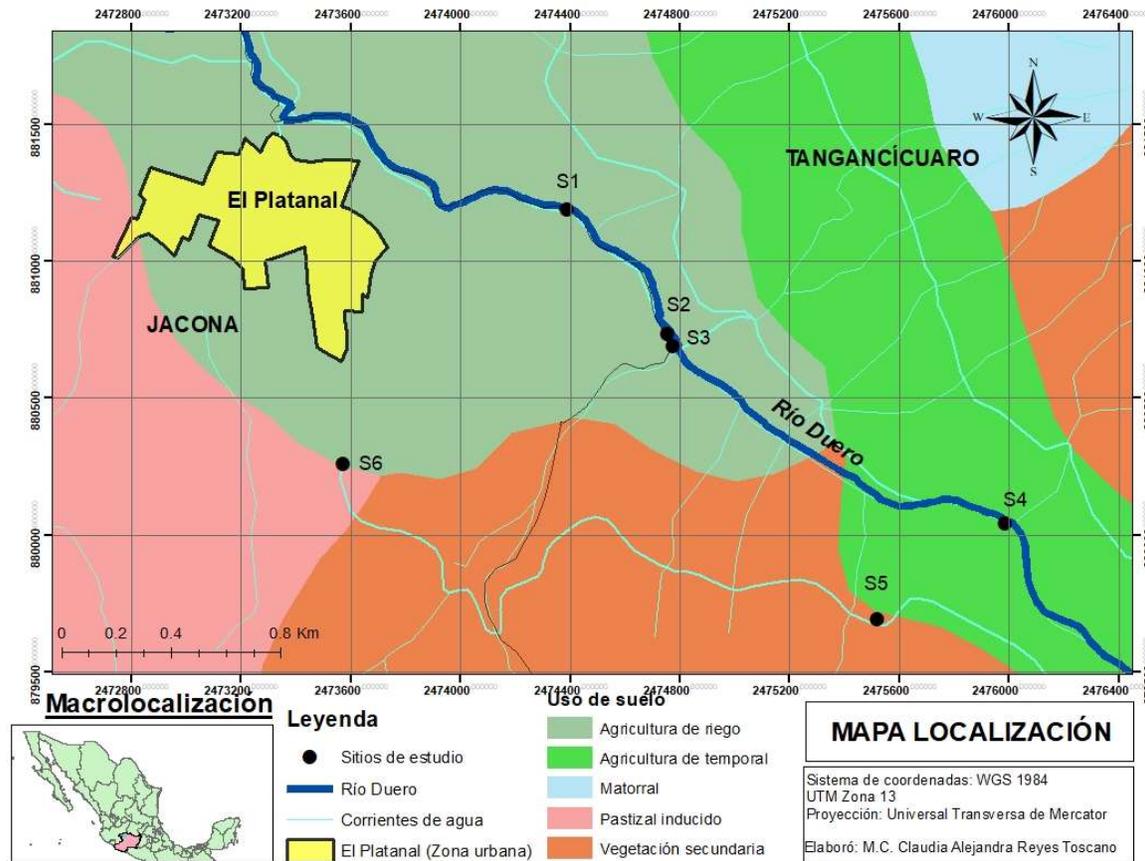


Figura 1. Mapa de usos de suelo de la zona de estudio.

habitantes. Los suelos del área corresponden principalmente al tipo chernozem, siendo principalmente su uso agrícola y ganadero. Respecto a su hidrología, esta población colinda al norte con el río Duero, principal cuerpo de agua de la región y al sureste con seis manantiales, los cuales son utilizados para uso potable, agrícola y ganadero (INEGI, 2020).

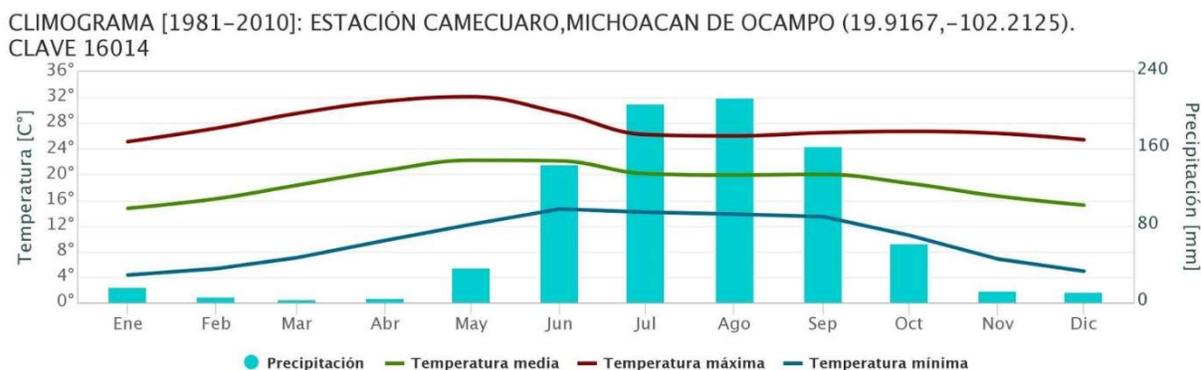
2.2. Geología

La comunidad de El Platanal está localizada en la subprovincia de “Zonas de Fosas Tectónicas”, ubicada al noroeste del estado de Michoacán; presenta una constante actividad volcánica, reflejada por sus innumerables aparatos volcánicos y rocas extrusivas, conformadas esencialmente por rocas basálticas y andesíticas. Cuenta con altitudes entre 1,590 y 1,690 m.s.n.m., desarrollada en una antigua cuenca lacustre. En las sierras que rodean este poblado afloran los basaltos del Cuaternario, subyaciendo a rocas volcánicas de menor permeabilidad. Los depósitos aluviales que forman los manantiales se caracterizan

por presentar un nivel de permeabilidad y capacidad de infiltración muy alto, por lo tanto, son excelentes receptores de recarga de lluvias y afloramiento de los acuíferos (CONAGUA, 2020).

2.3. Climatología

Según la clasificación de los climas de Köppen, modificada por García (1964), quien lo adaptó a las condiciones de México, la zona de estudio presenta un clima C(w1) templado subhúmedo, con una temperatura media anual de 23 °C, una temperatura máxima de 32 °C y una temperatura mínima de 4 °C. Además, presenta un intervalo de precipitación anual entre 5 y 220 mm, siendo marzo el mes que reporta la menor precipitación y agosto el mes que muestra la mayor cantidad. Asimismo, el porcentaje de precipitación pluvial invernal oscila entre el 5 y 10.2% del total anual (SMN, 2022). En la figura 2 se presenta un climograma de la estación Camécuaro, la cual corresponde a la comunidad de El Platanal.



Los datos se han descargado de: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/climogramas-1981-2010>

Figura 2. Climograma (1981-2010). Estación Camécuaro, Michoacán de Ocampo. (19.9167, -102.2125). (SMN, 2022).

2.4. Colecta de muestras

Se colectaron muestras en seis manantiales representativos de la zona de estudio, localizados en la cercanía del río Duero, en zonas agrícolas, ganaderas y que sirven como suministro de agua potable y riego agrícola para la comunidad. En el cuadro 1 se presentan las coordenadas geográficas de estos puntos.

La colecta de muestras se llevó a cabo, en mayo de 2019 (estiaje) y otra en noviembre del mismo año (precipitación pluvial). En cada sitio se tomaron 2 L de muestra para la determinación de parámetros fisicoquímicos y 120 mL para análisis de elementos traza. En ambos casos se utilizaron recipientes de HDPE (Polietileno de Alta Densidad), los cuales se llenaron para minimizar la presencia de aire y evitar posibles cambios químicos (DOF, 2002). Por su parte, la colecta de muestras para los elementos traza se llevó a cabo en recipientes de polietileno de 125 mL, previamente descontaminados con ácido nítrico (HNO₃) y llenados con agua desionizada. En cada sitio se preparó un control en el que se vació y se volvió a llenar con agua desionizada. Otra botella se llenó con la

muestra colectada. Todas las botellas se preservaron con HNO₃ concentrado. Finalmente, las muestras de coliformes fecales fueron tomadas en bolsas de plástico estériles, las cuales se mantuvieron en refrigeración (4 °C) hasta su análisis.

