

CALIDAD DEL AGUA PARA USO AGRÍCOLA Y CONSUMO HUMANO EN EL RÍO HUIXTLA, CHIAPAS, MÉXICO

Water quality for agricultural use and human consumption in the Huixtla river, Chiapas, Mexico

Raisa Yarina ESCALONA-DOMENECH^{1*}, Juan Manuel VILLARREAL-FUENTES¹,
Dulce María INFANTE MATA² y Romeo de Jesús BARRIOS-CALDERÓN³

¹ Cuerpo Académico Agricultura Tropical Ecológica, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Chiapas, Campus IV. Entronque Carretera Costera y Pueblo de Huehuetán. Huehuetán 30660, Chiapas, México.

² Departamento de Ciencias de la Sustentabilidad, El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Tapachula. Carretera Antiguo Aeropuerto km 2.5, Tapachula 30700, Chiapas, México.

³ Grupo de Investigación en Sistemas Agrícola y Forestal, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Chiapas, Campus IV. Entronque Carretera Costera y Pueblo de Huehuetán. Huehuetán 30660 Chiapas, México.

*Autora para correspondencia; email: raisa.escalona@unach.mx

(Recibido: agosto 2023; aceptado: mayo 2024)

Palabras clave: agricultura, contaminación agrícola, cuencas hidrográficas, uso del suelo.

RESUMEN

Los ríos son un importante recurso para el desarrollo económico y social y presentan graves problemas de contaminación. Este estudio evaluó la calidad del agua con fines agrícolas y para consumo humano en la parte baja del río Huixtla en Chiapas, México. Se determinó: temperatura (T), pH, sólidos totales disueltos (STD), conductividad eléctrica (CE), turbidez (Turb.), oxígeno disuelto (OD) y los iones carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+) y la dureza total (CaCO_3). Se calculó la relación de absorción de sodio (RAS), el carbonato de sodio residual (CSR) y los coliformes totales y fecales. Los indicadores para la calidad del agua de uso agrícola fueron: CE, pH, RAS, el CSR y los coliformes acorde a los lineamientos de la Ley Federal de Derechos y Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales. Para el consumo humano la calidad del agua fue evaluada según la NOM-127-SSA1-2021. Los valores de coliformes y la turbidez del agua indicaron que ésta no presenta buena calidad para el consumo humano. Para el uso agrícola la calidad del agua es aceptable según el pH, el CSR y el RAS; sin embargo, la presencia de coliformes fecales la clasifica como de mala calidad. Según la CE el agua puede usarse para el riego agrícola siempre que se realice un tratamiento de lavado de los suelos. Se concluye que existe contaminación por coliformes fecales y totales los que imposibilitan que el agua pueda usarse para el consumo humano y el riego agrícola sin antes realizar acciones en la cuenca que permitan el mejoramiento de su calidad.

Key words: agriculture, agricultural pollution, watersheds, land use.

ABSTRACT

Rivers are an important economic and social resource, presenting serious contamination problems. This study evaluated water quality for agricultural purposes and for human consumption in the lower part of the Huixtla River, Chiapas, Mexico. The following were determined: temperature (T), pH, total dissolved solids (TDS), electrical conductivity (EC), turbidity (Turb.), dissolved oxygen (DO), and the ions carbonate (CO_3^{2-}), bicarbonate (HCO_3^-), calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), sodium (Na^+) and total hardness (CaCO_3). Sodium absorption ratio (SAR), residual sodium carbonate (CSR), and total and fecal coliforms were calculated. The indicators for agricultural water quality were EC, pH, RAS, CSR, and coliforms according to the guidelines of the Federal Law of Rights and Applicable Provisions on National Waters. For human consumption, water quality was evaluated according to NOM-127-SSA1-2021. The coliform and turbidity values indicated that the water is not of good quality for human consumption. For agricultural use, the water quality is acceptable according to pH, CSR, and RAS; however, the presence of fecal coliforms classifies it as poor quality. According to the EC, the water can be used for agricultural irrigation as long as soil washing is performed. It is concluded that there is contamination by fecal and total coliforms, which makes it impossible for water to be used for human consumption and agricultural irrigation without first taking action in the basin to improve its quality.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas fluviales tienen un papel esencial para el bienestar humano a través de la provisión de agua dulce y alimentos, la regulación climática y otros servicios ecosistémicos (Akinsete et al. 2019). Los ríos son los recursos de circulación natural de mayor demanda y desempeñan un papel importante en el ciclo del agua y el transporte de materiales desde la tierra hasta el océano (Wang et al. 2019). Constituyen un recurso que contribuye al desarrollo económico y social, la salud pública y el desarrollo agrícola (Li et al. 2021). Son sistemas dinámicos cuya capacidad de resistencia al estrés antrópico es alta, logrando mantener un equilibrio sin la intervención humana. No obstante, en la actualidad constituyen uno de los ecosistemas más degradados del mundo (Plessis 2022).

Los ríos proporcionan diversos beneficios como abundantes recursos de agua dulce, la formación de llanuras aluviales y la creación de hábitats para organismos (Comte et al. 2021). Sin embargo, la alta cantidad de contaminantes, nutrientes, drogas y microplásticos que contiene la descarga de aguas residuales domésticas y el incremento de fuentes no puntuales de contaminación agrícola han provocado que los ríos excedan su capacidad de resiliencia y se provoque la degradación de la calidad del agua (MacLeod et al. 2021). Esta situación ha empeorado a nivel mundial anticipando mayores amenazas para el ambiente y el bienestar humano (Mora et al. 2021, Plessis 2022).

En México el 60 % de los de los ríos presentan problemas de contaminación del agua (SEMARNAT 2020). Esto se debe a múltiples factores propiciados por el estrés antrópico, destacando la descarga de aguas residuales urbanas e industriales y los lixiviados provenientes de la actividad agrícola, que agravan paulatinamente su calidad (Mora et al. 2021). Aunque los requerimientos en la calidad del agua son diferentes y dependen del uso que se le dé a este recurso (García-Rodríguez et al. 2021) la problemática descrita es preocupante pues el agua dulce tiene muchos usos, entre otros, el consumo humano y la agricultura.

Se conoce que la agricultura es la actividad económica que demanda mayor cantidad de agua en todo el mundo y se relaciona con el crecimiento poblacional (Gerten et al. 2020). El aumento poblacional provoca una mayor exigencia en la producción de alimentos para abastecer a esa población (Camacho-Ballesteros et al. 2023), lo cual requiere de una mayor cantidad de agua. Es por esto que la escasez de agua y su contaminación, afecta a la producción de alimentos, lo que a su vez es una amenaza a la seguridad alimentaria de cada país (Pastor et al. 2019).

En México el 77 % del agua dulce es utilizada para riego agrícola, debido a que dos tercios del territorio corresponden a zonas áridas o semiáridas (Navarro-Frómata et al. 2020). De esta manera, la agricultura es la actividad que genera mayor consumo de agua, seguida del uso doméstico (14 %) y el uso industrial (9 %) (Castellón-Gómez et al. 2015).

Por otra parte, las actividades agrícolas liberan sedimentos, materia orgánica, nutrientes, patógenos, etcétera, mediante la escorrentía o el riego, lo cual puede tener un impacto negativo en los parámetros físicos y químicos que determinan la calidad del agua (Ortiz-Vega et al. 2019).

La calidad del agua para el riego puede variar según el tipo y la cantidad de sales disueltas, y a medida que este contenido aumenta, los problemas de salinidad en el suelo y los cultivos se incrementan (Valles-Aragón et al. 2017). Lo anterior puede influir en el crecimiento de las plantas y por tanto, afecta el buen rendimiento de los cultivos disminuyendo los niveles de producción (Camacho-Ballesteros et al. 2023).

El monitoreo ambiental de los principales cuerpos de agua en México es realizado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) a través de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua. Este monitoreo está basado en la determinación de diversos parámetros de calidad que incorporan análisis de las propiedades físicas, componentes orgánicos e inorgánicos e indicadores microbiológicos del agua (CONAGUA 2018). Sin embargo, desde el punto de vista ecológico, social y económico se tiene poca información sobre la calidad del agua y las condiciones ecológicas de ríos y arroyos intermitentes con alto riesgo a la perturbación antrópica (López et al. 2020), por lo que resulta necesario profundizar en estudios de este tipo.

En los ríos del estado de Chiapas, México, la calidad de agua está acorde con la problemática de contaminación que existe a nivel nacional en cuanto a la descarga de aguas residuales, a las actividades agrícolas y al cambio de uso del suelo (Camacho-Ballesteros et al. 2023). Por ejemplo en el río Zanatenco, al suroeste de Chiapas, se encontró contaminación bacteriológica por la presencia de bacterias coliformes totales y fecales, lo cual fue atribuido al arrastre de materia orgánica proveniente del lavado del suelo en la temporada de lluvias y a la descarga de aguas negras directamente al río; se determinó que el agua del río no estaba apta para el consumo humano (Graniel y Carrillo 2006). En el río Margaritas, Chiapas, se encontró que los parámetros físicos y químicos del agua presentaban variación a lo largo del cauce, que estos eran apropiados para el desarrollo de la vida acuática y que el agua se podía utilizar para riego agrícola, al ser clasificada como de baja salinidad (Escalona-Domenech et al. 2022).

El río Huixtla ubicado en la región hidrológica 23 de la costa de Chiapas (CONAGUA 2018) ha sido alterado por el aumento de actividades humanas

como la agricultura y la ganadería; a partir de los años 70 con el fomento del desarrollo económico de la región de Soconusco y la demanda de nuevas áreas agrícolas entre 1980 y 1995 (Gómez-Ortega et al. 2019). A estas actividades ha contribuido el establecimiento de asentamientos poblacionales rurales y urbanos en las riberas, 65 % y 35 % de la población total dentro de la cuenca respectivamente (IEA 2012). La mayoría de estos asentamientos están dispersos y tienen menos de 100 habitantes, lo cual dificulta el acceso a sistemas de tratamiento (Martínez 2022) y por tanto pueden estar provocando el aumento en las descargas de aguas residuales y desechos sólidos al río Huixtla.

Además, las áreas agrícolas en la cuenca representan un total de 1041.0 ha, lo cual puede estar incidiendo en la contaminación del agua por el uso de agroquímicos (Martínez 2022). Todo lo planteado anteriormente sugiere que el agua en la cuenca hidrográfica del río Huixtla puede estar contaminada, tal como ha sido planteado para la región por Camacho-Ballesteros et al. (2023).

Aunado a la problemática existente, los estudios referidos a la calidad del agua con fines agrícolas o para el consumo humano en los ríos de la costa de Chiapas son escasos (Santacruz de León et al. 2017, Escalona-Domenech et al. 2022, Camacho-Ballesteros et al. 2023). De los ríos de la costa de Chiapas el río Huixtla, es uno de los que presenta mayor disponibilidad de agua con 1089.46 millones de m³ (Martínez 2022). Sin embargo, no basta con tener disponibilidad de agua, también es importante conocer su calidad; especialmente en una zona donde predominan actividades económicas en las que el agua es un recurso necesario como el cultivo de caña de azúcar, de palma de aceite, mango, así como un ingenio azucarero (Machuca-Jiménez 2014). Además la calidad del agua en este río es importante pues puede contribuir a la contaminación de las lagunas costeras y los manglares pertenecientes a la Reserva de la Biosfera La Encrucijada donde vierte todo su caudal (Gómez-Ortega et al. 2019).

