

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), enero-febrero 2025,
Volumen 9, Número 1.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1

ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA ASOCIADA A DRENES AGRÍCOLAS EN UNA REGIÓN TROPICAL

**ANALYSIS OF WATER QUALITY ASSOCIATED WITH
AGRICULTURAL DRAINS IN A TROPICAL REGION**

Juan Gabriel Loaiza

Tecnológico Nacional de México

Bladimir Montoya-Rodriguez

Tecnológico Nacional de México

Yaneth A. Bustos-Terrones

Instituto Tecnológico de Culiacán, México

Victoria Bustos-Terrones

Universidad Politécnica del Estado de Morelos, México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1.16056

Análisis de la Calidad del Agua Asociada a Drenes Agrícolas en una Región Tropical

Juan Gabriel Loaiza¹

juan.gl@culiacan.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0002-5648-9496>

Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Culiacán
México

Bladimir Montoya Rodriguez

m12170916@culiacan.tecnm.mx

Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Culiacán
México

Yaneth A. Bustos Terrones

yanethbt@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6445-2071>

División de Estudios de Posgrado e
Investigación, SECIHTI
Instituto Tecnológico de Culiacán
México

Victoria Bustos Terrones

vbustos@upemor.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-4185-7540>

Dirección Académica
de Ingeniería en Tecnología Ambiental
Universidad Politécnica del Estado de Morelos
México

RESUMEN

La calidad del agua para actividades humanas está cada vez más comprometida por el crecimiento poblacional, la expansión urbana y los residuos industriales y agrícolas. La cuenca del río Culiacán, en Sinaloa, es clave para la producción agrícola del país, con tierras intensivas que abarcan el 60% de su superficie. Este estudio evalúa la calidad del agua en ocho drenes agrícolas de la cuenca, utilizando 22 parámetros físicos y biológicos registrados por CONAGUA entre 2012 y 2020. Se aplicaron cuatro índices para un diagnóstico integral: índice de contaminación integral (ICI), índice de calidad del agua (ICA), índice de estado trófico (IET) e índice de riesgo ecológico (IRE). Estos se eligieron por su uso en investigaciones previas y programas de monitoreo. También se realizó un análisis de correlación de Pearson para identificar las relaciones entre los parámetros. Los resultados muestran que el agua de los drenes no es apta para consumo humano, aunque puede utilizarse en ganadería y agricultura. Se detectó un alto grado de eutrofización, pero la baja concentración de metales pesados implica un bajo riesgo ecológico. Este análisis proporciona información valiosa para la gestión sostenible del agua en una región agrícola estratégica.

Palabras clave: calidad del agua, drenes agrícolas, eutrofización, índices de calidad, análisis multivariado

¹ Autor principal

Correspondencia: juan.gl@culiacan.tecnm.mx

Analysis of Water Quality Associated with Agricultural Drains in a Tropical Region

ABSTRACT

Water quality for human activities is increasingly compromised by population growth, urban expansion, and industrial and agricultural waste. The Culiacán River Basin in Sinaloa is vital for the country's agricultural production, with intensive farming covering 60% of its area. This study evaluates water quality in eight agricultural drains within the basin, using 22 physical and biological parameters recorded by CONAGUA from 2012 to 2020. Four indices were applied for a comprehensive diagnosis: the Integrated Pollution Index (ICI), Water Quality Index (WQI), Trophic State Index (TSI), and Ecological Risk Index (ERI). These indices were selected based on previous research and monitoring programs. Additionally, Pearson's correlation analysis was conducted to identify relationships among the parameters. Results indicate that water from the drains is unsuitable for human consumption but can be used for livestock and agriculture. A high degree of eutrophication was detected, though the low concentration of heavy metals suggests minimal ecological risk. This analysis provides valuable insights for sustainable water management in a strategic agricultural region.

Keywords: water quality, agricultural drains, eutrophication, quality indices, multivariate analysis

*Artículo recibido 05 diciembre 2024
Aceptado para publicación: 25 enero 2025*



INTRODUCCIÓN

La escasez y contaminación del agua son problemas cada vez más comunes a nivel mundial, por lo que el monitoreo de la calidad del agua en los cuerpos acuáticos se ha vuelto indispensable. La contaminación proviene principalmente de actividades antropogénicas, como el crecimiento poblacional, la producción de alimentos y las actividades industriales, así como de factores naturales. Estas actividades alteran la calidad del agua y afectan su distribución (Grangeon et al., 2021). El descontrol de las actividades humanas, especialmente las aguas residuales industriales, domésticas y agrícolas, genera una explotación del recurso hídrico y afecta la calidad del agua superficial. Para abordar estos problemas, es esencial estudiar las variables hidroclimatológicas y los parámetros de calidad del agua, con el fin de comprender el impacto de la contaminación en los ecosistemas y tomar medidas para mitigar los efectos de los contaminantes en los cuerpos de agua (Muñoz-Najera et al., 2020).