2.5. Técnicas de medición

El pH, la conductividad eléctrica y el oxígeno disuelto fueron medidos en campo con un potenciómetro de la maleta de campo (Thermo Scientific Orion®, modelo Star A329). El potencial redox también fue medido en campo con el mismo electrodo de hidrógeno. La temperatura se midió con un termómetro de inmersión (Brannan) en cada sitio de estudio. Se determinaron parámetros fisicoquímicos como dureza total (DOF, 2001a), sólidos disueltos totales (SDT) (DOF, 2015a) y alcalinidad total (DOF, 2001b), mientras que los cationes mayoritarios se determinaron en el Espectrómetro de Absorción Atómica (EAA) (Perkin Elmer AAnalyst 200): Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, los aniones mayoritarios como Cl⁻ (DOF, 2001c), SO₄²⁻ (DOF, 2014), HCO₃⁻, CO₃²⁻, PO₄³⁻ (DOF,

Cuadro 1. Localización de los manantiales de estudio en El Platanal, Michoacán.

Sitio	Coordenadas geográficas
S1	19°55'55.3440" N 102°14'43.8135" W
S2	19°55'40.5084" N 102°14'31.0808" W
S3	19°55'39.0900" N 102°14'30.4335" W
S4	19°55'06.5640" N 102°14'04.5877" W
S5	19°55'18.0264" N 102°13'48.6007" W
S6	19°55'24.9348" N 102°15'11.8498" W

2001d) y NO₃⁻ (DOF, 2001e), se determinaron conforme a la metodología propuesta en las normas mexicanas respectivas y los coliformes fecales a través de la técnica de Número Más Probable (NMP/ 100 mL) (DOF, 2015b), los cuales se analizaron en el Laboratorio de Calidad del Agua de la Dirección de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en Michoacán, aplicando técnicas analíticas de potenciometría, volumetría y espectrometría de absorción atómica, siguiendo las recomendaciones establecidas por la normatividad mexicana. Los elementos traza: arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), hierro (Fe), níquel (Ni) y plomo (Pb), fueron determinados en un EAA (Perkin Elmer AAnalyst 200®) en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

A partir de los resultados sobre la caracterización fisicoquímica del agua, se realizó una modelación de la especiación química de los elementos traza encontrados mediante el programa Visual Minteq 3.1 y se construyeron diagramas de Piper y Schöeller con el programa AquaChem 10 para conocer las facies hidroquímicas del agua de estudio. Adicionalmente, se calcularon diversos índices para conocer la idoneidad del agua utilizada para riego agrícola, como Relación de Adsorción de Sodio (RAS) (Bashir *et al.*, 2020), porcentaje de sodio (% Na) (Setia *et al.*, 2021), índice de Kelly (IK) (Setia *et al.*, 2021), carbonato de sodio residual (CSR) (Shil *et al.*, 2019) y riesgo por salinidad (RS) (Zhang *et al.*, 2020). Se calculó el ICA propuesto por Montoya *et al.* (1997) y aprobado por la CONAGUA, con la finalidad de conocer la conveniencia de esta agua para uso potable. Por último, se realizaron mapas de distribución espacial de los valores obtenidos del ICA a través del programa ArcGis 10.6.1.

El balance de iones es la verificación de que la suma de miliequivalente (meq) de aniones es aproximadamente igual a la suma de meq de cationes; esto último aprovechando la electroneutralidad del agua, propiedad que puede distorsionarse si existen ciertos fenómenos. El error que resulta de dicho balance se expresa por la diferencia de iones: si el error es negativo, significa que hay exceso de aniones y si es positivo, es porque hay exceso de cationes. Se considera aceptable un error menor o igual al 10 % (Alfaro, 2000).

$$\% \text{ Error} = \frac{\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones}}{\sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones}} \times 100$$

2.6. Índice de Calidad del Agua

El Índice de Calidad del Agua (ICA) es un valor adimensional que refleja la calidad general del agua en el mismo tiempo y ubicación en función de los diferentes parámetros analizados. Su objetivo principal es convertir datos complejos de parámetros físicos, químicos y biológicos en datos utilizables y manejables (Bashir *et al.*, 2020). Para calcular el ICA en los manantiales, se aplicó el procedimiento propuesto por Montoya *et al.* (1997) en su estudio sobre aguas superficiales del estado de Jalisco-México. Actualmente este es el más utilizado en México y autorizado por la CONAGUA para aplicarlo en cuerpos de agua superficial para uso potable:

- i. Este ICA convierte los datos físicos en correspondientes índices de calidad por parámetro (*I_i*), mediante la formulación de modelos matemáticos asignados a cada uno de ellos, tal y como se muestra en el cuadro 2.
- ii. Algunos parámetros son más significativos que otros en la calidad del agua, por ello la modelación de este ICA incluye pesos o ponderaciones (*W_i*), según su orden de importancia respectivo.
- iii. Finalmente, los índices por parámetro son promediados a fin de obtener el ICA de la muestra de agua, con la siguiente ecuación:

$$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n (I_i * W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

(Montoya *et al.*, 1997)

Donde:

ICA = Índice de Calidad del Agua (0 < ICA < 100)

I_i = Función subíndice del parámetro *i*, 0 < *I_i* < 100

W_i = Peso de importancia del parámetro (ponderación) *i*, 0 < *W_i* < 5

n = Número de parámetros empleados

En el cuadro 3 se muestran los intervalos del grado de contaminación de acuerdo con los resultados obtenidos del cálculo del ICA.



Cuadro 2
Modelos matemáticos y ponderación del ICA (Montoya, *et al.*, 1997).

No.	Parámetro	Ecuación del parámetro	Ponderación
1	Oxígeno disuelto	$I = \frac{(100)(OD)}{14.492 - 0.384 T + 0.064 T^2}$	5
2	Coliformes fecales	$I = 97.5(5xCF)^{0.270}$	4
3	Conductividad eléctrica	$I = 540(CE)^{-0.379}$	1
4	Cl ⁻	$I = (Cl^-)^{0.270}$	0.5
5	Dureza total	$I = 10^{1.974 - [0.00174 \cdot Dur]}$	1
6	Alcalinidad	$I = 105(Alc)^{-0.185}$	0.5
7	pH<7	$I = 10^{0.2336 + 0.440(pH)}$	1
	pH=7	$I = 100$	1
	pH>7	$I = 10^{[4.22 - 0.293(pH)]}$	1
8	SDT	$I = 109.1 - 0.0175(SDT)$	0.5
9	PO ₄ ³⁻	$I = 34.215 (PO_4^{3-})^{-0.460}$	2
10	NO ₃ ⁻	$I = 62.2(NO_3^-)^{-0.343}$	2

2.7 Indicadores de Calidad del Agua para riego agrícola

La idoneidad del agua para riego agrícola depende de las propiedades físicas y químicas del agua, especialmente de los iones disueltos (Nofal *et al.*, 2019). Para ello, se calcularon los siguientes índices (ver Cuadro 4).

3. Resultados y discusión

3.1. Parámetros de campo

Los valores de pH obtenidos de los manantiales variaron entre 6.8 y 7.9 en la temporada de estiaje y

de 6.9 a 7.7 en temporada de precipitación pluvial. Se observa una ligera tendencia alcalina en la mayoría de los sitios, probablemente por la mineralización del agua. En las dos colectas, todos los valores se encontraron dentro de los límites máximos permitidos por la normatividad mexicana, tanto para uso potable (DOF, 2021a) como para riego agrícola (DOF, 2021b).

La temperatura del agua varió entre 22 °C (S5) y 24 °C (S1) en la colecta de mayo, mientras que en la de noviembre, el intervalo se observó entre 20 °C (S5) y 22 °C (S1). El descenso de temperatura que se

Cuadro 3
Clasificación del Índice de Calidad del Agua (Montoya *et al.*, 1997).

