

Aplicación de técnicas de Química Analítica para la evaluación de la calidad de aguas de riego en sistemas agrícolas

Application of analytical chemistry techniques for the evaluation of irrigation water quality in agricultural systems

Dayana Leonela Martínez Castro

<https://orcid.org/00090008-1664-5192>

leonela1506@gmail.com

Universidad Técnica de Machala
El Oro – Ecuador

Erick Leonel Sanchez Cuenca

<https://orcid.org/0009-0000-8755-4169>

sanchez.010el@gmail.com

Universidad Técnica de Machala
El Oro – Ecuador

Allison Alejandra Villa Caamaño

<https://orcid.org/00090000-4079-6769>

allisonvilla73@gmail.com

Universidad Técnica de Machala
El Oro – Ecuador

Jennifer Dayana Villa Caamaño

<https://orcid.org/0009-0003-1232-7588>

jvillacaamano@gmail.com

Universidad Técnica de Machala
El Oro – Ecuador

*Artículo recibido: (la fecha la coloca el Equipo editorial) - Aceptado para publicación:
Conflictos de intereses: Ninguno que declarar.*

RESUMEN

El agua de riego es un recurso esencial en la producción agrícola, ya que su calidad influye en la fertilidad del suelo, el desarrollo de los cultivos y la inocuidad alimentaria. En los últimos años se ha incrementado la presencia de contaminantes emergentes y tensoactivos debido al vertido de aguas domésticas e industriales, lo que representa un riesgo ambiental y agronómico. El objetivo de este trabajo es analizar las principales técnicas de química analítica utilizadas para detectar y cuantificar estos contaminantes en aguas de riego, destacando su aplicación en laboratorios universitarios y sistemas agrícolas rurales. La metodología se basó en una revisión bibliográfica, considerando métodos instrumentales como la cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (LC-MS/MS), la cromatografía de gases (GC-MS) y la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), además de métodos específicos como MBAS y TOC. Los resultados muestran que la LC-MS/MS es la técnica más precisa para contaminantes polares,


mientras que MBAS resulta útil por su bajo costo. Finalmente, se proponen medidas de monitoreo y tratamiento mediante carbón activado y humedales artificiales, concluyendo que la química analítica es clave para mejorar la gestión del agua de riego y la sostenibilidad agrícola.

Palabras clave: aguas de riego, tensoactivos, contaminantes emergentes, LC-MS/MS, MBAS

ABSTRACT

Irrigation water is an essential resource in agricultural production, as its quality directly influences soil fertility, crop development, and food safety. In recent years, the presence of emerging contaminants and surfactants has increased due to domestic and industrial discharges, posing environmental and agronomic risks. The objective of this work is to analyze the main analytical chemistry techniques used to detect and quantify these contaminants in irrigation water, highlighting their application in university laboratories and rural agricultural systems. The methodology was based on a bibliographic review considering instrumental methods such as liquid chromatography coupled to tandem mass spectrometry (LC-MS/MS), gas chromatography (GC-MS), and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), as well as specific methods like MBAS and TOC. The results show that LC-MS/MS is the most precise technique for polar contaminants, while MBAS remains useful due to its low cost. Finally, monitoring and treatment measures using activated carbon and constructed wetlands are proposed, concluding that analytical chemistry is key to improving irrigation water management and agricultural sustainability.

Keywords: irrigation water, surfactants, emerging contaminants, LCMS/MS, MBAS

Todo el contenido de la Revista Científica Internacional Arandu UTIC publicado en este sitio está disponible bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 International. 

INTRODUCCIÓN

El agua de riego es un elemento esencial para la producción agrícola, pues su calidad influye directamente en el desarrollo de los cultivos, la productividad del suelo y la inocuidad de los alimentos. En los últimos años, el crecimiento poblacional, la urbanización y las actividades industriales han incrementado la descarga de aguas residuales hacia ríos y canales que luego se emplean para el riego. Estas descargas contienen diferentes compuestos denominados contaminantes emergentes, entre los que destacan los fármacos, productos de higiene personal, pesticidas, micro plásticos y tensoactivos de detergentes. Aunque sus concentraciones suelen ser bajas, su persistencia y acumulación en el ambiente pueden alterar las propiedades del suelo y afectar la fertilidad agrícola. (Hussein et al., 2024; Rajendran et al., 2025)