Si las actividades antropogénicas no se controlan adecuadamente, el estrés hídrico podría aumentar, afectando especialmente al sector agrícola, que es clave en la producción de alimentos. A lo largo de los años, la disponibilidad de agua ha disminuido debido al calentamiento global y el aumento de las actividades humanas, lo que ha hecho que la gestión del agua sea cada vez más crítica (Yaghoubi et al., 2020). México, como uno de los principales productores y exportadores de alimentos, enfrenta el desafío de mejorar las prácticas agrícolas para reducir la contaminación de sus cuerpos de agua, principalmente por el uso excesivo de plaguicidas y fertilizantes (Tian et al., 2025).

Los drenes agrícolas son fundamentales para el riego de los cultivos, pero estos sistemas de distribución de agua a menudo contienen plaguicidas y fertilizantes, que son necesarios para proteger las cosechas (Ares et al. 2024). Esto convierte a la agricultura en una actividad antropogénica que contribuye a la contaminación del agua (Bouaroudj et al. 2019). El Estado de Sinaloa, reconocido por su alta productividad agrícola, se encuentra en la Cuenca del río Culiacán, que abarca 2,596.82 km². Este estudio utiliza diversos índices para evaluar la calidad del agua en los drenes agrícolas de la cuenca, como el índice de contaminación integral del agua, el índice de calidad del agua, el índice de estado trófico y el índice de riesgo ecológico (Quevedo et al., 2018).

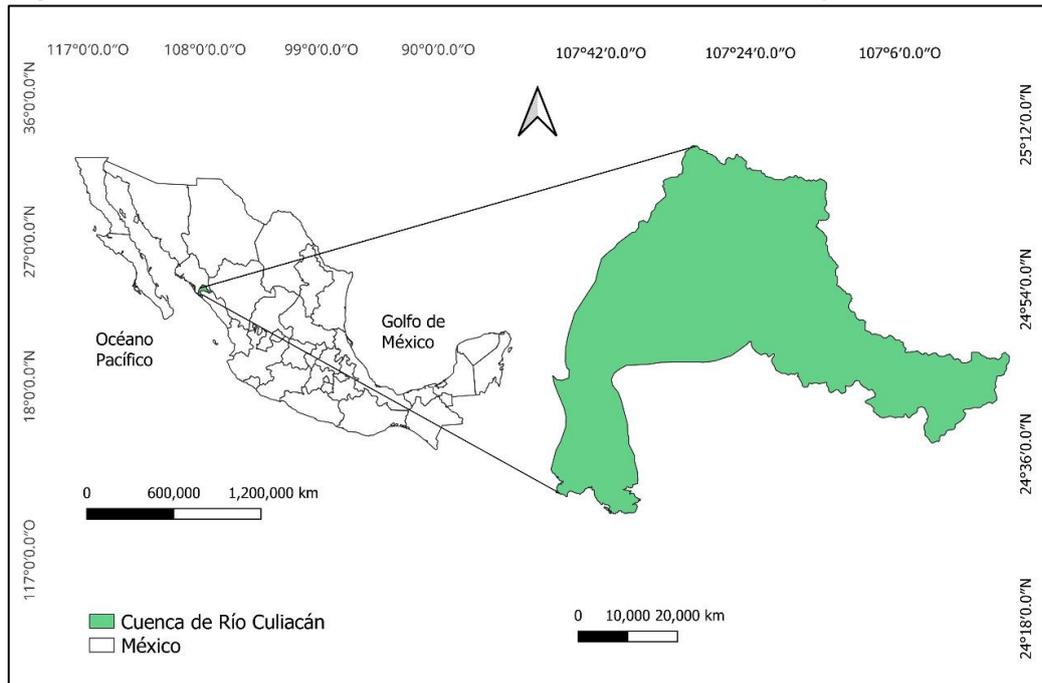
La contaminación y mala distribución del agua son comunes en países con deficiencias en la regulación ambiental, la falta de acuerdos entre empresas y entidades de protección ambiental. Para mitigar estos problemas, es necesario desarrollar prácticas y normativas sostenibles que mejoren la calidad y distribución del agua (Bustos-Terrones et al. 2024a, 2024b). El uso de técnicas estadísticas multivariadas, como el análisis de componentes principales (ACP), y la aplicación de índices de calidad del agua, ha sido útil para identificar fuentes de contaminación y proporcionar herramientas valiosas para la gestión del recurso hídrico en escenarios futuros. Las metodologías empleadas en esta investigación pueden aplicarse eficazmente para evaluar y mitigar los contaminantes que afectan la calidad del agua en los cuerpos acuáticos. Por eso, el objetivo de este estudio es evaluar la calidad del agua en los drenes agrícolas de la cuenca del río Culiacán utilizando diferentes índices de calidad del agua y técnicas estadísticas, con el fin de proporcionar un diagnóstico ambiental integral y proponer medidas para mitigar la contaminación y mejorar la gestión del recurso hídrico en la región.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El presente estudio se llevó a cabo en la cuenca del río Culiacán ubicada en el Estado de Sinaloa (**Figura 1**) México (Bustos-Terrones et al. 2024b) donde se analizaron 8 drenes agrícolas que se encuentran dentro de la cuenca. Los sitios de muestreo se localizaron en los municipios de Culiacán y Navolato, con las siguientes coordenadas: en Culiacán, P1 en 24.82585°N, -107.50997°W; P2 en 24.8217°N, -107.52932°W; P3 en 24.81976°N, -107.53582°W; y P4 en 24.82238°N, -107.564°W. En Navolato, P5 en 24.72352°N, -107.68215°W; P6 en 24.716753°N, -107.677918°W; P7 en 24.83999°N, -107.72364°W; y P8 en 24.83433°N, -107.65428°W. Los cultivos agrícolas que se encuentran alrededor de los drenes de la cuenca del río Culiacán durante el ciclo otoño – invierno I (octubre a marzo) son tomate, chile, pepino y berenjena, mientras que en el ciclo primavera - verano (abril a septiembre) son maíz y sorgo.