ICA	Criterio general
85-100	No contaminado
75-85	Aceptable
55-75	Poco contaminado
35-55	Contaminado
0-35	Altamente contaminado

Cuadro 4
Resumen de indicadores de calidad de agua para riego agrícola.

Índice	Fórmula	Límites
Relación de Adsorción de Sodio (RAS) (Rouhani, <i>et al.</i> , 2021)	$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Mg^{2+} + Ca^{2+}}{2}}}$	<10 Excelente 10-18 Buena 18-26 Dudable >26 Inadecuada
Porcentaje de Sodio (% Na) (Singh <i>et al.</i> , 2019)	$\%Na = \frac{Na^+ \times 100}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+}$	<040 Buena 40-60 Permissible 60-80 Dudable >80 Inadecuada
Carbonato de Sodio Residual (meq/L) (CSR) (Setia <i>et al.</i> , 2021)	$CSR = (CO_3^{2-} + HCO_3^-) - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$	<1.25 Segura 1.25-2.5 Moderada >2.5 Inadecuada
Índice de Kelly (IK) (Machender <i>et al.</i> , 2014)	$IK = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$	KI <1 Aceptable KI > 1 Exceso de sodio KI < 2 Deficiencia de sodio
Riesgo por Salinidad (RS) (Gnanachandrasamy <i>et al.</i> , 2015)	Conductividad eléctrica	<250 Excelente o baja 250-750 Buena o media 750-2250 Permissible o alta 2,250-5,000 Inadecuada

observó en el segundo periodo, posiblemente se debió al clima de la región derivado de la época del año. El agua de esta zona no es considerada de origen termal, por lo que no rebasa los límites máximos establecidos por la normatividad mexicana para uso agrícola. Wong *et al.* (2021) mencionaron, en una investigación similar, que la temperatura de los manantiales analizados en la ciénega de Tamasopo, en San Luis Potosí, México, depende en ocasiones únicamente del clima de la zona y de la temporada del año.

La conductividad eléctrica en el área de estudio se encontró en un intervalo de 196.8 a 220 μ S/cm en la temporada de precipitación pluvial, en tanto que en la temporada de estiaje, se incrementó de 200 a 254 μ S/cm, en donde el sitio S5 fue el que presentó los menores valores y S6 los mayores. Este parámetro indicó la presencia de iones en todos los sitios de estudio. Los valores más bajos se presentaron en la temporada de precipitación pluvial, posiblemente por la disminución en la concentración de iones disueltos

en las aguas superficiales analizadas en toda el área de estudio por efecto de las lluvias.

En la zona de estudio se observaron valores positivos de potencial redox, en un intervalo 169 a 191.5 mV en mayo, al tiempo que en noviembre los valores variaron entre 171 y 191.1 mV. El sitio que presentó el valor mínimo fue el S4 y el valor máximo S1 en las dos campañas de colectas, es decir, que reflejan ambientes oxidantes, de tal manera que, favorecen la presencia de sulfatos y nitratos en las aguas de los manantiales.

Los resultados muestran una disminución en la concentración de oxígeno disuelto (O₂) en la temporada de estiaje, posiblemente por el aumento de la temperatura del agua de manantial y por el consumo de oxígeno por parte de los microorganismos. El sitio que presentó las mayores concentraciones fue el S5 (6.56 mg/LO₂), el cual también mostró las más bajas temperaturas, por el contrario, el más bajo en concentraciones fue el S4 (4.92 mg/LO₂) y el que mostró las temperaturas más elevadas. Los resultados de este parámetro fueron menores en comparación con

**Cuadro 5**

Resultados de los parámetros medidos en campo en las dos campañas de colectas en el río Duero. NOM-127 = NOM-127-SSA1-2021; = NOM-001-SEMARNAT-2021

Sitio	Colecta	pH	Potencial rédox (mV)	Temperatura (°C)	Conductividad eléctrica (µS/cm)	Oxígeno disuelto (mg/L)
S1	may-19	6.8	191.5	24	206	5.85
	nov-19	6.9	191.1	22	202	5.92
S2	may-19	7.7	178	23	206	5.71
	nov-19	7.3	176	22	204	5.84
S3	may-19	7.1	187.1	23	217	5.89
	nov-19	7.4	186.8	21	216	5.93
S4	may-19	7.9	169.1	24	203	5.41
	nov-19	7.8	171	21	199	5.54
S5	may-19	7.6	184	22	200	6.17
	nov-19	7.6	183.4	20	196	6.56
S6	may-19	7.3	190.2	23	254	4.92
	nov-19	7.6	190.3	21	220	5.09
NOM-127		6.5-8.5	-	-	-	-
NOM-001		6-9	-	35	-	-

los obtenidos por Silva *et al.* (2016) en manantiales ubicados en la cuenca alta del río Duero, seguramente porque estos sirven como fuente de descarga de aguas residuales domésticas, lo cual afecta la calidad del agua de estos cuerpos.

Se muestran en el cuadro 5 los resultados de los parámetros de campo.

3.2. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos

En el área de estudio se encontraron valores de SDT entre 236.16 mg/L (S5) y 264 mg/L (S6) en la temporada de estiaje, mientras que en precipitación pluvial se encontraron entre 97.2 mg/L (S4) y 121.8 mg/L (S6). Esto establece que, probablemente, todos los sitios de estudio contienen una variedad de iones disueltos de manera natural que varían según las regiones geológicas (Abdalla *et al.*, 2012). Se observa una disminución en la concentración en la colecta de noviembre con respecto a la de mayo, esto pudiera deberse a la dilución de los iones en el agua producto de la precipitación pluvial de la temporada. Los resultados de SDT no superan los límites máximos establecidos por la normatividad nacional e internacional de 1,000 mg/L para uso potable (DOF, 2021a). Estos

valores son más bajos que los reportados por Chacón *et al.* (2016) en manantiales del distrito de Ocampo en Chihuahua, quizás por el desarrollo de la actividad minera que se realiza en esa zona.

Las concentraciones de dureza total entran dentro de los límites máximos permisibles de la normatividad mexicana para uso potable (DOF, 2021). Los valores se observan en un intervalo de 67.6 mg/L (S1) hasta 80.6 mg/L (S6) en la primera colecta (mayo); en la segunda colecta (noviembre) es entre 29.3 mg/L (S1) y 45 mg/L (S6). Se puede determinar que el agua en los sitios de estudio es blanda (<50 mg/L) y que no representa problema alguno para las actividades domésticas ni agrícolas.

En los manantiales analizados se encontraron concentraciones de alcalinidad con un mínimo de 118 mg/L (S1) y un máximo de 126 mg/L (S6) en la primera campaña, en tanto que en la segunda se encontraron valores entre 96 mg/L (S3) y 105 mg/L (S6); el sitio S6 registró el valor más alto de este parámetro. En esta investigación se puede apreciar un comportamiento similar entre la alcalinidad y la dureza total, por lo que se puede inferir la presencia, principalmente, de sales bicarbonatadas de calcio (Ca²⁺) y

la disminución de estos dos parámetros en la temporada de precipitación pluvial debido a la dilución. Los valores encontrados en estos sitios son inferiores en comparación con una investigación realizada por Ameen (2019) en manantiales de Bala Barwari, en Iraq, en los que se expuso que el agua de estos cuerpos hídricos es apta para uso potable, a pesar de colindar con zonas agrícolas.

En la primera colecta se observó la presencia de coliformes fecales en un intervalo de 1.1×10^3 NMP/100 mL (S3) a 1.1×10^5 NMP/100 mL (S6), al tiempo que en la segunda se observaron valores entre 9×10^3 NMP/100 mL (S3) y 2.4×10^5 NMP/100 mL (S6), lo que permite suponer que todos los manantiales presentaron contaminación de origen fecal. Dado que este parámetro es un indicador de la actividad humana, se considera que los cuerpos de agua están sometidos a amenazas e impactos provocados por las múltiples descargas de aguas residuales, actividades agrícolas y ganaderas, entre otras. Wong *et al.* (2021) también estudiaron la contaminación microbiológica de algunos manantiales en Tamasopo, San Luis Potosí, México, en los que se detectó el vertimiento intermitente de agua residual doméstica,

principalmente en los meses de precipitación pluvial, por ello el incremento de estos valores en esa temporada, tal y como se puede observar en los manantiales de El Platanal.