Ante esta situación, la química analítica ha adquirido un papel clave en el monitoreo y control de la calidad del agua. A través de técnicas de alta sensibilidad, como la cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (LC-MS/MS), la cromatografía de gases (GC-MS) y la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), es posible identificar y cuantificar contaminantes incluso en concentraciones muy bajas. En este contexto, el presente artículo tiene como propósito revisar las técnicas de química analítica aplicadas a la evaluación de la calidad del agua de riego, resaltando sus ventajas, limitaciones y su importancia en la gestión sostenible de los sistemas agrícolas. (Azam & Tripathi, 2025; Songara et al., 2025)

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente artículo de investigación ha sido desarrollado bajo revisión bibliográfica de carácter descriptivo el cual sintetiza la evidencia disponible acerca de las técnicas de química aplicable a la evaluación de calidad de agua de riego en sistemas agrícolas, este se fundamentó con la identificación y análisis de literatura especializada con el objetivo de determinar la efectividad, parámetros críticos y de aptitud para garantizar tanto la sostenibilidad como la seguridad del sector agro.

La búsqueda bibliográfica fue ejecutada de forma sistemática en las siguientes bases de datos científicas especializadas en el período enero 2020 a diciembre 2025 con última consulta realizada a fecha del 8 de diciembre del año 2025. En Google Scholar se realizó una búsqueda amplia de literatura académica multidisciplinaria con la siguiente ecuación de búsqueda ("analytical chemistry" OR "analytical techniques" OR "chemical analysis") AND ("irrigation water" OR "agricultural water" OR "water quality") AND ("physicochemical parameters" OR "heavy metals" OR "pesticides" OR "emerging contaminants" OR "polycyclic aromatic hydrocarbons" OR "PAHs") AND ("chromatography" OR "mass spectrometry" OR "spectroscopy" OR "GC-MS" OR "LC-MS" OR "HPLC" OR "ICP-MS") AND ("agricultural systems" OR "crop irrigation" OR "soil-water"); en ScienceDirect, repositorio de artículos científicos y técnico de Elsevier, se utilizó la siguiente fórmula de búsqueda (((("analytical

chemistry" OR "analytical techniques") AND ("irrigation water" OR "agricultural water") AND ("water quality assessment" OR "contamination monitoring") AND ("chromatography" OR "mass spectrometry" OR "spectroscopy" OR "ICP-MS" OR "GC-MS" OR "LC-MS")) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2026; para Scopus donde existen citas de literatura científica revisada por pares se utilizó: (((("heavy metals" OR "trace metals" OR "toxic metals") AND ("irrigation water" OR "agricultural water") AND ("ICP-MS" OR "ICP-OES" OR "atomic absorption" OR "spectroscopy") AND ("bioavailability" OR "speciation" OR "contamination" OR "risk assessment")))) AND PUBYEAR > 2019 AND DOCTYPE(ar).

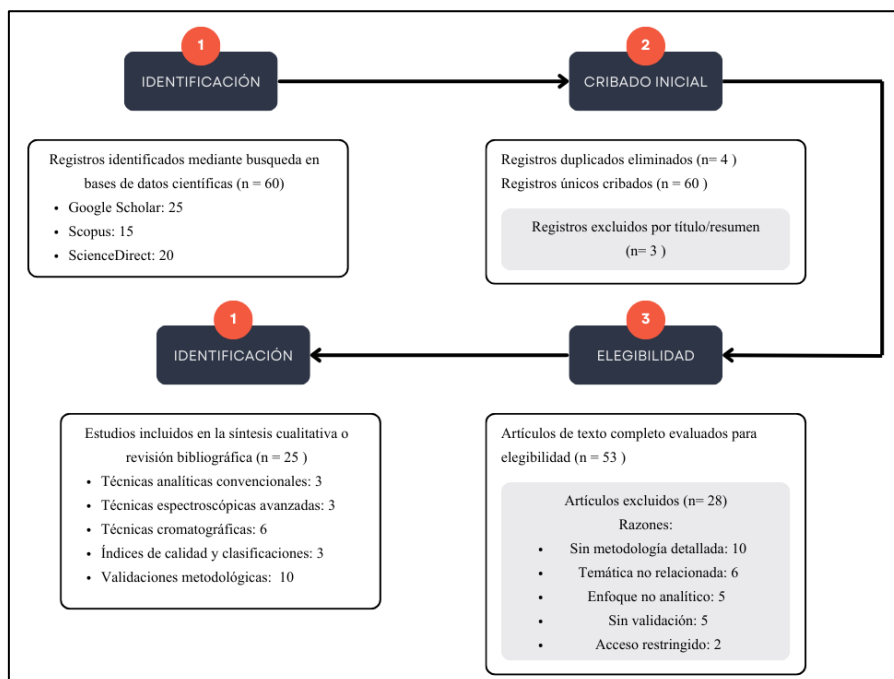
De modo que se utilizaron términos clave en inglés y español en relación con química analítica, calidad de agua, riego agrícola y técnicas instrumentales, los cuales fueron combinado mediante operadores booleanos (AND, OR, NOT) para aumentar la precisión de búsqueda obteniéndose 60 artículos