Figura 1. Cuenca del Río Culiacán donde se encuentran los drenes agrícolas en estudio.



Parámetros de calidad del agua

Los parámetros de calidad del agua fueron proporcionados por la CONAGUA quien realizó el monitoreo de manera bimestral del durante el periodo 2012-2020. Los parámetros monitoreados fueron; coliformes fecales (CF), coliformes totales (CT), E.coli (EC), carbono orgánico total (COT), demanda bioquímica del oxígeno (DBO), demanda química del oxígeno (DQO), amoníaco (NH₃), nitratos (NO₂-), nitritos (NO₃-), nitrógeno total (NT), nitrógeno orgánico (NO), fósforo Total (FT), Orto fosfatos (O-PO₄), sólidos disueltos totales (SDT), sólidos suspendidos totales (SST), turbiedad (Turb), conductividad eléctrica (CE), dureza total (DT), pH, oxígeno disuelto (OD), sustancias activas al azul de metileno (SAAM) y temperatura del agua (TA).

Estadística multivariada de los parámetros del agua

Con los datos de los 20 parámetros, se llevó a cabo un análisis de correlación de Pearson para observar el impacto de cada parámetro de calidad del agua en los drenes de la cuenca del río Culiacán y estudiar la correlación entre las variables. Para este análisis se utilizaron todos los datos semestrales de la calidad del agua del periodo 2012-2020 de los 8 drenes. El análisis se realizó con el software Statgraphics.

El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1, y miden la fuerza de la relación lineal entre las variables. Valores-P abajo de 0.05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95.0%.

Índice de contaminación integral del agua

La aplicación de diferentes técnicas estadísticas facilita la interpretación y la evaluación cualitativa de los datos proporcionados para comprender mejor la calidad del agua y el estado ecológico del sitio estudiado. Los datos de los parámetros del periodo 2012- 2020 proporcionados por CONAGUA fueron estudiados mediante análisis estadísticos como el del índice de contaminación integral el cual es una técnica estadística y de síntesis de la información para evaluar cualitativamente la calidad del agua superficial de los drenes agrícolas. La siguiente ecuación (1) se utilizó para determinar el índice de calidad de agua integral (Bustos-Terrones et al. 2024a).

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Ci}{Si} \right) \quad (1)$$

Este índice de contaminación integral del agua se utilizó para determinar si la calidad del agua es apta para el consumo humano. Los parámetros para aplicar el cálculo del índice fueron el nitrato, nitrito, nitrógeno total, fósforo total, DQO y DBO. Los límites máximos permisibles que se utilizaron para calcular el índice de contaminación integral fueron de estándares internacionales, los mismo que aplicaron lo investigadores (Hossain & Patra 2020, Li et al. 2016, Linjin et al. 2021, Döndü et al. 2024).

Índice de calidad del agua

El ICA aplicado en esta investigación desarrollado por Quevedo en 2018 (Quevedo et al., 2018), es una metodología que proyecta los efectos de los contaminantes originado principalmente por actividades antropogénicas que termina dañando los cuerpos de agua. Por otro lado, el ICA permite evaluar los cambios en la calidad del agua (Brown et al. 1970).

$$ICA = \sum_{i=1}^9 (Sub_i * w_i) \quad (2)$$

El ICA permite evaluar y simplificar el análisis de los cuerpos de agua al sintetizar las concentraciones de nueve parámetros clave definidos por Brown. Estos parámetros se ponderan según su relevancia, destacando el oxígeno disuelto (0.17) por su importancia para la vida acuática y los coliformes fecales (0.15) como indicador de contaminación biológica.