A continuación, se muestran en el cuadro 6 los resultados de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

3.3. Iones Mayoritarios

El Ca^{2+} se visualizó en un intervalo entre 26.3 mg/L (S1) y 42.67 mg/L (S6) en la campaña realizada en la temporada de estiaje. En época de precipitación pluvial hubo una disminución en la concentración de este catión en la que el valor mínimo fue 12.4 mg/L (S1) y el máximo 20.045 mg/L (S6), lo cual es posible que haya ocurrido por la dilución, producto de la temporada de precipitación pluvial. El Ca^{2+} fue el catión predominante en todos los sitios de estudio, posiblemente por el intemperismo de las formaciones basálticas de la zona y por la meteorización de bicarbonatos y silicatos (Velázquez *et al.*, 2010).

El Mg^{2+} se observó en un intervalo de 7.68 mg/L (S4) y 10.66 mg/L (S6) durante la primera campaña;

Cuadro 6
Resultados de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de las dos campañas de colectas
NOM-127 = NOM-127-SSA1-2021; = NOM-001-SEMARNAT-2021

Sitio	Campaña de colectas	SDT (mg/L)	Alcalinidad total (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Coliformes fecales (NMP/100 mL)
S1	may-19	243.48	118	67.60	2.6×10^3
	nov-19	98.60	98	29.30	2.3×10^4
S2	may-19	245.64	118	73.60	2.3×10^4
	nov-19	98.50	104	29.30	2.3×10^4
S3	may-19	259.20	122	75.60	1.1×10^3
	nov-19	103.70	104	33.80	9×10^3
S4	may-19	239.52	124	69.80	8.6×10^3
	nov-19	97.20	96	29.30	1.5×10^4
S5	may-19	236.16	120	70.80	1.6×10^4
	nov-19	98.80	97	29.30	4.3×10^4
S6	may-19	264.00	126	80.60	1.1×10^5
	nov-19	121.80	105	45.00	2.4×10^5
NOM-127		1,000	-	500	No detectable
NOM-001		-	-	-	-

en la segunda se encontraron valores entre 3.54 mg/L (S4) y 8.76 mg/L (S6).

En la primera campaña se visualizaron concentraciones de Na^+ con un mínimo de 4.91 mg/L (S1) y un máximo de 17.34 mg/L (S6), mientras que, en la segunda campaña se obtuvieron resultados entre 2.55 mg/L (S1) y 8.76 mg/L (S6). Sus concentraciones no rebasaron los límites máximos permisibles por la normatividad nacional para uso potable.

Respecto al K^+ , los valores obtenidos se observaron en un intervalo entre 2.69 mg/L (S1) y 8.96 mg/L (S6) en la primera colecta de muestras, y en la segunda, se encontraron valores entre 1.03 mg/L (S1) y 4.91 mg/L (S6). El origen de este catión probablemente es natural, debido a que es el resultado de la meteorización química y la posterior disolución de iones de silicato contenidos en las arcillas (Redwan *et al.*, 2016).

El orden de abundancia conforme a la concentración de los cationes en la zona de estudio fue el siguiente: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$, coincidiendo con los resultados mostrados por Reyes *et al.* (2020) y Silva *et al.* (2013), quienes estudiaron cuerpos de agua pertenecientes a la misma cuenca que El Platanal.

El HCO_3^- juega un papel importante en la alcalinidad y en la dureza total; fue el anión predominante en la zona de estudio, su presencia posiblemente se debe a un proceso de disolución de las rocas, principalmente calizas, comunes en la región, lo que provoca un aumento en el pH de forma natural. En la temporada de estiaje, el intervalo de concentraciones varió entre de 143.52 mg/L (S2) y 153.54 mg/L (S6); en precipitación pluvial fue de 116.75 mg/L (S4) hasta 127.84 mg/L (S6).

Los CO_3^{2-} se observaron en un rango entre 0.04 mg/L (S1) y 0.64 mg/L (S4) en la temporada de estiaje, en tanto que en la temporada de precipitación pluvial el intervalo varió entre 0.04 mg/L (S1) y 0.36 mg/L (S4).

Las concentraciones de los SO_4^{2-} oscilaron en un intervalo de 2.92 mg/L (S2) y 4.28 mg/L (S6) en el primer muestreo, al tiempo que en el segundo varió entre 2.92 mg/L (S2) y 4.28 mg/L (S6), por lo que no excede los límites máximos permisibles de las normas nacionales e internacionales para uso potable. Su presencia en concentraciones bajas puede ser de origen geogénico, así lo demostró Wong *et al.* (2021) en el estudio realizado en los manantiales de Tamasopo,

donde explicaron que la presencia de este anión, en concentraciones menores a 10 mg/L, es de origen natural. Además, se considera como un nutriente importante y el segundo anión predominante.

Los Cl^- se encuentran en todas las aguas naturales en concentraciones variables y, generalmente, predominan en aguas subterráneas y no en superficiales. En los sitios de estudio se visualizaron en la temporada de estiaje en valor mínimo de 3.81 mg/L (S3) y un máximo de 7.01 mg/L (S1) y en precipitación pluvial se presentó un intervalo de valores de 4.6 mg/L (S1) a 20.3 mg/L (S3), los cuales no rebasaron los límites máximos permisibles de la normatividad mexicana para uso potable.

Los PO_4^{3-} presentaron en temporada de estiaje concentraciones entre 0.18 mg/L (S1) y 5.6 mg/L (S6) y en temporada de precipitación pluvial entre 0.11 mg/L (S1) y 4.1 mg/L (S6); el sitio S6 mostró las mayores concentraciones.

Los NO_3^- se presentaron en temporada de estiaje en concentraciones entre 1.15 mg/L (S3) y 7.4 mg/L (S6); en temporada de precipitación pluvial el intervalo varió entre 1.09 (S3) y 6.1 mg/L (S6), mostrando una ligera disminución. Estos resultados no rebasaron los límites máximos permisibles por la normatividad mexicana para uso potable. El sitio S6 fue el que presentó las mayores concentraciones de NO_3^- . La presencia de este anión indica, probablemente, que la materia orgánica se encuentra presente en los sitios de estudio. Aksever *et al.* (2016) obtuvieron concentraciones menores de nitratos en manantiales de Başköy, Turquía, en comparación con los hallados en los manantiales de El Platanal, asociándolos a las condiciones naturales de la zona, debido a que en concentraciones mayores a 10 mg/L, empieza a ser un indicativo de la actividad antropogénica.

El orden de abundancia conforme a la concentración encontrada de los aniones en los sitios de estudio fue el siguiente: $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{PO}_4^{3-}$.

Los resultados de los iones mayoritarios analizados Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} y Cl^- , se presentan en el cuadro 7.

3.4. Elementos traza

El Fe y As estuvieron presentes en todos los sitios de estudio, mientras que los elementos traza como Cr, Cd, Ni, Pb, no fueron detectados. Los resultados se muestran en el cuadro 8.