Por lo anterior, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la calidad del agua utilizada para la agricultura y para consumo humano en la parte baja del río Huixtla, al sureste de Chiapas. La información generada permitirá brindar información actualizada sobre la calidad de agua para un mejor aprovechamiento de este recurso en la cuenca hidrográfica. Todo esto debido al incremento de la demanda en la producción de alimentos y la urgente necesidad de contar con agua de buena calidad ante el constante aumento de la población humana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La cuenca del río Huixtla se localiza al sureste de México, en la región hidrológica 23 de la costa de Chiapas (CONAGUA 2018); se ubica en las coordenadas geográficas 15°0.8'N y 92°28'W (**Fig. 1**). La cuenca Huixtla tiene una superficie total de 820.11 km² (IEA 2012). Predomina el clima cálido húmedo con una precipitación media anual de 2883 mm (IEA 2012). Los suelos en la cuenca son Acrisoles, Cambisoles y Solonchak (INEGI 2016). En la parte baja, la vegetación es hidrófila mientras que en la parte alta de la cuenca están presentes los tipos de vegetación bosque mesófilo de montaña y bosque de coníferas (Rzedowski 1978). Los cultivos que predominan en la zona de estudio son la caña de azúcar, milpa, palma de aceite y plátano (INEGI 2016). Dentro de la cuenca del río Huixtla la población total asciende a 78 304 habitantes pertenecientes a los municipios de Huixtla, Motozintla, Tuzantán y en menor parte de Tapachula. La localidad con mayor cantidad de población es la cabecera municipal de Huixtla, con una población de 53 245 habitantes de acuerdo con el censo de población de 2020 (INEGI 2020). El río Huixtla atraviesa el municipio del mismo nombre de

norte a sur, siendo el más importante y caudaloso escurrimiento fluvial de la zona. Dentro del área urbana se une el arroyo El Cuba. Este río es de 5° orden y la longitud del cauce principal es de 39 km (IEA 2012). El caudal promedio correspondiente a la temporada de lluvia (mayo-octubre) es de 22.28 m³/s mientras que en la temporada seca (febrero-abril) disminuye a tan sólo 4.3 m³/s (Haney y González 2014).

Ubicación de los sitios de muestreo

En la parte baja de la cuenca del río Huixtla se ubicaron ocho sitios de muestreo (**Fig. 1**), basados en la cercanía a zonas donde predominan las actividades agrícolas y ganaderas, e incluyendo a la cabecera municipal de Huixtla que es la comunidad con mayor cantidad de población en esta zona de la cuenca (53 245 hab.; INEGI 2020).

Muestreo y métodos analíticos de parámetros físicos y químicos

El muestreo de parámetros físicos y químicos del agua incluyó temperatura (T), potencial de hidrógeno (pH), sólidos totales disueltos (STD), conductividad eléctrica (CE), turbidez (Turb.) y oxígeno disuelto (OD). En cada sitio la medición se realizó directamente en el campo, a una profundidad aproximada

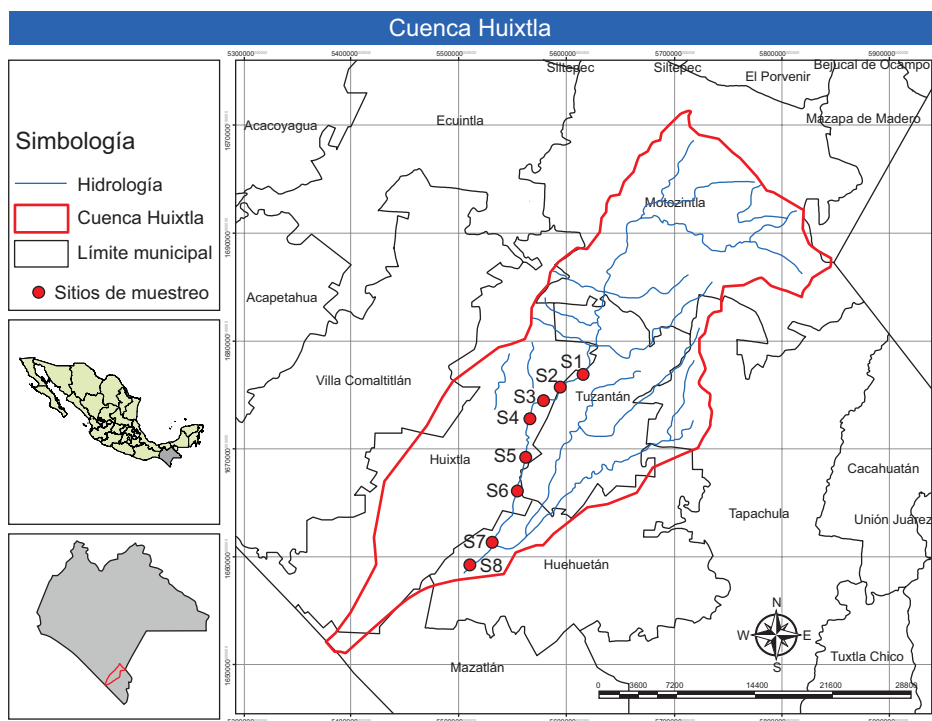


Fig. 1. Localización del área de estudio y los ocho sitios muestreados en la cuenca del río Huixtla, Chiapas, México.

de 15 a 20 cm, por triplicado (cerca del margen izquierdo, centro y cerca del margen derecho). Los sitios se visitaron dos veces durante la temporada seca (febrero-marzo de 2023) y dos veces en la temporada de lluvias (junio-julio de 2023) en el horario de 9:00 a 12:00 h.

El muestreo de la T, pH, STD y la CE se realizó con una sonda multiparamétrica Hanna modelo HI-98130. Para la turbidez se empleó un medidor marca Hanna modelo HI93703 y para el OD un medidor marca Exttech modelo 407510.

Además, se recolectaron muestras de agua con base en la norma NMX-AA-034-SCFI-2015 (SCFI 2015) a una profundidad entre 15 y 30 cm, para ello se utilizaron botellas PET con una capacidad de 1.5 L. Las muestras se trasladaron el mismo día al Laboratorio Escuela de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH), Campus IV, donde se realizó la determinación de la concentración de los iones carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y sodio (Na^+) (APHA 2012) y la dureza total (CaCO_3) mediante el método de la NMX-AA-072-SCFI-2001 (SCFI 2001).

Muestreo y métodos analíticos de parámetros microbiológicos

En cada uno de los sitios para el muestreo de los parámetros microbiológicos se recolectó agua en bolsas de 500 mL según la norma NOM-230-SSA1-2002 (SSA 2002), y se realizaron los siguientes análisis: coliformes totales según la NOM-201-SSA1-2015 (SSA 2015), coliformes fecales según la NOM-112-SSA1-1994 (SSA 1994) y la presencia de *Escherichia coli* según la norma NOM-001-SEMARNAT-2021 (SEMARNAT 2021). Estos análisis se realizaron en el mismo laboratorio de la UNACH, Campus IV, Facultad de Ciencias Químicas ubicado en la ciudad de Tapachula, Chiapas, México.

Parámetros de calidad del agua

Los parámetros utilizados para determinar la calidad de agua para uso agrícola fueron conductividad eléctrica (CE), pH, relación de absorción de sodio (RAS) y el carbonato de sodio residual (CSR). También se analizaron los parámetros microbiológicos coliformes totales, coliformes fecales y la concentración de *E. coli*. En relación con estos últimos, los límites se encuentran en la Ley Federal de Derechos y Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales (CONAGUA 2022) donde se establece que el límite para coliformes fecales es 1000 (NMP/100 mL).

Para el uso y consumo humano los parámetros microbiológicos indicadores de la calidad del agua empleados fueron los mismos que para el uso agrícola. El límite permisible se encuentra regulado en la norma NOM-127-SSA1-2021 (SSA 2022) y son: para *E. coli* <1.1 ó No detectables NMP/100 mL y para coliformes totales Cero UFC mesofílicas/100 mL. Los parámetros físicos y químicos analizados para determinar la calidad del agua y que están regulados en la NOM-127-SSA1-2021 fueron los siguientes: para el pH (límite 6.5 a 8.5), los sólidos totales disueltos (1000 mg/L), la turbidez (4.0 UNT) y la dureza del agua expresada como CaCO_3 cuyo límite es 500 mg/L.

Conductividad eléctrica (CE) y pH

Los valores obtenidos para la CE están expresados en microSiemens/cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y se pueden relacionar con la concentración de sales disueltas en el agua. En relación con este parámetro se siguió la clasificación de Richards (1990), quien separa la calidad del agua para el riego agrícola en cuatro clases: i) agua de salinidad baja (C1 : < 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$), ii) agua de salinidad media (C2 : 250-750 $\mu\text{S}/\text{cm}$), iii) agua de salinidad alta (C3 : 750-2250 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y iv) agua de salinidad muy alta (C4 : > 2250 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Con respecto al pH, según Steiner (1968) el agua puede ser: i) fuertemente ácida < 5, ii) moderadamente ácida 5.1-6.5, iii) neutra 6.6-7.3, iv) medianamente alcalina (7.4 a 8.5), y v) fuertemente alcalina > 8.5.

Relación de absorción de sodio (RAS) y carbonato de sodio residual (CSR)

En función de la RAS, Richards (1990) clasifica al agua de riego en cuatro grupos: i) agua baja en sodio (S1 : $\text{RAS} < 10$), ii) agua con concentración media de sodio (S2 : $10 < \text{RAS} < 18$), iii) agua alta en sodio (S3 : $18 < \text{RAS} < 26$), y iv) agua muy alta en sodio (S4 : $\text{RAS} > 26$).

Para el cálculo de la RAS se utilizó la fórmula siguiente:

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}}$$

En esta fórmula se emplean las concentraciones originales de los iones sin considerar las variaciones por precipitación o disolución del calcio en el suelo (Richards 1990), donde: Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} se refieren a las concentraciones de los cationes solubles, expresados en mmol/L.

El carbonato de sodio residual (CSR) se calculó de la siguiente manera: $\text{CSR} = (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{2+}$

+ Mg^{2+}) (Ortiz-Vega et al. 2019). Con base en este indicador, el agua con valor CSR < 1.25 mmol/L se clasifica como de buena calidad para uso agrícola; los valores de CSR desde 1.25 y hasta 2.5 mmol/L indican calidad condicionada, y valores de CSR > 2.5 mmol/L clasifican al agua como no recomendable (Deshpande y Aher 2012).

Análisis estadísticos

La comparación de cada uno de los parámetros físicos y químicos del agua (T, pH, CE, STD, OD, Turb. y CaCO_3), así como, la concentración iónica (CO_3^{2-} , HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+) y los parámetros microbiológicos (coliformes totales, coliformes fecales y la *E. coli*) por sitios y temporadas, se realizó a través de un análisis de varianza, cuando se cumplieron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza. Cuando no se cumplió alguno de los supuestos mencionados se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. Cuando las diferencias fueron significativas se analizaron con una prueba de Tukey con un nivel de confianza del 95 %, empleando el programa estadístico R ver. 4.2.2 (RCDT 2022).