Otros parámetros, como pH, DBO5, nitratos y fosfatos, tienen un peso de 0.10, mientras que la turbidez y los sólidos disueltos totales, con menor influencia, tienen un peso de 0.08. El cálculo del ICA integra los valores relativos (Subi) multiplicados por sus respectivos pesos, sumándolos para obtener un índice global expresado en porcentaje. Este índice clasifica la calidad del agua en cinco niveles: excelente (91-100), buena (71-90), regular (51-70), mala (26-50) y pésima (0-25). Estas categorías ofrecen una herramienta práctica para interpretar el estado del agua y apoyar la gestión ambiental, identificando problemas y priorizando acciones para mejorar la calidad de los recursos hídricos.

Índice de estado trófico

El estado trófico es una herramienta para evaluar los niveles de nutrientes en cuerpos de agua y su influencia en la productividad biológica (Oliveira et al. 2024). Este índice simplifica variables ambientales y se aplica comúnmente en lagos, aunque también puede utilizarse en otros cuerpos de agua superficiales. Se utilizó la metodología de Cunha y Lamparelli (2013) basada en fósforo total, considerado el nutriente limitante más relevante para determinar el IET (ecuación 3).

$$IET = 10 \times (6 - 0.2763) (\ln \text{ Fósforo Total }) + 1.3297 / \ln 2 \quad (3)$$

Este índice categoriza los cuerpos de agua en seis niveles: ultra oligotrófico ($IET \leq 47$), oligotrófico ($47 < IET \leq 52$), mesotrófico ($52 < IET \leq 59$), eutrófico ($59 < IET \leq 63$), súper eutrófico ($63 < IET \leq 67$), e hiper eutrófico ($IET > 67$). Los niveles más bajos indican aguas con baja concentración de nutrientes y alta calidad ecológica, mientras que los niveles más altos reflejan un enriquecimiento excesivo de nutrientes, lo que puede llevar a problemas como proliferación de algas y deterioro de los ecosistemas acuáticos.

Índice de riesgo ecológico

El IRE mide el grado de riesgo que enfrenta un cuerpo de agua debido a la presencia de metales pesados, tanto en concentraciones altas como bajas (Langunu et al. 2024). Metales como cadmio, plomo, cromo, arsénico y mercurio representan una alta toxicidad. El cálculo del IRE requiere conocer la concentración de metales en el material particulado, utilizando la fórmula propuesta por Arteaga-Betancourt et al. (2018) y considerando los niveles de referencia estándar para determinar el factor de contaminación (ecuación 4) (Håkanson 1979).

$$CD = \sum_{i=1}^6 Cfi = CD = \sum_{i=1}^6 \frac{Cio}{Cin} \quad (4)$$

El IRE clasifica el riesgo ecológico en cuatro niveles: bajo ($IRE < 1$), que indica condiciones seguras; moderado ($1 \leq IRE \leq 3$), que requiere monitoreo constante; considerable ($3 \leq IRE \leq 6$), que demanda acciones correctivas; y alto ($IRE \geq 6$), que representa un escenario crítico con urgencia de medidas inmediatas para prevenir daños significativos al ecosistema. Esta clasificación permite identificar y priorizar acciones para proteger y gestionar los cuerpos de agua afectados por contaminantes tóxicos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

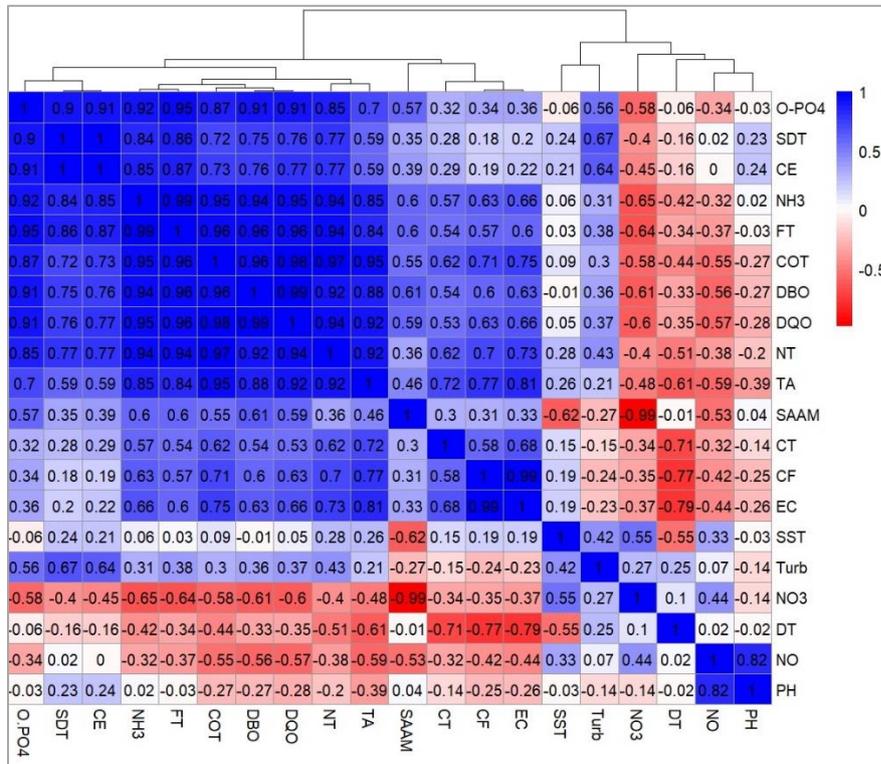
Correlación entre los parámetros estudiados