Cuadro 7

Resultados de los cationes y aniones mayoritarios medidos en las dos campañas de colectas, expresado en mg/L y el balance iónico (porcentaje). NOM-127 = NOM-127-SSA1-2021; = NOM-001-SEMARNAT-2021

Sitio	Campaña		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Balance iónico
	de colectas												
S1	may-19		26.30	8.19	4.91	2.69	3.30	7.01	143.91	0.04	1.58	0.18	-7.8
	nov-19		12.40	4.05	2.55	1.03	2.00	4.60	119.51	0.04	1.47	0.11	-9.6
S2	may-19		39.70	7.84	12.07	6.37	2.92	5.93	143.52	0.43	1.94	0.29	9.5
	nov-19		18.11	3.99	6.47	4.69	3.00	13.80	126.75	0.12	1.76	0.23	8.4
S3	may-19		38.61	9.34	13.43	6.98	3.73	3.81	148.73	0.11	1.15	0.34	3.69
	nov-19		19.20	4.13	7.39	3.85	4.00	20.30	126.72	0.15	1.09	0.27	-9.64
S4	may-19		31.94	8.97	8.11	4.22	3.05	5.45	150.65	0.62	1.36	0.44	1.01
	nov-19		16.90	4.86	4.13	2.06	4.00	10.10	116.75	0.36	1.20	0.33	-5.68
S5	may-19		33.26	7.68	11.63	5.69	3.24	5.93	146.08	0.31	1.54	0.38	4.89
	nov-19		17.33	3.54	5.96	3.41	3.00	6.50	118.05	0.28	1.43	0.26	-6.37
S6	may-19		42.67	10.66	17.34	8.96	4.28	6.01	153.54	0.18	7.40	5.60	4.98
	nov-19		20.05	4.97	8.76	4.91	17.00	9.20	127.84	0.25	6.10	4.10	-6.19
NOM-127			-	-	200	-	400	250	-	-	10	-	
NOM-001			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Los valores de Fe se encontraron en un intervalo entre 0.0013 mg/L (S3) y 0.8 mg/L (S6) en la temporada de estiaje, mientras que en la temporada de precipitación pluvial alcanzó un intervalo entre 0.0029 mg/L (S3) y 0.7 mg/L (S6). El sitio S6 sobrepasó el límite máximo permitido por la normatividad nacional para uso potable (DOF, 2021a), quizás por la presencia de ferrobacterias, las cuales absorben el oxígeno disuelto de las aguas superficiales, lo que coincide con los valores de oxígeno disuelto, en donde el sitio S6 presentó las más bajas concentraciones de este parámetro en las dos colectas de muestras. La presencia de este elemento traza puede deberse también al ferromagnesio contenido de manera natural en las rocas de la zona (Velázquez *et al.*, 2010).

El intervalo de valores de As en la primera colecta fue de 0.6 µg/L (S3) a 6 µg/L (S6) y en la segunda fue 0.3 µg/L (S3) a 5.5 µg/L (S6). El manantial que presentó la concentración más elevada de este elemento en las dos colectas de muestras fue el S6, pero no sobrepasó el límite máximo permitido por la

normatividad mexicana para uso potable (DOF, 2021a) y agrícola (DOF, 2021b). La presencia de este elemento traza en la zona de estudio puede estar asociada a su contenido en rocas piroclásticas de manera natural, debido al proceso de meteorización de rocas volcánicas; así lo demostraron Mancilla *et al.* (2011) en su investigación sobre la presencia de elementos traza en manantiales de Puebla y Veracruz, donde encontraron concentraciones de As en un intervalo entre 1 y 80 µg/L, sin rebasar el límite máximo permitido por la normatividad mexicana para uso potable y agrícola.

3.5. Especiación química

La especiación química se puede definir como el proceso de identificación y cuantificación de diferentes especies, formas o fases de sustancias químicas presentes en un medio, en este caso, el agua superficial (Naji *et al.*, 2010). Para llevar a cabo este proceso en la zona de estudio, se utilizó el programa Visual Minteq 3.1 para conocer las especies químicas formadas con las concentraciones de As y Fe.

Cuadro 8
Resultados de los elementos traza medidos en las campañas de colecta
NOM-127 = NOM-127-SSA1-2021; = NOM-001-SEMARNAT-2021

Sitio	Campaña de colectas	As (µg/L)	Fe (µg/L)
S1	may-19	1.20	2.80
	nov-19	1.00	3.00
S2	may-19	2.00	3.00
	nov-19	1.70	4.50
S3	may-19	0.60	1.30
	nov-19	0.30	2.90
S4	may-19	3.10	5.90
	nov-19	2.90	6.90
S5	may-19	2.80	4.40
	nov-19	2.60	4.80
S6	may-19	6.00	800
	nov-19	5.50	700
NOM-127		25	300
NOM-001		200	-

3.5.1 Arsénico

En la zona de estudio se encontró As en su forma As (V), la cual presentó un estado menos lábil y biotóxico que el As (III). Las especies encontradas en esta forma química fueron: HAsO_4^{2-} (73.45 %), seguido del H_2AsO_4^- (26.55%). Este elemento traza se moviliza fácilmente y predomina en pH entre 6.5 y 8.5 y valores positivos de potencial rédox, tal como los encontrados en este estudio. Presenta una menor toxicidad en comparación con el As (III).

3.5.2 Hierro

En los sitios de estudio se observó el Fe (III), en el que predominaron algunas especies como $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ (90 %), FeOH^{2+} , $\text{Fe}(\text{OH})_{3\text{aq}}$ y $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$, las cuales se favorecen en pH neutros con tendencia alcalina y en ambientes oxidantes, lo que coincide con las características encontradas en la zona de estudio. En aguas superficiales, como manantiales, el Fe suele estar en su forma Fe (III) porque tiende a oxidarse bajo la acción del aire, pero en aguas subterráneas se encuentra principalmente en su forma Fe (II).

3.6. Facies hidroquímicas

El diagrama de Piper demostró que el catión predominante fue el Ca^{2+} seguido del Mg^{2+} (Figura 3), mientras que el anión predominante fue el HCO_3^- , en consecuencia, la facie hidroquímica a la que pertenecen los seis sitios de estudio son al grupo de las bicarbonatadas cálcicas ($\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$). Este tipo de aguas son consideradas jóvenes, poco evolucionadas y de baja mineralización, tal y como se observa en los resultados obtenidos de dureza total, alcalinidad total, iones mayoritarios y SDT. Estas características hidroquímicas son similares a las encontradas por Reyes *et al.* (2020) y Silva *et al.* (2013), en sus respectivas investigaciones de sitios específicos dentro de la cuenca del río Duero.

El diagrama de Schöeller (Figura 4) es una gráfica semilogarítmica que representa e identifica las concentraciones en meq/L de los iones mayoritarios (Ghanem *et al.*, 2021). En todos los sitios de estudio el catión predominante fue el Ca^{2+} , seguido del Mg^{2+} ; el anión predominante fue el HCO_3^- , confirmando la información proporcionada por el diagrama de Piper.

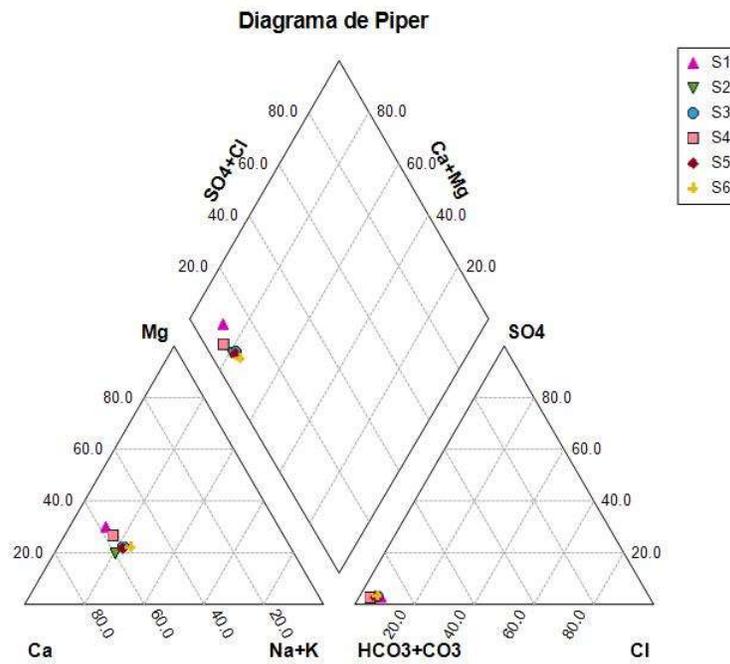


Figura 3. Diagrama de Piper de la zona de estudio.