RESULTADOS

Parámetros físicos y químicos del agua

Los resultados de la evaluación de los parámetros físicos y químicos del agua se muestran en el **cuadro I**. El pH indicó aguas que van desde ligeramente alcalinas hasta cercanas a la neutralidad como es el caso del sitio S1 (pH = 7.1) en temporada de lluvias. La conductividad resultó en valores para la temporada seca desde 240 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el sitio S1 hasta 330 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el sitio S5, mientras que para las lluvias los valores disminuyeron y el menor valor encontrado fue para el sitio S8 (130 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

La conductividad eléctrica (CE) disminuyó entre temporadas (**Cuadro I**); de manera general disminuyó en la temporada de lluvias para todos los sitios muestreados excepto en el sitio S1. En la temporada seca el valor mayor se presentó en el sitio S5 (330 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y el menor fue en el sitio S1 (240 $\mu\text{S}/\text{cm}$); para las lluvias el resultado más elevado fue en el sitio S1 (270 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y el menor fue en el sitio S8 (130 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Según los resultados de la prueba estadística, los STD disminuyeron en la temporada de lluvias con respecto a la temporada seca (**Cuadro I**). Para la seca el resultado más elevado se presentó en el sitio S5 (0.16) y el más bajo fue en el S8 (0.12). Durante las

lluvias el promedio más bajo se encontró en el sitio S8 (0.07), y el más alto se presentó en los sitios S2, S3, S4, S5 cada uno con 0.13.

La temperatura del agua presentó diferencias significativas entre sitios y entre temporadas (**Cuadro I**). Los valores más altos en la temporada seca fueron los del sitio S6 con un promedio de 31.27 °C y los más bajos fueron en el sitio S1 (23.03 °C). En las lluvias, el sitio S5 fue donde se encontraron los valores más altos (33.83 °C), mientras que los más bajos ocurrieron en el sitio S2 (26.10 °C).

Con relación a la turbidez del agua, esta aumentó de manera significativa para todos los sitios durante la temporada de lluvias (**Cuadro I**). En la seca, el promedio menor se presentó en el S1 (3.17 FTU) y el mayor promedio fue para el S4 (10.22 FTU). Durante la estación lluviosa, el promedio menor se encontró en el sitio S2 (5.41 FTU) mientras que el mayor fue en el sitio S8 (93.00 FTU).

Con respecto al oxígeno disuelto, en la temporada seca no se encontraron diferencias significativas entre los sitios (**Cuadro I**), los valores encontrados fueron desde 7.50 mg/L en S7 hasta 8.64 mg/L en el sitio S4. Para la temporada de lluvias los valores de este parámetro presentaron diferencias significativas entre los sitios muestreados y con respecto a la seca. Para la temporada de lluvias el promedio mayor del OD se obtuvo en el S1 (11.57 mg/L) y el menor ocurrió en S8 (6.37 mg/L).

La dureza del agua (concentración de CaCO_3) indicó diferencias significativas entre los sitios muestreados en cada temporada (lluvias y secas), y los valores disminuyeron durante la temporada de lluvia (**Cuadro I**). En la seca, el menor valor fue de 29.25 mg/L en el sitio S8 y el mayor fue de 36.75 mg/L en S2; por su parte, en temporada de lluvias el menor valor fue 16.25 mg/L en el sitio S8 y el mayor fue de 30.25 mg/L en el sitio S5. Con respecto a la clasificación según su dureza, ésta puede ser: “blanda”, cuando la concentración de CaCO_3 está en el rango entre 0-60 mg/L; “moderadamente dura” (61-120 mg/L); “dura” (121-180 mg/L) y “muy dura” si es >180 mg/L (McGowan 2000). Siguiendo la clasificación anterior el agua en la parte baja del río Huixtla se clasifica como agua blanda para todos los sitios muestreados tanto en lluvias como en secas.

Concentración iónica del agua

La concentración iónica del agua por sitios y temporadas se muestra en la **figura 2** y en el **cuadro II** donde se observa que los valores más elevados se presentaron durante el período seco y que disminuyeron significativamente durante las lluvias.

CUADRO I. COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL AGUA DURANTE LAS TEMPORADAS DE SECAS (S) Y LLUVIAS (LI), EN LOS SITIOS DE MUESTREO DEL RÍO HUIXTLA. PROMEDIO (PROM) $\pm$ DESVIACIÓN ESTÁNDAR (DE). DIFERENCIAS ENTRE SITIOS Y ENTRE TEMPORADAS: INDICES ESTADÍSTICOS (ANÁLISIS DE VARIANZA Y KRUSKAL-WALLIS) ^{p-valor}. ^{ns} $p \geq 0.05$, ^{*} $p \leq 0.05$, ^{**} $p \leq 0.01$, ^{***} $p \leq 0.001$. LETRAS DIFERENTES INDICAN DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS SITIOS.

Temporada	Sitios	pH	CE (μ S/cm)	STD (ppt)	T (°C)	Turb. (FTU)	OD (mg/L)	CaCO ₃ (mg/L)
S	S1	7.80 $\pm$ 0.06 ^{ab}	240 $\pm$ 0.06 ^a	0.13 $\pm$ 0.01 ^a	23.03 $\pm$ 0.47 ^a	3.17 $\pm$ 0.29 ^a	8.21 $\pm$ 0.28 ^a	36.50 $\pm$ 0.14 ^{ab}
S	S2	7.97 $\pm$ 0.03 ^{bc}	290 $\pm$ 0.00 ^{ab}	0.14 $\pm$ 0.01 ^{ab}	25.17 $\pm$ 0.30 ^b	4.23 $\pm$ 0.28 ^a	8.10 $\pm$ 0.15 ^a	36.75 $\pm$ 0.07 ^b
S	S3	8.23 $\pm$ 0.07 ^c	290 $\pm$ 0.01 ^{bc}	0.15 $\pm$ 0.01 ^{bc}	27.63 $\pm$ 0.03 ^c	4.64 $\pm$ 0.18 ^a	8.00 $\pm$ 0.15 ^a	36.25 $\pm$ 0.15 ^{bc}
S	S4	8.30 $\pm$ 0.05 ^c	260 $\pm$ 0.02 ^{acd}	0.14 $\pm$ 0.01 ^{ab}	27.10 $\pm$ 0.10 ^c	10.22 $\pm$ 1.10 ^b	8.50 $\pm$ 0.17 ^a	36.25 $\pm$ 0.19 ^{bc}
S	S5	7.66 $\pm$ 0.03 ^{bd}	330 $\pm$ 0.02 ^b	0.16 $\pm$ 0.01 ^c	27.13 $\pm$ 0.22 ^c	8.78 $\pm$ 0.58 ^b	8.10 $\pm$ 0.23 ^a	35.50 $\pm$ 0.27 ^c
S	S6	7.40 $\pm$ 0.10 ^{ad}	300 $\pm$ 0.01 ^{bd}	0.15 $\pm$ 0.01 ^{bc}	31.27 $\pm$ 0.32 ^d	7.47 $\pm$ 0.58 ^b	7.98 $\pm$ 0.26 ^a	35.75 $\pm$ 0.14 ^{ac}
S	S7	7.63 $\pm$ 0.03 ^{bd}	290 $\pm$ 0.00 ^{bc}	0.15 $\pm$ 0.01 ^{bc}	27.30 $\pm$ 0.06 ^c	9.48 $\pm$ 0.40 ^b	7.50 $\pm$ 0.35 ^a	36.00 $\pm$ 0.09 ^{bc}
S	S8	7.37 $\pm$ 0.19 ^d	250 $\pm$ 0.00 ^{ac}	0.12 $\pm$ 0.01 ^a	30.90 $\pm$ 0.10 ^d	9.04 $\pm$ 0.61 ^b	8.00 $\pm$ 0.06 ^a	29.25 $\pm$ 0.16 ^d
PROM $\pm$ DE		7.79 $\pm$ 0.07	280 $\pm$ 0.01	0.14 $\pm$ 0.01	27.44 $\pm$ 0.20	7.13 $\pm$ 0.50	8.05 $\pm$ 0.21	35.28 $\pm$ 0.15
Entre sitios		16.91 ^{***}	19.03 ^{***}	19.70 ^{**}	21.65 ^{**}	22.45 ^{***}	1.57 ^{ns}	19.81 ^{**}
LI	S1	7.70 $\pm$ 0.09 ^a	270 $\pm$ 0.01 ^a	0.12 $\pm$ 0.01 ^a	26.40 $\pm$ 1.30 ^a	6.75 $\pm$ 1.02 ^a	11.57 $\pm$ 0.61 ^a	29.75 $\pm$ 0.01 ^{ab}
LI	S2	8.05 $\pm$ 0.05 ^b	260 $\pm$ 0.01 ^a	0.13 $\pm$ 0.01 ^a	26.10 $\pm$ 0.35 ^b	5.41 $\pm$ 1.23 ^a	10.77 $\pm$ 0.29 ^a	30.00 $\pm$ 0.06 ^{ac}
LI	S3	7.96 $\pm$ 0.04 ^b	260 $\pm$ 0.01 ^a	0.13 $\pm$ 0.01 ^a	29.93 $\pm$ 0.22 ^{bc}	5.60 $\pm$ 0.57 ^a	9.67 $\pm$ 0.27 ^a	29.50 $\pm$ 0.03 ^b
LI	S4	7.97 $\pm$ 0.05 ^b	250 $\pm$ 0.01 ^b	0.13 $\pm$ 0.01 ^a	31.70 $\pm$ 0.26 ^{cd}	7.42 $\pm$ 0.46 ^a	9.60 $\pm$ 0.49 ^a	29.50 $\pm$ 0.13 ^b
LI	S5	7.44 $\pm$ 0.02 ^c	260 $\pm$ 0.01 ^a	0.13 $\pm$ 0.01 ^a	33.83 $\pm$ 0.13 ^d	10.55 $\pm$ 1.15 ^a	8.97 $\pm$ 0.44 ^{ab}	30.25 $\pm$ 0.01 ^c
LI	S6	7.16 $\pm$ 0.04 ^d	200 $\pm$ 0.01 ^c	0.10 $\pm$ 0.01 ^b	28.87 $\pm$ 0.24 ^b	32.02 $\pm$ 2.01 ^b	9.43 $\pm$ 1.23 ^a	22.75 $\pm$ 0.02 ^d
LI	S7	7.15 $\pm$ 0.03 ^d	190 $\pm$ 0.01 ^d	0.10 $\pm$ 0.01 ^b	29.77 $\pm$ 0.09 ^{bc}	44.91 $\pm$ 0.08 ^c	9.03 $\pm$ 0.33 ^{ab}	22.25 $\pm$ 0.01 ^e
LI	S8	7.14 $\pm$ 0.06 ^d	130 $\pm$ 0.01 ^e	0.07 $\pm$ 0.01 ^c	29.67 $\pm$ 0.03 ^{bc}	93.00 $\pm$ 4.16 ^d	6.37 $\pm$ 0.18 ^b	16.25 $\pm$ 0.03 ^f
PROM $\pm$ DE		7.57 $\pm$ 0.05	230 $\pm$ 0.01	0.11 $\pm$ 0.01	29.91 $\pm$ 0.33	27.71 $\pm$ 1.34	9.43 $\pm$ 0.48	26.28 $\pm$ 0.04
Entre sitios		20.83 ^{**}	21.98 ^{**}	22.05 ^{**}	21.42 ^{**}	20.57 ^{**}	7.03 ^{***}	22.34 ^{**}
Entre temporadas		3.23 ^{ns}	14.88 ^{***}	18.11 ^{***}	12.58 ^{***}	4.56 [*]	14.36 ^{***}	26.05 ^{***}

pH: potencial de hidrógeno; CE: conductividad eléctrica; STD: sólidos totales disueltos; T: Temperatura; Turb.: turbidez; OD: oxígeno disuelto; CaCO₃: dureza del agua.