Con los datos de cada parámetro de la calidad del agua de la cuenca del río Culiacán, se construyó una matriz de correlación de Pearson para realizar el análisis de las variables de calidad del agua con la mayor covarianza. Es importante mencionar que los valores de los parámetros que más se acerquen al valor 1 son los que tienen mayor correlación uno con otro. Se observaron correlaciones significativas entre la mayoría de los parámetros de calidad del agua, incluidas las correlaciones positivas y negativas. Estas correlaciones dependían de la fuerza de la relación lineal entre los parámetros (Bustos-Terrones et al. 2024; Kothari et al. 2021; Panda et al. 2028).

En la Figura 2 se identificaron tres tipos de correlaciones entre los parámetros: positivas fuertes (cerca de +1), negativas fuertes (cerca de -1) y débiles o nulas (cerca de 0), que reflejan diferentes relaciones entre ellos. Las correlaciones positivas fuertes, como entre el pH y el NO, sugieren que un mayor contenido de NO está asociado con un pH más básico. Las correlaciones negativas fuertes, como entre la DQO y la materia microbiológica (CT, CF), indican que a medida que aumenta la DQO, disminuye la concentración microbiológica. Por otro lado, las correlaciones débiles o nulas, como entre los SST y la materia orgánica, sugieren que estos parámetros no están relacionados. Se observó una fuerte correlación positiva entre la materia orgánica y los nutrientes del agua, con excepción del NO₃, que presentó una correlación negativa. El análisis de conglomerados mostró un agrupamiento según las correlaciones observadas, dividiendo los parámetros en dos grupos: uno para las correlaciones positivas y otro para las negativas (Loaiza et al. 2023).

Estas correlaciones son útiles para comprender las interacciones entre diferentes contaminantes y pueden ayudar en la gestión y evaluación de la calidad del agua en los cuerpos acuáticos analizados.

Figura 2. Correlación Pearson de los parámetros de calidad del agua de los drenes agrícolas



Índice de contaminación integral

El ICI del agua fue determinado utilizando parámetros clave de calidad del agua, como DBO, DQO, NO₂, NO₃, NT y PT. Para ello, se empleó el promedio de las concentraciones de cada parámetro (Ci) utilizando los valores de referencia establecidos en la normatividad nacional (Shi et al., 2020). Los resultados obtenidos revelan que el agua de los drenes de la cuenca del río Culiacán presenta un nivel de calidad inaceptable para el consumo humano. La aplicación del Índice de Contaminación Integral (ICI) se ha consolidado como una herramienta efectiva para evaluar la idoneidad del agua, al estar fundamentada en parámetros específicos y normas de calidad.

El análisis de los ocho drenes de la cuenca mostró valores que oscilan entre 8.39 y 158.02, todos clasificados como de calidad "Muy Mala". El Dren 6 presentó el índice más bajo (8.39), mientras que el Dren 5 registró el valor más alto (158.02), reflejando una grave contaminación.

Otros drenes, como el Dren 2 (111.10), Dren 3 (108.68) y Dren 4 (116.32), también reportaron índices alarmantemente elevados, lo que evidencia un nivel crítico de contaminación. Estos hallazgos reflejan un panorama alarmante en el que ninguno de los drenes cumple con los estándares internacionales de calidad para el consumo humano, subrayando la necesidad urgente de implementar acciones que mitiguen la contaminación y mejoren la calidad del agua en la región.

Índice de calidad del agua

Para este análisis del ICA, se utilizó la metodología propuesta por Quevedo-Castro et al. (2018) donde se utilizaron 9 parámetros (coliformes fecales, demanda bioquímica de oxígeno, nitratos, fosfatos, pH, oxígeno disuelto, sólidos disueltos totales, temperatura y turbidez) los cuales determinaron que el ICA en los drenes agrícolas de la cuenca del río Culiacán se encuentra en la categoría "Regular", con valores que oscilan entre 54 y 65. Estos resultados indican que la calidad del agua en los drenes se mantiene en niveles regulares, lo que subraya la necesidad urgente de aplicar medidas para mejorar la gestión y conservación de los recursos hídricos en la región. Además, si bien el agua de los drenes es adecuada para el riego agrícola, se requiere de un tratamiento eficiente para su uso en consumo público.