3.7. Índice de Calidad del Agua

En esta investigación se evaluó la calidad del agua de seis manantiales de El Platanal, utilizando el método del ICA propuesto por Montoya *et al.* (1997), en el cual se tomaron en cuenta los siguientes parámetros: oxígeno disuelto, coliformes fecales, conductividad eléctrica, Cl⁻, alcalinidad total, pH, SDT, PO₄³⁻,

NO₃⁻ y dureza total, tanto para la temporada de estiaje como para la de precipitación pluvial. Los resultados del ICA (Cuadro 9) oscilaron en un intervalo de 27.69 a 38.64 en estiaje, en tanto que en temporada de precipitación pluvial abarcó de 28.66 a 41.85, lo que indica que el agua está contaminada y altamente contaminada. El manantial S6, en las dos campañas de colectas, fue el único que resultó ser evaluado

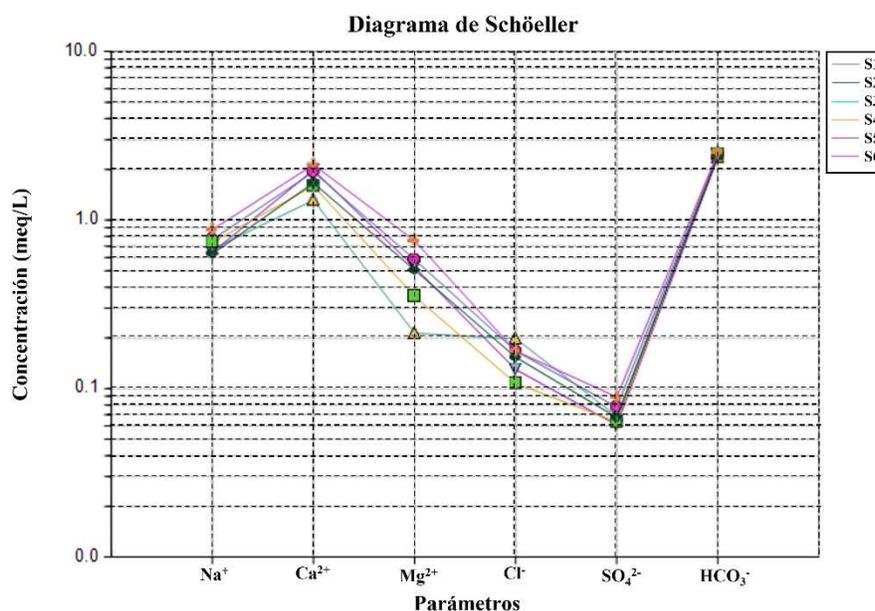


Figura 4. Diagrama de Schöeller de la zona de estudio.



Cuadro 9

Resultados del cálculo del ICA para diferentes usos del agua.

SITIOS	COLECTA	ICA	CRITERIO GENERAL
S1	may-19	38.64	Contaminado
	nov-19	41.85	Contaminado
S2	may-19	36.64	Contaminado
	nov-19	37.99	Contaminado
S3	may-19	37.95	Contaminado
	nov-19	38.99	Contaminado
S4	may-19	35.26	Contaminado
	nov-19	37.85	Contaminado
S5	may-19	36.31	Contaminado
	nov-19	39.18	Contaminado
S6	may-19	27.69	Altamente contaminado
	nov-19	28.66	Altamente contaminado

como altamente contaminado, probablemente por la proximidad de la zona urbana y agrícola. Por otro lado, todos los manantiales analizados pueden no ser aptos para uso doméstico, pero con un tratamiento adecuado pudieran ser utilizados de manera sustentable. Es importante destacar que, en comparación con el ICA calculado por Silva *et al.* (2013) en otros manantiales ubicados en la cuenca del río Duero, los

evaluados en este estudio presentaron un grado de contaminación menor, posiblemente por la falta de explotación por parte de la comunidad.

3.8. Mapas de distribución espacial de la calidad del agua

Los mapas de distribución espacial del cálculo del ICA de las dos colectas se observan en las figuras 5 y

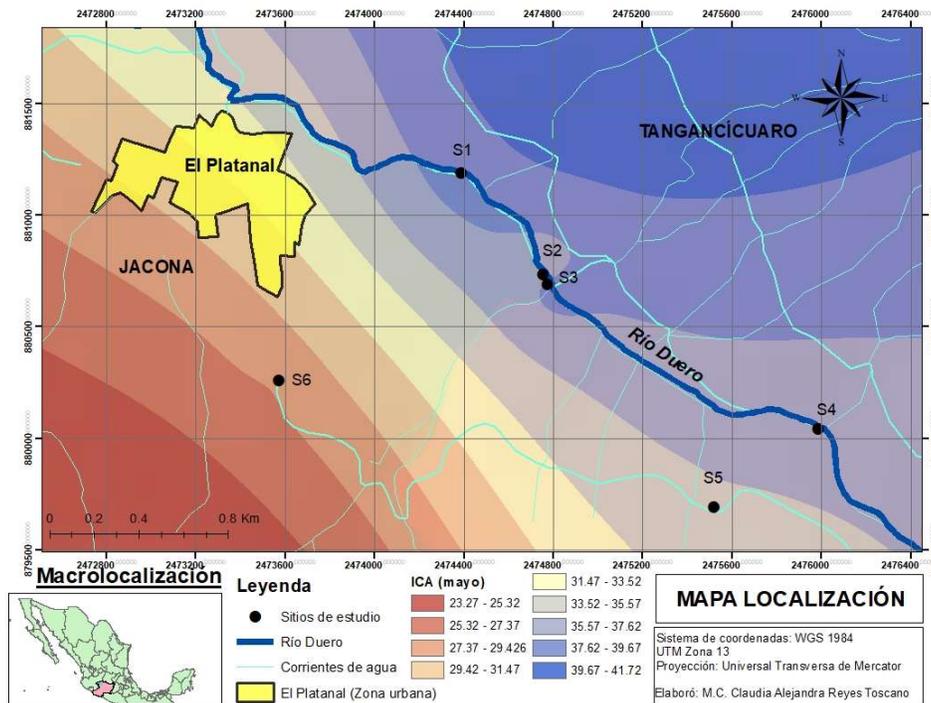


Figura 5. Distribución espacial de los valores del ICA de la colecta de mayo.

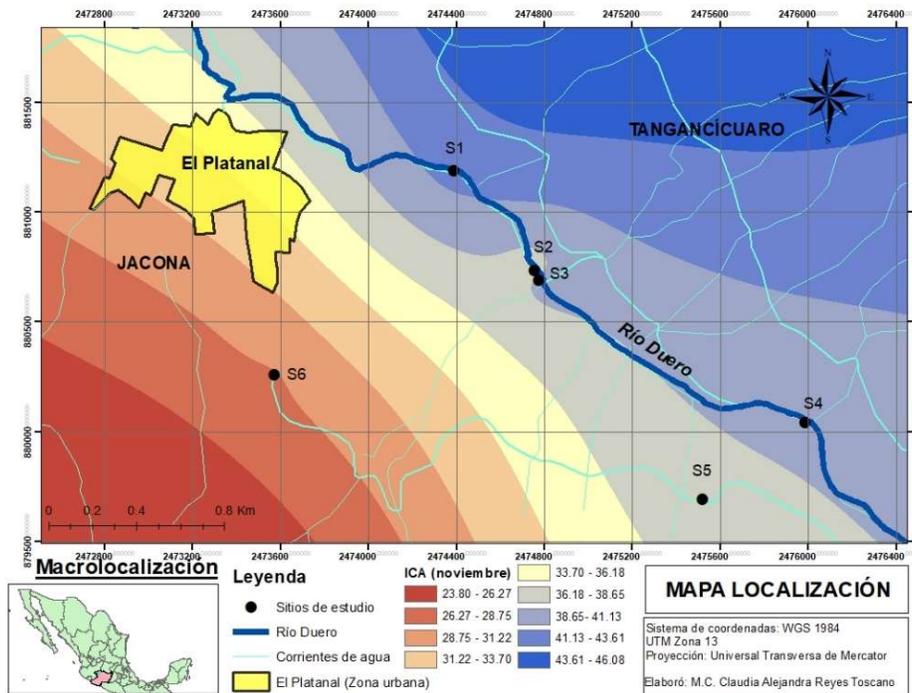


Figura 6. Distribución espacial de los valores del ICA de la colecta de noviembre.