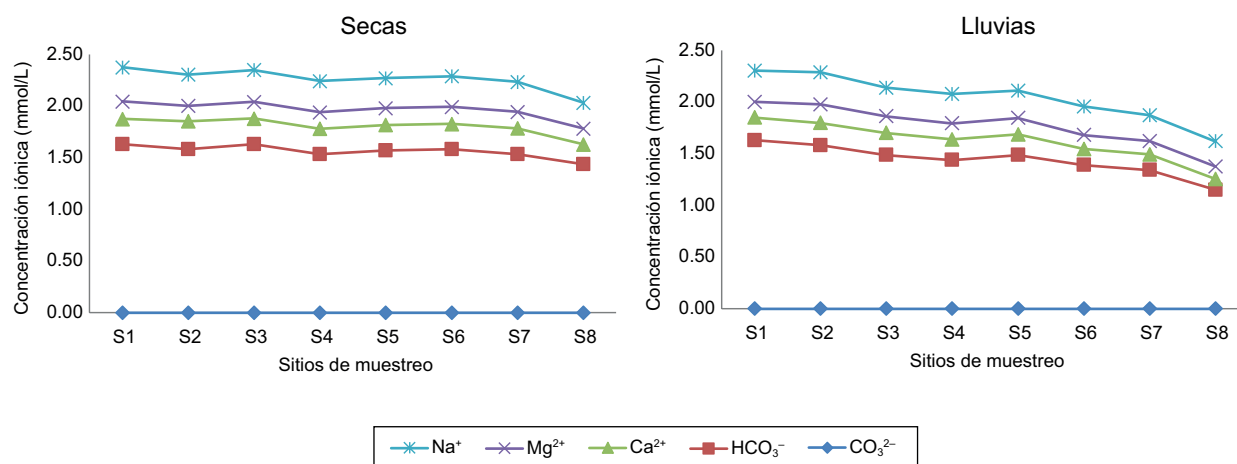


Fig. 2. Concentración iónica del agua en los sitios de muestreo del río Huixtla en temporada de lluvia y seca. CO_3^{2-} : carbonatos; HCO_3^- : bicarbonatos; Ca^{2+} : calcio; Mg^{2+} : magnesio; Na^+ : sodio.

CUADRO II. CONCENTRACIÓN DE IONES: DURANTE LA TEMPORADA DE SECAS (S) Y LLUVIAS (LL) EN LOS SITIOS DE MUESTREO DEL RÍO HUIXTLA. PROMEDIO (PROM) $\pm$ DESVIACIÓN ESTÁNDAR (DE). DIFERENCIAS ENTRE SITIOS Y ENTRE TEMPORADAS: INDICES ESTADÍSTICOS (ANÁLISIS DE VARIANZA Y KRUSKAL-WALLIS) P -VALOR. ns $p \geq 0.05$, * $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$, *** $p \leq 0.001$. LETRAS DIFERENTES INDICAN DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS SITIOS.

Temporada	Sitios	CO_3^{2-} (mmol/L)	HCO_3^- (mmol/L)	Ca^{2+} (mmol/L)	Mg^{2+} (mmol/L)	Na^+ (mmol/L)
S	S1	0.00	1.63 ± 0.0^a	0.24 ± 0.01^a	0.17 ± 0.01^a	0.33 ± 0.01^a
S	S2	0.00	1.58 ± 0.01^a	0.27 ± 0.01^b	0.15 ± 0.01^a	0.30 ± 0.01^{bc}
S	S3	0.00	1.63 ± 0.01^b	0.25 ± 0.01^a	0.16 ± 0.01^a	0.31 ± 0.01^b
S	S4	0.00	1.54 ± 0.00^a	0.25 ± 0.00^a	0.16 ± 0.01^a	0.30 ± 0.01^{bc}
S	S5	0.00	1.57 ± 0.01^a	0.25 ± 0.01^a	0.16 ± 0.01^a	0.29 ± 0.01^c
S	S6	0.00	1.58 ± 0.01^a	0.25 ± 0.01^a	0.17 ± 0.01^a	0.30 ± 0.01^{bc}
S	S7	0.00	1.54 ± 0.01^a	0.25 ± 0.01^a	0.16 ± 0.01^a	0.29 ± 0.01^c
S	S8	0.00	1.44 ± 0.01^c	0.19 ± 0.01^c	0.15 ± 0.01^a	0.25 ± 0.01^d
PROM $\pm$ DE		0.00	1.56 ± 0.01	0.24 ± 0.01	0.16 ± 0.01	0.30 ± 0.01
Entre sitios		-	21.89^{**}	17.14[*]	11.48^{ns}	21.31^{**}
Ll	S1	0.00	1.63 ± 0.01^a	0.22 ± 0.01^a	0.15 ± 0.01^a	0.30 ± 0.01^a
Ll	S2	0.00	1.58 ± 0.01^b	0.21 ± 0.01^a	0.18 ± 0.01^b	0.31 ± 0.01^a
Ll	S3	0.00	1.49 ± 0.01^c	0.21 ± 0.01^a	0.16 ± 0.01^c	0.28 ± 0.01^b
Ll	S4	0.00	1.44 ± 0.01^d	0.20 ± 0.01^b	0.15 ± 0.01^{ac}	0.28 ± 0.01^c
Ll	S5	0.00	1.49 ± 0.01^c	0.20 ± 0.01^b	0.16 ± 0.01^c	0.26 ± 0.01^d
Ll	S6	0.00	1.39 ± 0.01^e	0.15 ± 0.01^c	0.13 ± 0.01^d	0.28 ± 0.01^b
Ll	S7	0.00	1.34 ± 0.01^f	0.15 ± 0.01^c	0.13 ± 0.01^d	0.25 ± 0.01^c
Ll	S8	0.00	1.15 ± 0.01^g	0.11 ± 0.01^d	0.12 ± 0.01^c	0.24 ± 0.01^f
PROM $\pm$ DE		0.00	1.44 ± 0.01	0.18 ± 0.01	0.15 ± 0.01	0.28 ± 0.01
Entre sitios		-	22.43^{**}	21.70^{**}	22.30^{***}	22.46^{**}
Entre temporadas		-	11.30^{**}	25.54^{***}	6.23[*]	8.05^{**}

CO_3^{2-} : carbonatos; HCO_3^- : bicarbonatos; Ca^{2+} : calcio; Mg^{2+} : magnesio; Na^+ : sodio.

Parámetros de la calidad del agua Conductividad eléctrica (CE) y pH

Los resultados obtenidos para la CE y el pH en los sitios muestreados del río Huixtla en las temporadas de seca y de lluvias se muestran en la **figura 3**. Los

valores de CE indican que durante la temporada seca en todos los sitios el agua se clasifica con salinidad media (C2, cuando CE: 250-750 $\mu\text{S}/\text{cm}$), según la clasificación del agua para el riego agrícola de Richards (1990), mientras que para la temporada de lluvias

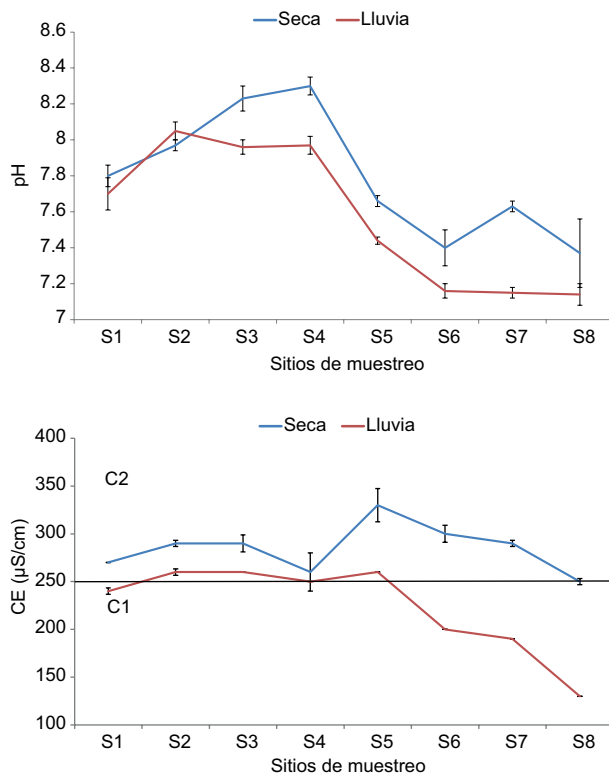


Fig. 3. Comportamiento del pH y la conductividad eléctrica (CE) en las temporadas lluvia y seca en los sitios de muestreo del río Huixtla. Se muestran los promedios $\pm$ desviación estándar. Clasificación de la salinidad del agua según Richards (1990), C1: salinidad baja ($< 250 \mu\text{S/cm}$); C2: salinidad media ($250\text{-}750 \mu\text{S/cm}$).

cuatro de los sitios se clasificaron con salinidad baja (C1, cuando $\text{CE} < 250 \mu\text{S/cm}$) y el resto se mantuvo con salinidad media (Fig. 3).

De acuerdo con Steiner (1968), el pH del agua en la temporada seca se clasifica como medianamente alcalina (7.4 a 8.5), mientras que en las lluvias, si bien el pH mostró una disminución de los valores, sólo en tres sitios (S6, S7 y S8) el agua se clasificó como neutra (6.6 - 7.3); en el resto de los sitios para esta temporada el agua se mantuvo medianamente alcalina (Fig. 3).

Relación de absorción de sodio (RAS) y contenido de carbonato de sodio residual (CSR)

En la figura 4, se muestran los resultados de la RAS y el CSR. Con relación a la RAS el agua fue clasificada como baja en sodio (S1, según Richards 1990), en todos los sitios de muestreo tanto en la temporada de lluvias como en la seca. La comparación de los valores de la RAS entre temporadas indicó diferencias significativas ($F = 4.90$, $DF = 1$, $p < 0.05$).

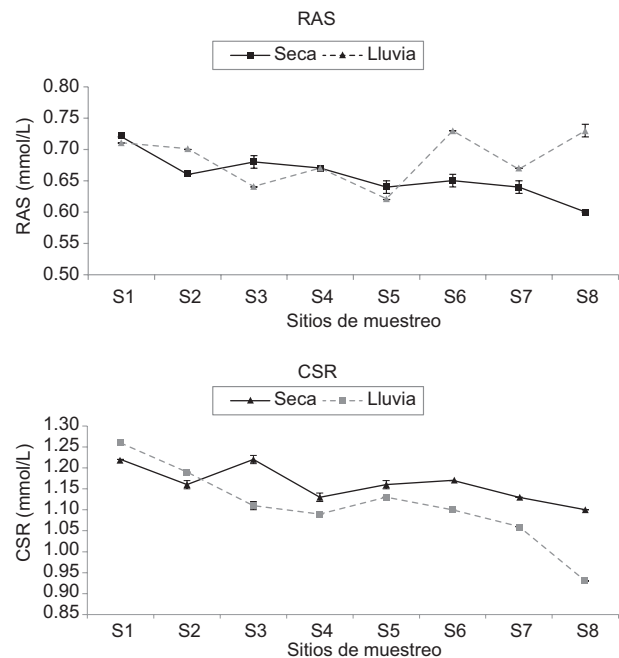


Fig. 4. Comportamiento de la Relación de Absorción de Sodio (RAS) y el Carbonato de Sodio Residual (CSR) en la temporada de lluvia y seca en los sitios de muestreo del río Huixtla. Se muestran los promedios $\pm$ desviación estándar.

Por otro lado según los valores del CSR, el agua fue catalogada como de buena calidad para el riego agrícola en todos los sitios, a excepción del sitio S1 en la temporada de lluvias (Fig. 4), en la que se clasificó como condicionada, pues superó el límite establecido para esta categoría que es de 1.25 mmol/L (Deshpande y Aher 2012). El análisis estadístico mostró que existen diferencias significativas entre las temporadas de lluvias y seca ($X^2 = 6.72$, $DF = 1$, $p < 0.01$).