Índice de estado trófico

Los resultados del IET en los drenes agrícolas de la cuenca del río Culiacán mostraron que los valores de fósforo total variaron entre 0.25 y 5.6 mg/l. En cuanto a la clasificación trófica, los drenes 1 y 6 fueron categorizados como "Eutróficos" con valores de 62.20 y 62.86, respectivamente. En cambio, los drenes 2, 3, 4, 5, 7 y 8 presentaron valores más elevados, con un rango de 72.10 a 75.08 mg/l, clasificándolos como "Hipertróficos". Estos resultados indican niveles elevados de nutrientes en la mayoría de los drenes, lo que sugiere una posible proliferación excesiva de algas y otros procesos de eutrofización en la cuenca. Además, el análisis estacional y espacial mostró poca variabilidad en los resultados, lo que indica un comportamiento similar durante los diferentes períodos de evaluación. En general, la mayoría de los drenes agrícolas se encuentran en un estado trófico hipertrófico. Este estado puede tener consecuencias negativas, como la disminución de la calidad del agua, la reducción de oxígeno disuelto y la afectación de la biodiversidad acuática, lo que podría limitar el uso del agua para actividades como el consumo humano o la pesca.

Por lo tanto, es crucial implementar estrategias de manejo de nutrientes y un monitoreo continuo para mitigar estos impactos y mejorar la calidad del agua en la región (Oliveira et al. 2024).

Indice de riesgo ecológico

Los resultados del IRE indicaron que todos los drenes no presentaron un riesgo ecológico, ya se obtuvieron valores que oscilan entre 0.00098 y 0.013. El Dren 4 presentó la mayor concentración de metales pesados durante el periodo analizado, con un IRE de 0.0124, mientras que el Dren 1 mostró la menor concentración, con un IRE de 0.00098. Estos resultados reflejan que el impacto ambiental por la concentración de los metales pesados en los drenes agrícolas es mínimo. La clasificación de los ocho drenes indica un riesgo bajo, lo que significa que la presencia de metales pesados no representa una amenaza significativa de contaminación o peligro para el agua de los drenes (Vargas-Solano et al., 2022).

DISCUSIÓN

Los resultados de la matriz de correlación de Pearson revelan interacciones significativas entre los parámetros de calidad del agua en los drenajes agrícolas de la cuenca del río Culiacán, reflejando tanto impactos naturales como antropogénicos derivados de la actividad agrícola. Las correlaciones positivas fuertes, como entre el pH y el NO, indican que el uso de fertilizantes nitrogenados puede influir en las propiedades químicas del agua, como la alcalinidad. Por otro lado, las correlaciones negativas fuertes, como entre la DQO y los indicadores microbiológicos (CT, CF), sugieren que la materia orgánica disponible puede ser utilizada como sustrato por microorganismos, reduciendo así la concentración microbiológica en condiciones específicas. Oscco, (2024) recomiendan también evaluar la calidad del suelo.

El agrupamiento de parámetros en correlaciones positivas y negativas refleja patrones complejos de interacción, probablemente influenciados por el tipo de prácticas agrícolas, descargas de agroquímicos y residuos orgánicos en los drenajes. La fuerte correlación entre la materia orgánica y los nutrientes destaca la conexión entre el manejo de residuos agrícolas y la eutrofización potencial. Mientras tanto, las correlaciones débiles, como entre los SST y la materia orgánica, podrían indicar que la sedimentación y la carga orgánica no están necesariamente relacionadas en este contexto.

Estos hallazgos son fundamentales para diseñar estrategias de manejo que minimicen la contaminación, optimicen el uso de recursos y preserven la calidad del agua en sistemas altamente influenciados por actividades agrícolas.

Con los índices obtenidos para evaluar la calidad del agua en los drenes de la cuenca del río Culiacán, se observa una interrelación entre los diferentes parámetros que reflejan el estado general del recurso hídrico. El Índice de Contaminación Integral destaca por su capacidad para sintetizar múltiples parámetros de calidad, como la DBO, DQO, nitratos, fosfatos, entre otros, y proporciona una visión clara del grado de contaminación en los drenes. Los valores elevados de este índice (clasificados como "Muy Mala" calidad) revelan que el agua en la cuenca está fuertemente contaminada, con un impacto significativo sobre su aptitud para el consumo humano. Esta severa contaminación coincide con los valores del Índice de Estado Trófico, que muestra una clasificación mayoritaria de los drenes como "Hipertróficos". La eutrofización y la alta concentración de nutrientes como el fósforo parecen estar correlacionadas con los niveles de contaminación reflejados en el ICI, sugiriendo que los drenes están recibiendo cargas de nutrientes excesivas que favorecen el crecimiento descontrolado de algas y otros organismos, empeorando aún más la calidad del agua.