6. Los resultados muestran que, la zona suroeste del área de estudio presentó el peor criterio de calidad del agua, mientras que los manantiales más alejados a la comunidad de El Platanal, mostraron el mejor criterio de calidad del agua, lo que seguramente indica la influencia antropogénica en algunos parámetros como NO_3^- , PO_4^{3-} y Fe. Con lo anterior se puede denotar que, posiblemente, los sitios más alejados no han sido sobreexplotados para cubrir las necesidades de la población.

3.9. Indicadores de Calidad del Agua para riego agrícola

Se analizaron cinco indicadores (RAS, % Na, CSR, IK y RS) para comprobar que el agua de manantial de la zona de estudio es apta para riego agrícola. Los resultados de todos los indicadores se muestran en el cuadro 10.

El intervalo de valores de la RAS osciló entre 0.161 y 0.615; en la temporada de precipitación pluvial disminuyó este indicador en todos los sitios de estudio debido a la dilución de iones a causa de la temporada, mientras que el sitio S6 obtuvo los mayores valores, en las dos campañas de colectas. Respecto al porcentaje de sodio, el intervalo encontrado fue de 9.409 a 19.883 %, lo que establece un bajo índice de

sodio en el agua para riego, haciéndola ideal para la agricultura, tal y como lo demuestra el artículo de Sajeev *et al.* (2020), quien realizó un estudio en aguas superficiales de zonas rurales de la India, el cual presentó % Na menores a 40 %, haciéndola deseable para esta actividad.

El intervalo de valores encontrado en el indicador de CSR varió entre -0.259 hasta 0.695, por lo que estos sitios se encuentran en el valor satisfactorio y pueden ser utilizados con seguridad para fines agrícolas. El Índice de Kelly indica la cantidad relativa de Na^+ frente al Ca^{2+} y al Mg^{2+} , a la vez que ayuda a determinar la idoneidad del agua para el riego agrícola. Los valores presentados en este índice oscilaron entre 0.107 y 0.270, lo que sugiere que todas las muestras de agua son aptas para uso agrícola. El riesgo por salinidad se obtiene de los valores de la conductividad eléctrica; en la mayoría de los sitios se mostraron valores bajos de esta, lo que permite que el agua sea apta para el riego agrícola (Ver Cuadro 10).

4. Conclusiones

De acuerdo con el tipo de agua encontrada en la zona de la comunidad de El Platanal, se trata de un sistema de aguas jóvenes, poco evolucionadas y de

**Cuadro 10**

Resultados del cálculo de todos los indicadores de calidad de agua para irrigación.

ÍNDICE	COLECTA	S1	S2	S3	S4	S5	S6
RAS	may-19	0.214	0.458	0.503	0.327	0.472	0.615
	nov-19	0.161	0.358	0.399	0.228	0.341	0.454
% Na	may-19	9.409	15.835	16.886	12.626	17.181	18.896
	nov-19	10.178	17.224	18.704	12.169	17.245	19.883
CSR	may-19	0.374	-0.259	-0.254	0.158	0.113	-0.484
	nov-19	1.009	0.850	0.785	0.683	0.788	0.695
IK	may-19	0.107	0.200	0.217	0.151	0.221	0.251
	nov-19	0.116	0.228	0.248	0.144	0.224	0.270
RS	may-19	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Buena
	nov-19	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Buena

RAS: Relación de Adsorción de Sodio, % Na: Porcentaje de Sodio, CSR: Carbonato de Sodio Residual, IK: Índice de Kelly, RS: Riesgo por Salinidad.

baja mineralización. El mecanismo que controla la presencia de especies químicas de manera natural es la interacción agua-roca, debido a las concentraciones observadas en algunos parámetros fisicoquímicos.

Los parámetros fisicoquímicos y los iones mayoritarios analizados en los manantiales, no restringen su uso para riego agrícola y potable debido a que no rebasan los límites máximos permitidos por la normatividad mexicana; sin embargo, la contaminación de origen fecal observada, limita el uso de este recurso hídrico como agua potable.

A pesar de que el Fe rebasó el límite máximo permitido por la normatividad mexicana para uso potable en el sitio S6, no se considera un parámetro que ponga en riesgo la salud humana.

El agua en el área de estudio puede ser apta para ser utilizada como fuente de riego para los cultivos de la región, según los indicadores de calidad propuestos anteriormente, pero no podría ser apta para uso potable debido a la contaminación de origen fecal que hay en los seis manantiales, tal como lo revela el ICA.

Las concentraciones de parámetros fisicoquímicos y elementos traza se observaron dentro de la recomendación de la normatividad mexicana para agua potable; sin embargo, el consumo crónico podría poner en riesgo la salud, particularmente en aquellos sitios que presentaron las mayores concentraciones. Por lo tanto, se recomienda un tratamiento simple, que incluya la filtración con medios granulares y desinfección para garantizar un suministro seguro y confiable de agua. Además, es importante monitorear regularmente estos cuerpos de agua para detectar cualquier cambio en los parámetros de calidad del agua.

Los resultados de este estudio proporcionarán información valiosa a las autoridades y habitantes de la comunidad sobre las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua de estos manantiales, lo cual les servirá para fortalecer la gestión del recurso, garantizando el acceso y la disposición sustentable para los usuarios, conforme a las necesidades de la población de El Platanal.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo técnico de la M.C. Carmen Cano Correa, jefa del Laboratorio de Calidad del Agua del Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Morelia y al Ing. Jorge Rubén Torres Verduzco.

5. Referencias

- Abdalla, F., and Scheytt, T., 2012, Hydrochemistry of surface water and groundwater from a fractured carbonate aquifer in the Helwan area, Egypt, *Journal of the Earth System Science*, 121, 109-124.
- Aksever, F., and Davraz, A., 2016, Assessment of water quality for drinking and irrigation purposes: a case study of Başköy springs (Ağlasun/Burdur/Turkey), *Ara-bian Journal of Geosciences*, 9, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2778-y>.
- Alfaro, R., Segovia, N., and Peña, P., 2002, Radon behavior in springs and wells around Cuitzeo Lake, Lerma River basin, *Geofísica Internacional*, 41, 439-445. ISSN: 0016-7169.
- APHA-AWWA-WPCF, 2005, Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st edn., New York.
- Ameen, H., 2019, Spring water quality assessment using water quality index in villages of Barwari Bala, Duhok, Kurdistan Region, Iraq, *Applied Water Science*, 9, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1080-z>.
- Bashir, N., Saeed, R., Afzaal, M., Ahmad, A., Muhammad, N., Iqbal, J., Khan, A., Maqbool, Y., and Hameed, S., 2020, Water quality assessment of lower Jhelum canal in Pakistan by using geographic information system (GIS), *Groundwater for Sustainable Development*, 10, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100357>.
- Chacón, K., Pinedo, C., and Rentería, 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, 375-384. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.04.01>.
- CONAGUA, 2015, Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zamora (1608), Estado de Michoacán, https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/michoacan/DR_1608.pdf, [consultado el 16 de enero de 2022].
- DOF, 2021a, Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. 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, México, https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0, [consultado el 15 de agosto de 2022].
- DOF, 2021b, NOM-001-SEMARNAT-2021. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, Secretaría de Gobernación, México, https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0, [consultado el 15 de agosto de 2022].
- DOF, 2015a, Norma 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, Secretaría de Economía, México, <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf>, [consultado el 29 de enero de 2022].
- DOF, 2015b, 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, Secretaría de Economía, México, <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166147/nmx-aa-042-scfi-2015.pdf>, [consultado el 29 de enero de 2022].
- DOF, 2014, Norma Mexicana NMX-AA-074-SCFI-2014. Análisis de Agua. Medición de ion sulfato en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba, Secretaría de Economía, México, <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166149/nmx-aa-074-scfi-2014.pdf>, [consultado el 29 de enero de 2022].
- DOF, 2002, Norma Oficial Mexicana NOM-230-SSA1-2002. 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, Secretaría de Salud, México, https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2081772&fecha=12/07/2005#gsc.tab=0, [consultado el 30 de enero de 2022].
- DOF, 2001a, NMX-AA-072-SCFI-2001. Análisis de Agua. Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba, Secretaría de Economía, México,