Parámetros microbiológicos

Los resultados del análisis microbiológico del agua en los sitios de muestreo en el río Huixtla para las temporadas seca y de lluvias se muestran en el cuadro III. Se reportan valores de coliformes totales en todos los sitios de muestreo, tanto para seca como en lluvias. Los valores mayores dados en UFC/mL se obtuvieron durante el muestreo en lluvias (Cuadro III). El valor de referencia para este indicador es cero UFC mesofílicas/100 mL, lo cual indica que en esta temporada (lluvias) el agua presenta mala calidad para el consumo humano según la norma NOM-127-SSA1-2021 (SSA 2022). De igual forma, en la mayoría de los sitios de muestreo se detectó la presencia de

CUADRO III. COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS DEL AGUA EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS (LI) Y SECAS (S) EN LOS SITIOS DE MUESTREO DEL RÍO HUIXTLA. PROMEDIO (PROM) $\pm$ DESVIACIÓN ESTÁNDAR (DE). DIFERENCIAS ENTRE SITIOS Y ENTRE TEMPORADAS: INDICE ESTADÍSTICO (KRUSKAL-WALLIS) ^{P-VALOR}. ^{ns} $p \geq 0.05$, * $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$, *** $p \leq 0.001$. LETRAS DIFERENTES INDICAN DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS SITIOS.

Temporada	Sitios	Coliformes totales (UFC/mL)	Coliformes fecales (UFC/mL)	<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 mL)
Valor de referencia		Cero UFC mesofílicas/100 mL	No detectables	<1.1 ó No detectable NMP/100 mL
S	S1	220 $\pm$ 1.78 ^a	0	0
S	S2	380.0 $\pm$ 0.25 ^b	40 $\pm$ 0.58 ^a	30 $\pm$ 0.58 ^a
S	S3	640 $\pm$ 0.8 ^c	30 $\pm$ 1.53 ^b	0
S	S4	500 $\pm$ 0.33 ^d	20 $\pm$ 1.15 ^c	20 $\pm$ 1.15 ^b
S	S5	2700 $\pm$ 0.07 ^e	80 $\pm$ 0.76 ^d	0
S	S6	6900 $\pm$ 0.72 ^f	240 $\pm$ 1.0 ^e	0
S	S7	6000 $\pm$ 0.27 ^g	400 $\pm$ 0.58 ^f	0
S	S8	5300 $\pm$ 1.35 ^h	260 $\pm$ 1.0 ^g	0
PROM $\pm$ DE		2830.04 $\pm$ 0.69	133.75 $\pm$ 0.83	6.38 $\pm$ 0.22
Entre sitios		22.69**	22.74**	22.86**
LI	S1	256000 $\pm$ 0.51 ^a	190 $\pm$ 0.58 ^a	0
LI	S2	890 $\pm$ 2.89 ^b	90 $\pm$ 1.15 ^b	10 $\pm$ 0.58
LI	S3	31000 $\pm$ 0.0 ^c	160 $\pm$ 0.58 ^c	80 $\pm$ 2.89
LI	S4	570 $\pm$ 0.29 ^d	200 $\pm$ 1.0 ^d	30 $\pm$ 0.0
LI	S5	810 $\pm$ 1.04 ^e	0	0
LI	S6	49000 $\pm$ 1.26 ^f	1100 $\pm$ 0.58 ^c	110 $\pm$ 0.58
LI	S7	21000 $\pm$ 0.13 ^g	850 $\pm$ 4.62 ^f	260 $\pm$ 0.0
LI	S8	8100 $\pm$ 0.29 ^h	1900 $\pm$ 0.0 ^g	100 $\pm$ 0.58
PROM $\pm$ DE		45921.25 $\pm$ 0.83	561.25 $\pm$ 1.06	74 $\pm$ 0.58
Entre sitios		22.73**	22.77**	22.84**
Entre temporadas		21.36**	34.55***	14.26*

coliformes fecales; sólo el S1 en la temporada seca y el S5 en lluvias, cumplieron con la normativa de <1.1 ó No detectables NMP/100 mL establecidos en la norma (SSA 2022). Los niveles de *E. coli* superaron el límite permisible de esta normativa durante la temporada de lluvias para todos los sitios con excepción del S1 y S5. Durante la temporada seca sólo se detectó *E. coli* en los sitios S2 y S4 (**Cuadro III**).

DISCUSIÓN

La determinación de la calidad del agua para el uso agrícola o consumo humano incluye el análisis de sus propiedades físicas y químicas así como de indicadores microbiológicos (CONAGUA 2018). En México, los límites permisibles para cada una de estas actividades están regulados por normativas (CONAGUA 2022, SSA 2022). En este estudio, se evidenció que los parámetros físicos y químicos del agua del río Huixtla en su parte baja varían a lo largo

de los sitios muestreados y son dependientes de la temporada (lluvias o seca), asimismo, los análisis microbiológicos mostraron contaminación del agua por la presencia de coliformes totales y fecales.

Se encontró que los valores de temperatura en las lluvias fueron mayores que en la temporada seca. Estos resultados podrían explicarse por las actividades antrópicas como el desazolve y la extracción de piedras del cauce observadas en el sitio S4, ya que esta práctica produce el aumento de partículas coloidales en el agua, las que absorben el calor de la radiación solar y pueden provocar el aumento de la temperatura (Amón-Mendoza y López-Iñiguez 2020). Este estudio coincide con esta afirmación ya que en las lluvias también se encontraron los valores más elevados de la turbidez del agua. Sin embargo, no coinciden con otras investigaciones que reportan el aumento de la temperatura del agua en la temporada seca debido al aumento de la radiación solar y la disminución del caudal (Fábrega et al. 2022). En la temporada seca la temperatura mostró una correlación negativa

moderada ($r = -0.47$) con el pH; respecto a la CE fue positiva muy baja ($r = 0.19$), con los STD positiva baja ($r = 0.24$) y con la turbidez del agua fue positiva moderada ($r = 0.53$). Estos resultados demuestran que la temperatura es un parámetro relevante en estudios de calidad del agua por su influencia sobre el resto de los parámetros físicos y químicos (Benjumea-Hoyos et al. 2023).

Además la temperatura del agua se relaciona de manera inversamente proporcional con la concentración del oxígeno disuelto (Ridánović et al. 2010). Los resultados para el río Huixtla no coinciden con esta tendencia pues se encontró que en la temporada de lluvias tanto la temperatura del agua como la concentración de OD fueron mayores. Lo cual pudiera deberse a que con el aumento de las precipitaciones aumenta la velocidad fluvial y por tanto, la concentración de oxígeno (Kaboré et al. 2022). Según Muñoz et al. (2015) el OD está relacionado con la temperatura y las precipitaciones pluviales que afectan de manera positiva la concentración de OD en el río, lo que destaca así la importancia de la precipitación y su efecto positivo en la calidad y oxigenación del agua. Los resultados del río Huixtla coinciden, en cuanto al aumento del oxígeno disuelto en la temporada de lluvias, con lo reportado por Benjumea-Hoyos et al. (2023) en los ríos Nare, Nusito y San Lorenzo en el departamento de Antioquía en Colombia y con lo reportado por Muñoz et al. (2015) para el río Zahuaipan, Tlaxcala, México. De forma general los valores de OD obtenidos para la parte baja del río Huixtla son superiores a los reportados por Gebreyohannes et al. (2015) en el río Elala, Mekelle, Tigray, Etiopía.

Sin embargo, contrario a la tendencia general, en el sitio S8 durante la temporada de lluvias se registraron los menores valores de OD. Este resultado pudiera explicarse porque este sitio se encuentra rodeado de cultivos y se infiere que en la temporada de lluvias recibe la influencia de la escorrentía agrícola, la cual se ha demostrado provoca una disminución de los niveles de oxígeno en el agua (Addo et al. 2013). Además, la agricultura puede disminuir la concentración de oxígeno cuando modifica los canales y las riberas de los ríos, cambia el tipo de vegetación ribereña y aumenta la erosión, la entrada de sedimentos y la turbidez (Ferrer-Sánchez et al. 2024).

Con relación a la dureza (CaCO_3), el agua en la parte baja del río Huixtla es aceptable para el consumo humano (**Cuadro IV**) pues los valores obtenidos se encuentran dentro de los límites permitidos (500 mg/L) según la norma mexicana NOM-127-SSA1-2021 (SSA 2022) y se clasifica como agua blanda (McGowan 2000). También es aceptable de

acuerdo con la norma establecida por la Organización Mundial de la Salud donde el máximo permisible es de 180 mg/L (OMS 2018). La Unión Europea por su parte, no tiene establecido un límite máximo permisible para la dureza del agua en su directiva 2020/2184 relativa a la calidad del agua destinada al consumo humano (UE 2020), sin embargo, sí indica que se deben informar al público estos valores. Esto se relaciona a que la dureza del agua tiene implicaciones en su sabor; cuando aumentan los valores, el agua tendrá mal sabor además de una elevada presencia de sales (Prato et al. 2022).

CUADRO IV. RESUMEN DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA RIEGO Y CONSUMO HUMANO EN LA PARTE BAJA DEL RÍO HUIXTLA

Parámetros	Calidad del agua	
	Riego	Consumo humano
pH	Aceptable	Aceptable
CE*	Aceptable	-
RAS*	Aceptable	-
CSR*	Aceptable	-
Sólidos totales disueltos	Aceptable	Aceptable
Turbidez ^b	Aceptable	No aceptable
Dureza	-	Aceptable
Coliformes totales ^b	-	No aceptable
Coliformes fecales ^a	No aceptable	No aceptable
<i>Escherichia coli</i> ^a	No aceptable	No aceptable

^aParámetro alterado que afecta la calidad del agua para el riego según la Ley Federal de Derechos y Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales.

^bParámetro alterado que afecta la calidad del agua para consumo humano (SSA 2022).

*Estos parámetros no están regulados en las normas: ver materiales y métodos.

pH: potencial de hidrógeno; CE: conductividad eléctrica; RAS: relación de absorción de sodio; CSR: contenido de carbonato de sodio residual.

Los resultados obtenidos para el río Huixtla, en cuanto a la dureza, están por debajo de lo encontrado por Almazán-Juárez et al. (2016) para la cuenca baja del río Papagayo, Guerrero, México, donde se planteó que los habitantes de esta área consumían un agua dura rica en sales. El aumento de las sales de calcio y magnesio presentes en el agua dura pueden dar origen a enfermedades, como cáncer gástrico o de colon, dermatitis o problemas cardiovasculares (Ahn et al. 2018, Danby et al. 2018), así como a enfermedades renales como la litiasis renal (Hernández et al. 2011).

Por otro lado, en el agua de riego la dureza es importante ya que un nivel elevado de este parámetro puede interferir con la efectividad de plaguicidas aplicados, así como con la acción de agroquímicos sobre los cultivos (da Cunha et al. 2020) y con ello afectar el rendimiento (Frías y Pinilla 2019). Además afecta negativamente a las redes de distribución de los sistemas de riego al provocar incrustaciones en las tuberías debido a la precipitación de los iones carbonato (Prato et al. 2022).