El Índice de Calidad del Agua presenta una clasificación "Regular", indicando que, aunque el agua es adecuada para riego agrícola, no alcanza los estándares de calidad requeridos para el consumo humano. Este índice parece estar relacionado con la clasificación trófica, ya que los drenes con altos niveles de nutrientes también presentan valores de ICA que reflejan un deterioro en la calidad del agua, aunque no tan grave como en el caso del ICI. Sin embargo, el ICA sugiere la necesidad urgente de mejorar la gestión del agua para prevenir un mayor deterioro, particularmente en lo que respecta a la potabilidad y la disponibilidad de agua para otros usos. En contraste, el Índice de Riesgo Ecológico presenta una situación menos preocupante, ya que todos los drenes muestran un riesgo ecológico bajo debido a la baja concentración de metales pesados. Aunque este índice indica que los metales pesados no representan una amenaza significativa en términos ecológicos, la presencia de estos metales podría influir indirectamente en otros aspectos de la calidad del agua, como la biodiversidad acuática.

Mientras que el ICI y el IET reflejan una preocupación más inmediata sobre la calidad del agua en términos de contaminación y eutrofización, el ICA sugiere que, aunque el agua es utilizable para ciertos

fines, aún presenta riesgos considerables para el consumo humano. El IRE, por otro lado, resalta que el riesgo ecológico es bajo, lo que permite cierto alivio en cuanto al impacto de los metales pesados, aunque no reduce la urgencia de abordar la contaminación y la eutrofización en los drenes. En conjunto, estos índices subrayan la necesidad de estrategias integrales que aborden tanto la contaminación química como los desequilibrios ecológicos en la cuenca (Bernal-Basurcoa et al. 2024). Finalmente, este estudio aporta información valiosa para mejorar la gestión de recursos hídricos asegurando un futuro sostenible (Oscco, 2024).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que la calidad del agua en la cuenca del río Culiacán está afectada por contaminantes como nutrientes, materia orgánica y posibles agentes patógenos, que comprometen la salud pública y la biodiversidad acuática. Aunque los niveles de metales pesados son bajos, la excesiva presencia de nutrientes y la alta carga orgánica generan riesgos significativos, especialmente para el consumo humano. Es crucial implementar medidas adecuadas de manejo, como el tratamiento de aguas residuales y el control de nutrientes, para mitigar estos impactos negativos. Los índices de calidad analizados revelan una situación preocupante: el Índice de Contaminación Integral (ICI) muestra una calidad de agua "Muy Mala" en todos los drenes, y el Índice de Calidad del Agua (ICA) clasifica el agua como "Regular", apta solo para riego agrícola. Además, el Índice de Estado Trófico (IET) indica un estado "Hipertrófico" en la mayoría de los drenes, lo que sugiere una alta carga de nutrientes y posibles proliferaciones de algas. A pesar de que el riesgo ecológico asociado con los metales pesados es bajo, los resultados subrayan la urgente necesidad de una intervención efectiva para mejorar la calidad del agua y proteger el ecosistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ares, M. G., Zabala, M. E., Dietrich, S., Vercelli, N., Entraigas, I., Gregorini, C. A., ... & Aispún, Y. (2024). Drainage network dynamics in an agricultural headwater sub-basin. *Science of The Total Environment*, 914, 169826.
- Arteaga Betancourt, A. E., & Plata Rueda, S. P. (2018). Evaluación del índice de riesgo ecológico potencial en suelo y sedimento por mercurio en minería para tres regiones colombianas, apoyado en el análisis de metadatos. Retrieved from

https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1094

- Atao Oscco, R. (2024). Caracterización de los suelos y gestión del agua para una agricultura sostenible en los andenes de Andamarca, Lucanas, Ayacucho, 2023.
- Bernal-Basurcoa, C., Zubelzua, S., & Estevea, P. (2024). Impacto social del sistema de drenaje sostenible (SUDS): revisión sistemática de la literatura y retos de la investigación.
- Bouaroudj, S., Menad, A., Bounamous, A., Ali-Khodja, H., Gherib, A., Weigel, D.E., Chenchouni, H. 2019. Assessment of water quality at the largest dam in algeria (beni haroun dam) and effects of irrigation on soil characteristics of agricultural lands. *Chemosphere* 219, 76-88. doi:10.1016/j.chemosphere.2018.11.193
- Brown R., McClelland N., Deininger A., Tozer R. (1970), A Water Quality Index - Do We Dare, Proceedings of the National Symposium on Data and Instrumentation for Water Quality Management, Conference of State Sanitary Engineers and Wisconsin University, July 21-23, 1970, Madison, WIS, p. 364-383.
- Bustos-Terrones, Y. A., Loaiza, J. G., Rangel-Peraza, J. G., & Rojas-Valencia, M. N. (2024). Evidencing anthropogenic pollution of surface waters in a tropical region: a case study of the Culiacan River basin. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(10), 901.
- Bustos-Terrones, Y. A., Loaiza, J. G., Rojas-Valencia, M. N., Rangel-Peraza, J. G., Ramírez-Pereda, B., & García-Sánchez, B. E. (2024). Hydrogeochemical Characterization of Groundwater Located in an Intensive Agricultural Area: The Culiacan River Aquifer Case Study. *Water Resources*, 51(5), 844-859.
- Cunha, D. G. F., do Carmo Calijuri, M., & Lamparelli, M. C. (2013). A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSIts). *Ecological Engineering*, 60, 126-134.
- Döndü, M., Özdemir, N., Demirak, A., Doğan, H. M., Dincer, N. G., & Keskin, F. (2024). Seasonal assessment of the impact of fresh waters feeding the Bay of Gökova with water quality index (WQI) and comprehensive pollution index (CPI). *Environmental Forensics*, 25(1-2), 68-80.
- Grangeon, T., Ceriani, V., Evrard, O., Grison, A., Vandromme, R., Gaillot, A., ... & Salvador-Blanes, S. (2021). Quantifying hydro-sedimentary transfers in a lowland tile-drained agricultural catchment. *Catena*, 198, 105033.