- <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166788/NMX-AA-072-SCFI-2001.pdf>, [consultado el 30 de enero de 2022].
- DOF, 2001b, NMX-AA-036-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba, Secretaría de Economía, México, <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166776/NMX-AA-036-SCFI-2001.pdf>, [consultado el 30 de enero de 2022].
- DOF, 2001c, NMX-AA-073-SCFI-2001. Análisis de Agua. Determinación de cloruros en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba, Secretaría de Economía, México, <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166789/NMX-AA-073-SCFI-2001.pdf>, [consultado el 30 de enero de 2022].
- DOF, 2001d, NMX-AA-029-SCFI-2001. Análisis de Agua. Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba, Secretaría de Economía, México, <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166773/NMX-AA-029-SCFI-2001.pdf>, [consultado el 31 de enero de 2022].
- DOF, 2001e, NMX-AA-079-SCFI-2001. Análisis de Agua. Determinación de nitratos en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba, Secretaría de Economía, México, <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166794/NMX-AA-079-SCFI-2001.pdf>, [consultado el 31 de enero de 2022].
- Dumaru, B., Pradhanang, S., and Prasad, V., 2021, Spring water assessment for quality and suitability for various uses : the case of Thuligaad watershed, western Nepal, *Environmental Earth Sciences*, 80, 586. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09826-w>.
- Gaikwad, S., Gaikwad, S., Meshram, D., Wagh, V., Kandekar, A., and Kadam, A., 2019, Geochemical mobility of ions in groundwater from the tropical western coast of Maharashtra, India: implication to groundwater quality, *Environment, Development and Sustainability*, 22, 2591-2624. ISSN: 15732975. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00312-9>.
- García, E., 1964, Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, *Universidad Nacional Autónoma de México*. ISBN-10 (02)970-32-1010-4.
- Ghanem, M., Ahmad, W., Keilani, Y., Sawaftah, F., Scheluter, L., and Scxhuettrumpf, H., 2021, Spring water quality in the central West Bank, Palestine, *Journal of Asian Earth Sciences*, X, 1-12. ISSN: 2590-0560, <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2021.100052>.
- Gnanachandrasamy, G., Ramkumar, T., Venkatramanan, S., Vasudevan, S., Chung, S.Y., and Bagyaraj, M., 2015, Accessing groundwater quality in lower part of Nagapattinam district, Southern India: using hydrogeochemistry and GIS interpolation techniques, *Applied Water Sciences*, 5, 39-55. ISSN: 2190-5487, <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0172-z>.
- INEGI, 2020, Compendio de información geográfica municipal 2020, Zamora, Michoacán de Ocampo, México.
- Machender, G., Dhakate, R., Narsimha, M., and Panduranga, I., 2014, Hydrogeochemical characteristics of surface water (SW) and groundwater (GW) of the Chinnaru River basin, northern part of Nalgonda District, Andhra Pradesh, India, *Environmental Earth Sciences*, 71, 2885-2910. ISSN: 18666299, <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2665-8>.
- Mancilla, Ó., Ortega, H., Ramírez, C., Uscanga, E., Ramos, R., and Reyes, A., 2011, Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México, *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28, 39-48. ISSN: 01224999, <https://doi.org/0188-499>.
- Montoya, H., Contreras, C., and García, V., 1997, Estudio Integral de la Calidad del Agua en el Estado de Jalisco, CONAGUA 106.
- Naji, A., Ismail, A., and Ismail A.R., 2010, Chemical speciation and contamination assessment of Zn and Cd by sequential extraction in surface sediment of Klang River, Malaysia, *Microchemical Journal*, 95, 285-292. ISSN: 0026265X, <https://doi.org/10.1016/j.microc.2009.12.015>.
- Nnorom, I., Ewuzie, U., and Eze, S., 2019, Multivariate statistical approach and water quality assessment of natural springs and other drinking water sources in Southeastern Nigeria, *Heliyon*, 5, 1-36. ISSN: 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01123>.
- Nofal, S., Travi, Y., Cognard, A., and Marc, V., 2019, Impact of infiltrating irrigation and surface water on a Mediterranean alluvial aquifer in France using stable isotopes and hydrochemistry, in the context of urbanization and climate change, *Hydrogeology Journal*, 27, 2211-2229. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-01989-y>.
- Redwan, M., Ahmed, A., and Moneim, A., 2016, Factors controlling groundwater hydrogeochemistry in the

- area west of Tahta, Sohag, Upper Egypt, *Journal of African Earth Sciences*, 118, 328-338. ISSN: 18791956, <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.10.002>.
- Reyes, C., Alfaro, R., Cortés, R., Morton, O., Hernández, E., Buenrostro, O., and Ávila, J., 2020, Hydrogeochemical Characteristics and Assessment of Drinking Water Quality in the Urban Area of Zamora, México, *Water*, 12, 556, ISBN: 5244334050, <https://doi.org/10.3390/w12020556>.
- Rouhani, A., 2021, Hydrochemistry and quality assessment of qanat water compared to wells using laboratory studies and literature review (case study of Samalghan plain, North Khorasan, Iran), *Modeling Earth Systems and Environment*, 7, 389-401. ISSN: 23636211, <https://doi.org/10.1007/s40808-020-01014-2>.
- Sajeev, S., Sekar, S., Kumar, B., Senapathi, V., Yong, S., and Gopalakrishnan, G., 2020, Variations of water quality deterioration based on GIS techniques in surface and groundwater resources in and around Vembanad Lake, Kerala, India, *Chemochemistry*, 80, 4, Supplement. ISSN: 0009-2819, <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125626>.
- Setia, R., Lamba, S., Chander, S., Kumar, V., Dhir, N., Sharma, M., Sing, R., and Pateriya, B., 2021, Hydrochemical evaluation of surface water quality of Sutlej river using multi-indices, multivariate statistics and GIS, *Environmental Earth Sciences*, 80, 1-17. ISSN: 1866-6299, <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09875-1>.
- Shil, S., Kumar, U., and Pankaj, S., 2019, Water quality assessment of a tropical river using water quality index (WQI), multivariate statistical techniques and GIS, *Applied Water Science*, 9, 1-21. ISSN: 2190-5495, <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1045-2>.
- Silva, J., Ochoa, S., Cruz, G., Nava, J., and Villalpando, F., 2016, Manantiales de la cuenca del río Duero Michoacán: Operación, calidad y cantidad, *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32, 55-68. ISSN: 01884999.
- Silva, J., Moncayo, R., Ochoa, S., Estrada, F., Cruz, G., Escalera, C., Villalpando, F., and Nava, J., 2013, Calidad química del agua subterránea y superficial en la cuenca del río Duero, Michoacán, *Tecnología y Ciencias del Agua*, 13, 127-146. ISSN: 20072422, <https://doi.org/10.24850/j-tyca-imta>.
- Singh, R.K., Chaturvedi, A., and Kumari, K., 2019, Water quality assessment of Damodar River and its tributaries and subtributaries in Dhanbad Coal mining areas of India based on WQI, *Sustainable Water Resources Management*, 5, 381-386. ISSN: 23635045, <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0159-7>.
- SMN, 2022, Sistema Meteorológico Nacional. CONAGUA. Climograma (1981-2010). Estación Camécuaro, Michoacán de Ocampo, <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/climogramas-1981-2010>, [consultado el 15 de agosto de 2022].
- Velázquez, M., Pimentel, J., and Ortega, M., 2010, Variaciones longitudinales y temporales en la hidroquímica del río Duero. *Agrociencia*, 44, 599-609. ISSN: 2521-9766.
- Wong, C., Alonso, A., and Carranza, C., 2021, Water quality of the wellsprings from the natural wetland "Ciénega de Tamasopo" in San Luis Potosí, Mexico, *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12, 1-35. ISSN: 20072422, <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-06-01>.
- Zhang, D., Shi, X., Xu, H., Jing, Q., Pan, X., Liu, T., Wang, H., and Hou, H., 2020, A GIS-based spatial multi-index model for flood risk assessment in the Yangtze River Basin, China, *Environmental Impact Assessment*, 83, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106397>.