La turbidez es un indicador de la transparencia del agua y es un criterio destacable que determina la calidad del agua especialmente si es para consumo humano (Gebreyohannes et al. 2015). Los resultados de turbidez del agua en la mayoría de los sitios para ambas temporadas superaron el valor de 4.0 UNT que es el límite de la norma NOM-127-SSA1-2021 (SSA 2022), por lo el agua que no es aceptable para el consumo humano (**Cuadro IV**). Esto indica que el río Huixtla puede estar afectado por una eliminación inadecuada de aguas residuales, escorrentías superficiales y aguas residuales de diferentes actividades domésticas. Otra causa probable es la extracción de arena y grava del cauce que se observó en el río Huixtla (en el sitio S4) lo cual contribuye al aumento de la turbidez debido al incremento de partículas sólidas suspendidas en la columna de agua, que es mayor en la temporada de lluvias debido al incremento en la velocidad de la corriente y la escorrentía (Hannouche et al. 2011). Los resultados se pueden explicar además teniendo en cuenta el considerable deterioro observado en la vegetación ribereña en los sitios muestreados, particularmente a partir del sitio S3 hasta el S8, pues la vegetación puede retener el material arrastrado por efectos de la escorrentía y los suelos erosionados si se encontrara en buen estado (de Mello et al. 2018).

El aumento de la turbidez en el agua puede indicar un incremento del sedimento fino erosionado desde la cuenca alta y media, el cual es arrastrado por los ríos y arroyos hasta la desembocadura (Machuca-Jiménez 2014). Esta es una situación que se presenta en los ríos en la costa de Chiapas y tiene su origen en que los ríos han sido canalizados y rectificadas, incluyendo el Huixtla (Gómez-Ortega et al. 2019). Estos trabajos provocaron la disminución de los meandros naturales en los ríos y el confinamiento del agua en el cauce, con el consiguiente aumento de los sedimentos; lo cual ha provocado el azolvamiento de pantanos y manglares en la Reserva de la Biósfera La Encrucijada, donde este río vierte su caudal, así como la disminución de las pesquerías en la zona (Gómez-Ortega et al. 2019).

El pH se considera uno de los parámetros químicos necesarios para indicar la calidad del agua para consumo humano (Camacho-Ballesteros et al. 2023), sus valores cambian debido a las concentraciones de diferentes gases y sólidos que se disuelven en el agua (Patil et al. 2012). Con relación a este parámetro en todos los sitios de muestreo los valores se consideran aceptables para consumo humano (**Cuadro IV**), ya que se encuentran dentro de los límites permisibles (6.5 a 8.5) de la NOM-127-SSA1-2021 (SSA 2022).

De igual manera, el pH del agua para el riego agrícola es aceptable (**Cuadro IV**), ya que los valores obtenidos se encuentran en el rango de 6.0 a 9.0 permitido por la normatividad (CONAGUA 2022). Por otro lado, Ayers y Westcot (1994) mencionan que el intervalo óptimo para agua de riego es entre 6.5 y 8.4; mientras que otros autores como Juárez-Hernández et al. (2006) y Zárate-Martínez et al. (2024) recomiendan que oscile entre 5.5 y 6.5, ya que en este intervalo la mayoría de los nutrientes que contiene el agua estarán disponibles para la planta (Steiner 1968). Los resultados coinciden con lo obtenido por Camacho-Ballesteros et al. (2023) para las regiones hidrológicas 21 y 23 de la costa de Oaxaca y de Chiapas, respectivamente; asimismo con lo que se encontró en el río Mololoa, Nayarit, México (Ortiz-Vega et al. 2019). En ambos estudios los autores reportaron el predominio de condiciones ligeramente alcalinas tal y como se encontró en este estudio para la parte baja del río Huixtla.

Los STD disminuyeron en la temporada de lluvias en comparación con la temporada seca, lo que puede deberse al aumento en el caudal del río con el incremento de las precipitaciones lo cual provocaría la dilución de los mismos, y con ello la disminución de su concentración en el agua (Ortiz-Vega et al. 2019). Los STD representan el contenido de todas las sustancias inorgánicas y orgánicas en un líquido en forma suspendida molecular, ionizada o micro granulada (Arain et al. 2014) e indican la presencia en el agua de iones como el calcio, magnesio, sodio y bicarbonatos (Páez-Sánchez et al. 2013). Además se encontró una fuerte correlación positiva de los STD y la conductividad eléctrica (CE) en ambas temporadas ($r = 0.9468$ en secas y $r = 0.9883$ en lluvia), lo cual coincide con lo reportado por Gebreyohannes et al. (2015) para el río Elala en Etiopía.

La CE y la concentración iónica del agua fueron significativamente más bajos en temporada de lluvias que en la seca. Estos resultados coinciden con lo obtenido por Ortiz-Vega et al. (2019) para el río Mololoa, Nayarit, México, lo cual pudiera estar relacionado con el efecto de dilución al aumentar el

caudal del río en la temporada de lluvias. La concentración iónica disminuye a lo largo de los sitios de muestreo, lo que puede relacionarse con una mayor dilución al aumentar el caudal del río a medida que se van sumando tributarios al cauce principal río abajo.

En relación con la calidad del agua para el riego, según la CE, en todos los sitios muestreados el agua presentó baja y media salinidad (C1 y C2) según la clasificación de Richards (1990). Esto indica, con relación a este parámetro, que el agua en la parte baja del río Huixtla puede usarse para el riego agrícola, **cuadro IV**, mientras que se realice un tratamiento moderado de lavado de los suelos sólo en el caso de las muestras clasificadas como C2 (Camacho-Ballesteros et al. 2023). La salinidad del agua de riego influye en su calidad, pues el aumento de la misma puede provocar que la cantidad de agua disponible para las plantas disminuya (Avelar-Roblero et al. 2023). Además se debe tomar en cuenta el nivel de tolerancia que tienen los cultivos a la salinidad, la cual es diversa y depende del tipo de cultivo y del estado fenológico del mismo (Ayers y Westcot 1994).

Los cultivos, según Ayers y Westcot (1994), se pueden clasificar tomando en cuenta su potencial de rendimiento a determinados niveles de salinidad del agua, expresada como conductividad, en: i, Sensibles ($< 1300 \mu\text{S}/\text{cm}$); ii, Moderadamente sensibles ($1300-3000 \mu\text{S}/\text{cm}$); iii, Moderadamente tolerantes ($3000-6000 \mu\text{S}/\text{cm}$); iv, Tolerantes ($6000-10\ 000 \mu\text{S}/\text{cm}$). Por ejemplo, el maíz y la caña de azúcar se consideran cultivos moderadamente tolerantes a la salinidad porque pueden resistir valores de hasta $4000 \mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que el frijol se considera un cultivo moderadamente sensible pues a valores de $1500 \mu\text{S}/\text{cm}$ de salinidad del agua se obtiene el 75 % del rendimiento máximo. Tomando en cuenta estos criterios, el agua en la parte baja del río Huixtla puede utilizarse para el riego de los cultivos presentes en la zona: caña de azúcar, maíz, plátanos y palma africana. Para otros cultivos más sensibles a la salinidad debe aplicarse, como ya se mencionó, un tratamiento de lavado en los suelos (Camacho-Ballesteros et al. 2023).

Con respecto a la relación de absorción de sodio (RAS) en el agua, los resultados obtenidos aquí indicaron aguas bajas en sodio (S1, según Richards 1990). Con base en este criterio, el agua del río Huixtla en la zona muestreada puede ser usada para el riego de los cultivos agrícolas (**Cuadro IV**). Por tanto, existe, poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio en los suelos (Camacho-Ballesteros et al. 2023). Además este resultado indica que las concentraciones de los iones calcio y magnesio predominan sobre el sodio. Los resultados concuerdan

con lo obtenido por Camacho-Ballesteros et al. (2023) para la región hidrológica 23 de la costa de Chiapas, donde todas las muestras obtenidas de los ríos analizados se clasificaron como bajas en sodio.

En otro estudio realizado en el río Mololoa en el estado de Nayarit, México, aun cuando el agua se clasificó como baja en sodio (S1), los valores de RAS fueron en promedio 1.6 (Ortiz et al. 2019) valores que superan lo encontrado en las muestras obtenidas en el río Huixtla (0.65). Los valores de la RAS fueron diferentes entre las temporadas de lluvias y seca, aumentando en las lluvias a partir del sitio S6, lo cual se debe tomar en consideración en el riego, pues un aumento en este parámetro tiene implicaciones en el tiempo de infiltración del agua en determinados tipos de suelos como los arcillosos (Ortiz et al. 2019).

El comportamiento del carbonato de sodio residual (CSR) indicó que el agua es de buena calidad (**Cuadro IV**) lo cual quiere decir que son seguras para su uso en el riego agrícola y no provocan salinidad en los suelos (Joshi et al. 2009). Estos resultados coinciden con el estudio realizado en esta región por Camacho-Ballesteros et al. (2023). El análisis del CSR entre temporadas mostró diferencias significativas, donde los valores mayores se presentaron en la seca, similar a lo que sucede en el río Mololoa (Ortiz-Vega et al. 2019). El CSR se usa para predecir la tendencia de los cationes carbonatos, bicarbonatos, sodio y magnesio a precipitar en el suelo, en forma de carbonatos de sodio cuando se riega con agua altamente carbonatada (Peinado-Guevara et al. 2011) lo que puede ocasionar desfloculación en los suelos (Santacruz de León et al. 2017).

El análisis microbiológico indicó la presencia de coliformes totales y de *E. coli*, lo cual evidencia contaminación con heces fecales humanas o de animales (Larrea-Murrell et al. 2013). Esto puede deberse a la actividad ganadera que se desarrolla en la parte baja de la cuenca del río Huixtla y a la presencia de comunidades humanas ubicadas cerca del río, las que no cuentan con servicios de tratamiento de sus aguas residuales. Con respecto a esto se ha demostrado que el vertimiento de aguas residuales de origen doméstico sin el debido tratamiento, ocasiona la presencia de altas densidades de microorganismos patógenos (Navntoft 2010). Además la presencia de *E. coli* durante la temporada de lluvias se explica porque esta bacteria llegar a los ríos, arroyos, lagos o aguas subterráneas desde la superficie de la tierra con las lluvias (Roslev y Bukh 2011).

El agua del río Huixtla rebasó los límites de los coliformes totales de cero UFC mesofílicas/100 mL y de *E. coli* <1.1 ó No detectables NMP/100 mL

establecidos en la NOM-127-SSA1-2021, con lo que se demostró que en la parte baja del río Huixtla el agua está contaminada y no tiene la calidad adecuada para ser utilizada para el consumo humano (SSA 2022). Según este parámetro tampoco sería apta para el riego agrícola (**Cuadro IV**) debido a la presencia de bacterias como la *E. coli*, que es un patógeno promotor de graves enfermedades (Zambrano-Mero et al. 2022). Se ha demostrado que el uso de agua contaminada en las hortalizas, provoca a su vez la contaminación de estos vegetales (Escobedo-Bailón et al. 2017). Entonces, si el agua contaminada es utilizada para el riego de cultivos se compromete la salud humana (Mora et al. 2021). Los riesgos para la salud incluyen enfermedades del sistema digestivo, sistema neurológico, la función renal y otros órganos (Whitehead et al. 2019).

CONCLUSIONES

El pH indicó aguas que van desde ligeramente alcalinas hasta cercanas a la neutralidad y se clasificaron como aceptables para el riego agrícola. En relación con la conductividad el agua se clasificó como de baja y de media salinidad (C1 y C2), y en este caso puede usarse para el riego agrícola siempre que se realice un tratamiento moderado de lavado de los suelos.

El comportamiento del CSR indicó agua segura para su uso en el riego agrícola y no pudiera provocar la salinidad en los suelos. Con relación a la RAS, dado el bajo nivel de sodio, puede ser usarse para el riego de cultivos agrícolas. Sin embargo, el agua está contaminada por la presencia de coliformes fecales, *E. coli*, los cuales superan los límites establecidos en la normativa mexicana, esto implica que no sea apta para el riego agrícola debido al riesgo para la salud humana estos patógenos (Zambrano-Mero et al. 2022).