- Håkanson, L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Res.* 1979, 14, 975–1001.
- Hossain, M., & Patra, P. K. (2020). Water pollution index—A new integrated approach to rank water quality. *Ecological Indicators*, 117, 106668.
- Kothari, V., Vij, S., Sharma, S., & Gupta, N. (2021). Correlation of various water quality parameters and water quality index of districts of Uttarakhand. *Environmental and Sustainability Indicators*, 9, 100093.
- Langunu, S., Kilela Mwanasomwe, J., Colinet, G., & Ngoy Shutcha, M. (2024). Are Ecological Risk Indices for Trace Metals Relevant for Characterizing Polluted Substrates in the Katangese Copperbelt (DR Congo) and for Assessment of the Performance of Remediation Trials?. *Environments*, 11(6), 122.
- Li, R., Zou, Z., & An, Y. (2016). Water quality assessment in Qu River based on fuzzy water pollution index method. *Journal of environmental sciences*, 50, 87-92.
- Linjin, L., Baohui, M., & Rui, P. (2021). Water quality evaluation of Wenyu River based on single factor evaluation and comprehensive pollution index method. *Nature Environment and Pollution Technology*, 20(3), 1041-1046.
- Loaiza, J. G., Rangel-Peraza, J. G., Monjardín-Armenta, S. A., Bustos-Terrones, Y. A., Bandala, E. R., Sanhouse-García, A. J., & Rentería-Guevara, S. A. (2023). Surface water quality assessment through remote sensing based on the box–cox transformation and linear regression. *Water*, 15(14), 2606.
- Muñoz-Nájera, M.A., Tapia-Silva, F.O., Barrera-Escorcia, G., Ramírez-Romero, P. 2020. Statistical and geostatistical spatial and temporal variability of physico-chemical parameters, nutrients, and contaminants in the tenango dam, puebla, mexico. *J. Geochem. Explor.* 209, 106435. doi:10.1016/j.gexplo.2019.106435
- Oliveira, A. V. G. D., Azevedo-Cutrim, A. C. G. D., Cutrim, M. V. J., Cruz, Q. S. D., Rosas, R. S., & Sá, A. K. D. D. S. (2024). Assessment of the trophic status and water quality in an urbanised tropical estuary, Brazil. *Chemistry and Ecology*, 40(10), 1075-1091.

- Panda, P. K., Panda, R. B., & Dash, P. K. (2018). The study of water quality and pearson's correlation coefficients among different physico-chemical parameters of River Salandi, Bhadrak, Odisha, India. *American Journal of Water Resources*, 6(4), 146-155.
- Quevedo-Castro, A., Rangel-Peraza, J.G., Bandala, E., Amabilis-Sosa, L., Rodríguez-Mata, A., Bustos-Terrones, Y. 2018. Developing a water quality index in a tropical reservoir using a measure of multiparameters. *J. Water Sanit. Hyg. De.* 8, 752-766. doi:10.2166/washdev.2018.049
- Shi, R.; Zhao, J.; Shi, W.; Song, S.; Wang, C. Comprehensive Assessment of Water Quality and Pollution Source Apportionment in Wuliangshuai Lake, Inner Mongolia, China. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2020, 17, 5054. doi:10.3390/ijerph17145054.
- Tian, Y., Zhao, Y., Yin, Z., Deng, N., Li, S., Zhao, H., & Huang, B. (2025). Integrating spatial-temporal features into prediction tasks: A novel method for identifying the potential water pollution area in large river basins. *Journal of Environmental Management*, 373, 123522.
- Vargas-Solano, S. V., Rodríguez-González, F., Martínez-Velarde, R., Morales-García, S. S., & Jonathan, M. P. (2022). Removal of heavy metals present in water from the Yautepec River Morelos México, using *Opuntia ficus-indica* mucilage. *Environmental Advances*, 7, 100160.
- Yaghoubi, B., Hosseini, S. A., Nazif, S., Daghighi, A. 2020. Development of reservoir's optimum operation rules considering water quality issues and climatic change data analysis. *Sustain. Cities Soc.* 63, 102467. doi: 10.1016/j.scs.2020.10246