Con respecto a la calidad del agua para el consumo humano, los resultados del análisis microbiológico indicaron la presencia de coliformes totales y de *E. coli*, lo que indica que el agua en la parte baja del río Huixtla no es de buena calidad. La turbidez del agua supera los límites de la normatividad, posiblemente por una eliminación inadecuada de aguas residuales, escorrentías superficiales y el aumento de sedimentos finos.

Todo lo anterior demuestra que se deben poner en marcha sistemas de tratamiento de aguas residuales en las comunidades humanas y en los ranchos ganaderos ubicados dentro de la cuenca hidrográfica del río Huixtla para evitar este tipo de contaminación. Estos sistemas se pueden ubicar en las comunidades que

carezcan de este servicio y en los ranchos ganaderos cercanos al cauce del río y con ello prevenir también la carga contaminante de origen animal. Además se recomienda la restauración, con especies autóctonas de la zona, de la vegetación ribereña que se observó muy dañada en los sitios S3 al S8.

También se debe continuar con el monitoreo de los parámetros físicos y químicos evaluados en este estudio para conocer la dinámica de su variación temporal. El muestreo se puede hacer cada tres meses, donde los indicadores más importantes para el uso agrícola serían, primero, la salinidad (expresada como CE), ya que el agua de riego con una alta salinidad puede provocar una acumulación en el perfil del suelo y en la zona radicular, reduciendo el crecimiento y la productividad (Adegbola et al. 2021), y segundo, los coliformes fecales debido al riesgo que estos representan en la salud humana (Mora et al. 2021). Para el consumo humano deben cumplirse todos los parámetros que se encuentran regulados en la NOM-127-SSA1-2021 (SSA 2022). En la parte baja del río Huixtla, la turbidez y los coliformes totales y fecales fueron los parámetros más alterados y a los que habría que prestarles mayor atención.

Finalmente se recomienda la evaluación de la concentración de otros iones específicos (como el cloro) que pueden ser tóxicos (González-Pérez et al. 2019) y los niveles de nitrógeno totales por su efecto perjudicial en los cultivos al provocar un mayor crecimiento vegetativo lo que conlleva al retraso en la maduración y baja calidad del producto en cultivos sensibles (Ayers y Westcot 1994); asimismo, la temperatura ambiente tanto en la temporada de lluvias como en la seca también es importante por su relación con la temperatura del agua que influye sobre otros parámetros físicos y químicos como el oxígeno disuelto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías de México (CONAHCYT) por la beca otorgada para hacer estancia posdoctoral a la primera autora de este trabajo. A la Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Ciencias Agrícolas y al Colegio de la Frontera Sur, unidad Tapachula, por haber brindado sus instalaciones y apoyo logístico para la realización del trabajo. A José Rubén García Alfaro, Mayumi Vega Polanco, Dulce Thelma González Castillo y a Fernando Miguel Cárdenas Gálvez, por su acompañamiento en el trabajo en campo.

REFERENCIAS

- Addo M.A., Darko E.O., Gordon C. y Nyarko B.J.B. (2013). Water quality analysis and human health risk assessment of groundwater from open-wells in the vicinity of a cement factory at Akporkloe, Southeastern Ghana. *E-Journal of Science and Technology* 8 (4), 15-30. <https://doi.org/10.26265/e-jst.v8i4.838>
- Adegbola G.A., Soyewo L.T., Odey B.O. y Ajani A.B. (2021). River water quality assessment and its suitability for irrigation purpose. *FUDMA Journal of Sciences* 5 (3), 413-419. <https://doi.org/10.33003/fjs-2021-0503-770>
- Ahn M.K., Chilakala R., Han C. y Thenepalli T. (2018). Removal of hardness from water samples by a carbonation process with a closed pressure reactor. *Water* 10 (1), 54. <https://doi.org/10.3390/w10010054>
- Akinsete E., Apostolaki S., Chatzistamoulou N., Koundouri P. y Tsani S. (2019). The link between ecosystem services and human wellbeing in the implementation of the European water framework directive: assessing four river basins in Europe. *Water* 11 (3), 508. <https://doi.org/10.3390/w11030508>
- Almazán-Juárez M.T., Almazán-Juárez A., Carreto-Pérez B.E., Hernández-Castro E., Damián-Nava A. y Almazán-Núñez R.C. (2016). Calidad y clasificación de usos del agua en la cuenca baja del río Papagayo, Guerrero, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 3 (9), 293-305. <https://doi.org/10.19136/era.a3n9.642>
- Amón-Mendoza J.D. y López-Íñiguez C.J. (2020). Estudio de la influencia de la vegetación y bosque de ribera en la calidad del agua del río Tomebamba de la ciudad de Cuenca. Tesis de Licenciatura. Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca, Ecuador, 159 pp.
- APHA (2012). Standard methods for the examination of water and waste water. 22a ed., American Public Health Association. Water Environment Federation. Washington, DC, EUA, 724 pp.
- Arain M.B., Ullah I., Niaz A., Shah N., Shah A., Hussain Z., Tariq M., Afridi H.I., Baig J.A. y Kazi T.G. (2014). Evaluation of water quality parameters in drinking water of district Bannu, Pakistan: Multivariate study. *Sustainability of Water Quality and Ecology* 3, 114-123. <https://doi.org/10.1016/j.swaqe.2014.12.005>
- Avelar-Roblero J.U., Ortega-Escobar H.M., Mancilla-Villa O.R., Gardezi A.K., Mendoza-Saldivar I., Sánchez-Bernal E.I. y Can-Chulim Á. (2023). Variación de la calidad del agua en el cauce principal de la cuenca del río Pánuco. *Terra Latinoamericana* 41, 1-14. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1601>
- Ayers R.S. y Westcot D.W. (1994). Water quality and use in agriculture. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 29 Rev. 1. Reprinted, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, Italia, 130 pp.
- Benjumea-Hoyos A., Carmona-Ramírez A. y Castro-Martínez A.C. (2023). Calidad fisicoquímica y microbiológica de los ríos asociados a un embalse tropical de montaña en el periodo 2010-2018 (ríos Nare, Nusito y San Lorenzo). *Revista Lasallista de Investigación* 20 (1), 103-122. <https://doi.org/10.22507/rli.v20n1a7>
- Camacho-Ballesteros A., Ortega-Escobar H.M., Sánchez-Bernal E.I., Flores-Magdaleno H., Gardezi A.K., Mendoza-Saldivar I. y Avelar-Roblero J.U. (2023). Hidroquímica y calidad del agua para riego de las RH 21 y 23 costa de Oaxaca y costa de Chiapas, México. *Terra Latinoamericana* 41, 1-19. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1600>
- Castellón-Gómez J.J., Muñoz R.B. y Rodríguez M.D.L.H. (2015). Calidad del agua para riego en la agricultura protegida en Tlaxcala. *Ingeniería* 19 (1), 39-50.
- Comte L., Grantham T. y Ruhi A. (2021). Human stabilization of river flows is linked with fish invasions across the USA. *Global Ecology and Biogeography* 30, 725-737. <https://doi.org/10.1111/geb.13258>
- CONAGUA (2018). Atlas del agua en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua, Ciudad de México, México, 146 pp.
- CONAGUA (2022). Ley Federal de Derechos. Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales 2022. Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México, México, 196 pp.
- da Cunha J.P., Palma R.P., Oliveira A.C.D., Marques M.G. y Alvarenga C.B.D. (2020). Water hardness and pH in the effectiveness of glyphosate formulations. *Engenharia Agrícola* 40, 555-560. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n4p555-560/2020>
- Danby S.G., Brown K., Wigley A.M., Chittock J., Pyae P.K., Flohr C. y Cork M.J. (2018). The effect of water hardness on surfactant deposition after washing and subsequent skin irritation in atopic dermatitis patients and healthy control subjects. *Journal of Investigative Dermatology* 138 (1), 68-77. <https://doi.org/10.1016/j.jid.2017.08.037>
- de Mello K., Valente R.A., Randhir T.O., dos Santos A.C.A. y Vettorazzi C.A. (2018). Effects of land use and land cover on water quality of low-order streams in Southeastern Brazil: Watershed versus riparian zone. *Catena* 167, 130-138. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.027>
- Deshpande S.M. y Aher K.R. (2012). Evaluation of groundwater quality and its suitability for drinking and agriculture use in parts of Vaijapur, District Aurangabad, MS, India. *Research Journal of Chemical Sciences* 2 (1), 25-31.

- Escalona-Domenech R.Y., Infante-Mata D., García-Alfaro J.R., Ramírez-Marcial N., Ortiz-Arrona C.I. y Barba E. (2022). Evaluación de la calidad del agua y de la ribera en la cuenca del Río Margaritas, Chiapas, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 38, 37-56. <https://doi.org/10.20937/RICA.54092>
- Escobedo-Bailón C.M., Ariza-Ávila E., Martel-Tolentino W.J. y Apac-Sotil A.S. (2014). Nivel de contaminación fecal en hortalizas expandidas en mercados de Huánuco y su relación en el riego con aguas residuales no tratadas. *Investigación Valdizana* 8 (2), 29-35.
- Fábrega J.J.H., Núñez K. y González A. (2022). Contaminación por coliformes y evaluación fisicoquímica del agua en las cercanías de la desembocadura del río Mariato, Veraguas, Panamá. *Revista Colegiada de Ciencia* 3 (2), 90-101.
- Ferrer-Sánchez Y., Castillo A.J.R., Plasencia-Vázquez A.H. y Abasolo-Pacheco F. (2024). Impacto del uso de suelo y la fragmentación del paisaje sobre la calidad del agua del río Teaone en Ecuador. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 40, 15-36. <https://doi.org/10.20937/RICA.54900>
- Frías G.J.H. y Pinilla L.C.S. (2019). Influencia de la dureza del agua en ríos y pozos en la efectividad de plaguicidas, provincia de Los Santos, Panamá. *Revista Investigaciones Agropecuarias* 1 (2), 28-42.
- García-Rodríguez G., Sandoval-Rojas M.E., Corona-Romano E.R., Martínez-Romay B., García-Gil E. y García-Gil E. (2021). Aplicación de dos metodologías para la evaluación de la calidad del agua de cuerpos superficiales destinados a la pesca en el sur del estado de Veracruz, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 37, 89-107. <https://doi.org/10.20937/RICA.53681>
- Gebreyohannes F., Gebrekidan A., Hedera A. y Estifanos S. (2015). Investigations of physico-chemical parameters and its pollution implications of Elala River, Mekelle, Tigray, Ethiopia. *Momona Ethiopian Journal of Science* 7 (2), 240-257. <https://doi.org/10.4314/mejs.v7i2.7>
- Gerten D., Heck V., Jägermeyr J., Bodirsky B.L., Fetzer I., Jalava M., Kummu M., Lucht W., Rockström J., Schaphoff S. y Schellnhuber H.J. (2020). Feeding ten billion people is possible within four terrestrial planetary boundaries. *Nature Sustainability* 3 (3), 200-208. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0465-1>
- Gómez-Ortega R., Ramos-Santiago E. y Romero-Berny E. (2019). Problemas asociados con la rectificación y el cambio de cauce de ríos en los sistemas lagunares de la costa de Chiapas, México. *Ciencia Pesquera* 27 (2), 59-67.
- González-Pérez E., Ortega-Escobar H.M., Yáñez-Morales M.J. y Rodríguez-Guillen A. (2019). Diagnóstico de indicadores de calidad físico-química del agua en afluentes del río Atoyac. *Tecnología y Ciencias del Agua* 10 (1), 30-51. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-01-02>
- Graniel C.E. y Carrillo C.M.E. (2006). Calidad del agua del río Zanatenco en el Estado de Chiapas. *Ingeniería* 10 (3), 35-42.
- Haney J. y González A. (2014). Estudio de caudales ecológicos en las cuencas costeras de Chiapas. Informe técnico Fase II. The Nature Conservancy. Ciudad de México, México, 83 pp.
- Hannouche A., Chebbo G., Ruban G., Tassin B., Lemaire B.J. y Joannis C. (2011). Relationship between turbidity and total suspended solids concentration within a combined sewer system. *Water Science and Technology* 64 (12), 2445-2452. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.779>
- Hernández A., Alcalde S. y Astaburuaga C. (2011). El agua potable de alta dureza como factor de riesgo para la litiasis renal: estudio descriptivo de corte transversal, realizado en la ciudad de Malargüe durante el año 2011. Tesina de Licenciatura. Facultad de Ciencias Médicas, Universidad Nacional de Cuyo. Malargüe, Argentina, 124 pp.
- IEA (2012). Plan de gestión integral de la cuenca del Río Huixtla. Instituto Estatal del agua [en línea] https://issuu.com/inesachiapas/docs/plan_de_gestión_del_río_huixtla 8/08/2023
- INEGI (2016). Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250000. Serie VI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía [en línea] <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463173359> 26/07/2023
- INEGI (2020). Censo de población y vivienda. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. [en línea] https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#datos_abiertos 14/08/2023
- Joshi D.M., Kumar A. y Agrawal N. (2009). Assessment of the irrigation water quality of river Ganga in Haridwar district. *Rasayan Journal of Chemistry* 2 (2), 285-292.
- Juárez-Hernández M.D.J., Baca-Castillo G.A., Lorenzo A., Navarro A., Sánchez-García P., Tirado-Torres J.L. y Colinas-De León M.T. (2006). Propuesta para la formulación de soluciones nutritivas en estudios de nutrición vegetal. *Interciencia* 31 (4), 246-253.
- Kaboré I., Ouéda A., Moog O., Meulenbroek P., Tampo L., Bancé V. y Melcher A. (2022). A benthic invertebrates-based biotic index to assess the ecological status of West African Sahel Rivers, Burkina Faso. *Journal of Environmental Management* 307, 114503. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114503>
- Larrea-Murrell J.A., Rojas-Badía M.M., Romeu-Álvarez B., Rojas-Hernández N.M. y Heydrich-Pérez M. (2013). Bacterias indicadoras de contaminación fecal

- en la evaluación de la calidad de las aguas: revisión de la literatura. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas* 44 (3), 24-34.
- Li G., Jiang C., Zhang Y. y Jiang G. (2021). Whether land greening in different geomorphic units are beneficial to water yield in the Yellow River Basin?. *Ecological Indicators* 120, 106926. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106926>
- López E., Pati R., Vazquez-Sauceda M.L., Pérez-Castañeda R., Arellano-Méndez L.U., Ventura R. y Heyer L. (2020). Water quality and ecological risk assessment of intermittent streamflow through mining and urban areas of San Marcos River sub-basin, Mexico. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management* 14, 100369. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100369>
- Machuca-Jiménez M.A. (2014). Diagnóstico del estado actual del uso y manejo de la zona costera en el Estado de Chiapas. Tesis de Maestría. El Colegio de la Frontera Sur, Tapachula, Chiapas, México, 193 pp.
- MacLeod M., Arp H.P.H., Tekman M.B. y Jahnke A. (2021). The global threat from plastic pollution. *Science* 373 (6550), 61-65. <https://doi.org/10.1126/science.abg5433>
- Martínez M.A.C. (2022). Insumos para formulación de la Estrategia Regional de Adaptación al Cambio Climático del Sur Sureste. Fideicomiso para el desarrollo del Sur-Sureste (FIDESUR) [en línea] <https://sursureste.org.mx/wp-content/uploads/2022/09/Reporte-Cuencas-Costa-de-Chiapas.pdf> 14/02/2024
- McGowan W. (2000). Water processing: Residential, commercial, light-industrial, 3a ed., Water Quality Association, Lisle, Illinois, EUA, 309 pp.
- Mora A., García-Gamboa M., Sánchez-Luna M.S., Gloria-García L., Cervantes-Avilés P. y Mahlkecht J. (2021). A review of the current environmental status and human health implications of one of the most polluted rivers of Mexico: The Atoyac River, Puebla. *Science of the Total Environment* 782, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146788>
- Muñoz H., Orozco S., Vera A., Suárez J., García E., Neria M. y Jiménez J. (2015). Relación entre oxígeno disuelto, precipitación pluvial y temperatura: río Zahuapan, Tlaxcala, México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 6 (5), 59-74.
- Navarro-Frómata A.E., Herrera-López H. y Castro-Bravo C. (2020). Irrigation water challenges: A study case in the state of Puebla, Mexico. En: *Water availability and management in Mexico* (E.M. Otazo-Sánchez., A.E. Navarro-Frómata. y V.P. Singh, Eds.). Springer, Cham, Suiza, pp. 249-265. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24962-5_12
- Navntoft C., Araujo P., Mendive C., Cicerone D.S., Pizarro R., Soler-Illia G., Dawidowski L., Litter M.I. y Blesa M.A. (2010). Economic technologies for water disinfection and decontamination, advances in Argentina. *TECNIA* 20 (1), 45-53.
- OMS (2018). Guías para la calidad del agua de consumo humano. Organización Mundial de la Salud, Ginebra, Suiza, 609 pp.
- Ortiz-Vega M.I., Can-Chulim Á., Romero-Bañuelos C.A., Cruz-Crespo E. y Madueño Molina A. (2019). Calidad del agua para uso agrícola del río Mololoa, México. *Terra Latinoamericana* 37 (2), 185-195. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.406>
- Páez-Sánchez A., Alfaro-Cuevas-Villanueva R., Cortés-Martínez R. y Segovia N. (2013). Arsenic content and physicochemical parameters of water from wells and thermal springs at Cuitzeo Lake Basin, Mexico. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 2, 7731-7740.
- Pastor A.V., Palazzo A., Havlik P., Biemans H., Wada Y., Obersteiner M., Kabat P. y Ludwig K. (2019). The global nexus of food-trade-water sustaining environmental flows by 2050. *Nature Sustainability* 2 (6), 499-507. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0287-1>
- Patil P.N., Sawant D.V. y Deshmukh R.N. (2012). Physicochemical parameters for testing of water—A review. *International Journal of Environmental Sciences* 3 (3), 1194-1207.
- Peinado-Guevara H.J., Green-Ruiz C.R., Herrera-Barrientos J., Escolero-Fuentes Ó.A., Delgado-Rodríguez O., Belmonte-Jiménez S.I. y Ladrón de Guevara M.D.L.Á. (2011). Calidad y aptitud de uso agrícola y doméstico del agua del acuífero del río Sinaloa, porción costera. *Hidrobiológica* 21 (1), 63-76.
- Plessis A.D. (2022). Persistent degradation: global water quality challenges and required actions. *One Earth* 5, 129-131. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.01.005>
- Prato J.G., Millán F., Ríos A. y González-Ramírez L.C. (2022). Uso de materiales litológicos oxidicos para la reducción de la dureza en aguas naturales. *Información Tecnológica* 33 (2), 145-156. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642022000200145>
- RDCT (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 3825 pp. [en línea]. <https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-release/fullrefman.pdf> 10/07/2023
- Richards L.A. (1990). Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos: Manual No. 60. 6ta ed, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, Laboratorio de Salinidad, Washington, EUA, 172 pp.
- Ridanović L., Ridanović S., Jurica D. y Spasojević P. (2010). Evaluation of water temperature and dissolved oxygen regimes in River Neretva. *BALWOIS*, Ohrid, República de Macedonia, 10 pp.

- Roslev P. y Bukh A.S. (2011). State of the art molecular markers for fecal pollution source tracking in water. *Applied Microbiology and Biotechnology* 89 (5), 1341-1355. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-3080-7>
- Rzedowski J. (1978). *Vegetación de México*. Limusa, Ciudad de México, México, 432 pp.
- Santacruz de León G., Ramos-Leal J.A., Moran-Ramírez J., López-Álvarez B. y Santacruz de León E.E. (2017). Quality indices of groundwater for agricultural use in the Soconusco, Chiapas, Mexico. *Earth Sciences Research Journal* 21 (3), 117-127. <https://doi.org/10.15446/esrj.v21n3.63455>
- SCFI (2001). Norma Mexicana NMX-AA-072-SCFI-2001. Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, México. 13 de agosto de 2001.
- SCFI (2015). Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015. Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, México. 18 de abril de 2016.
- SEMARNAT (2020). Programa Nacional Hídrico 2020-2024. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Programa. Ciudad de México, México, 88 pp.
- SEMARNAT (2021). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021. Límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, México. 11 de marzo de 2022.
- SSA (1994). Norma Oficial Mexicana NOM-112-SSA1-1994. Que establece Bienes y servicios. Determinación de bacterias coliformes. Técnica del número más probable. Secretaría de Salud. Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, México. 15 de agosto de 1994.
- SSA (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. Procedimientos sanitarios para el muestreo. Secretaría de Salud. Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, México. 12 de julio de 2005.
- SSA (2015). Norma Oficial Mexicana NOM-201-SSA1-2015. Productos y servicios. Agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias. Secretaría de Salud. Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, México. 22 de diciembre de 2015.
- SSA (2022). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Secretaría de Salud. Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, México. 2 de mayo de 2022.
- Steiner A.A. (1968). Soilless culture. *Proceedings of the 6th Colloquium of the International Potash Institute*, Florencia, Italia, 18 pp.
- UE (2020). Directiva UE 2020/2184 del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2020. Unión Europea [en línea] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020L2184&from=EN> 28/02/2024
- Valles-Aragón M.C., Ojeda-Barrios D.L., Guerrero-Prieto V.M., Prieto-Amparan J.A. y Sánchez-Chávez E. (2017). Calidad del agua para riego en una zona nogalera del estado de Chihuahua. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 33 (1), 85-97. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.01.08>
- Wang Y.C., Ni J.R., Yue Y., Li J.Y., Borthwick A.G.L., Cai X.M., Xue A., Li L. y Wang G. (2019). Solving the mystery of vanishing rivers in China. *National Science Review* 6, 1239-1246. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwz022>
- Whitehead P.G., Bussi G., Peters R., Hossain M.A., Softley L., Shawal S., Jin L., Rampley C.P.N., Holdship P., Hope R. y Alabaster G. (2019). Modelling heavy metals in the Buriganga river system, Dhaka, Bangladesh: Impacts of tannery pollution control. *Science of the Total Environment* 697, 134090. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134090>
- Zambrano-Mero J.D., Delgado-Párraga A.G., Zambrano Mero E.T. y Peñaherrera-Villafuerte S.L. (2022). Contaminantes biológicos presentes en fuentes de agua del centro-sur de la provincia de Manabí, Ecuador. *Siembra* 9 (2), e4011. <https://doi.org/10.29166/siembra.v9i2.4011>
- Zárate-Martínez W., Felipe-Victoriano M., Martínez-Silva F.E., Moreno-León K., Arispe-Vázquez J.L. y Díaz-Nájera J.F. (2024). Calidad del suelo y agua para uso agrícola en el territorio Ejutla, Oaxaca, México: Calidad del Suelo y Agua Agrícola. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 11 (1), e3948. <https://doi.org/10.19136/era.a11n1.3948>