Se establecieron los siguientes criterios de inclusión para la participación de los estudios de revisión dentro del presente trabajo de investigación: artículos originales, meta – análisis, estudios de validación metodológica publicados en revistas científicas de revisión a pares, publicaciones en idioma inglés o español que tengan acceso al texto completo con una temporalidad no mayor a 5 años, cuya temática principal sea la aplicación de técnicas de química analítica para evaluar la calidad del agua con cuantificación de contaminantes. En contraste, los criterios de exclusión se basaron en publicaciones sin rigor científico como resúmenes de congresos sin publicación, tesis no publicadas, artículos de divulgación sin metodología detallada, tampoco se incluyeron investigaciones enteramente agronómicas o hidrológicas sin un análisis químico cuantitativo bajo parámetros de calidad, aquellas investigaciones sin acceso a texto completo, duplicados y en idiomas diferentes a inglés o español sin traducción disponible.

De modo que el proceso de selección se ejecutó en cuatro fases secuenciales siguiendo lineamientos adaptados a la declaración PRISMA: identificación, cribado inicial, elegibilidad e inclusión final dando un resultado de 25 artículos los cuales serán utilizados tanto para contextualización como para análisis de resultados y su posterior discusión. (Fig 1)

Figura 1

Diagrama de flujo metodológico



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se compararon los resultados obtenidos en los artículos seleccionados con el fin de identificar las técnicas analíticas más aplicadas, accesibilidad y efectividad para detectar contaminantes relevantes. Esta metodología permite construir una visión general sobre el uso de la química analítica como herramienta de control ambiental y de gestión sostenible del agua de riego en la agricultura.

RESULTADOS

La calidad del agua utilizada en la agricultura no depende únicamente de sus características físicas y salinas, sino también de su composición química y microbiológica. En los últimos años, distintos autores han reportado la presencia de contaminantes emergentes en aguas superficiales destinadas al riego. Estos compuestos provienen principalmente de aguas residuales domésticas, descargas industriales y escorrentía agrícola, las cuales transportan sustancias difíciles de eliminar mediante los tratamientos convencionales. (Hernández et al., 2023; Martínez-Huitle et al., 2024)

Según la Agencia de Protección Ambiental, los contaminantes emergentes comprenden sustancias como antibióticos, hormonas, pesticidas, cosméticos, micro plásticos y tensoactivos, muchas de las cuales no están reguladas por las normativas ambientales tradicionales. (Garizi et al., 2020; Ramírez-Morales et al., 2021)

Los tensoactivos son moléculas ampliamente utilizadas en detergentes, productos de limpieza y formulaciones agroquímicas. Su estructura química les permite disminuir la tensión superficial del agua, pero al llegar al suelo pueden alterar la permeabilidad, la aireación y la estructura de los agregados. Diversos estudios indican que concentraciones elevadas de

surfactantes pueden reducir la germinación de semillas, afectar la absorción de nutrientes y modificar la microflora benéfica del suelo. Además, en los sistemas de riego por goteo o aspersión, estos compuestos tienden a formar espumas y biofilm, obstruyendo los emisores y disminuyendo la eficiencia del sistema. (Intriago-Flores & Quiroz-Fernandez, 2021; Quinteros Carabalí et al., 2020)

Para detectar este tipo de contaminantes, la química analítica moderna ofrece una amplia variedad de técnicas instrumentales de alta sensibilidad. La cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (LC-MS/MS) es una de las más utilizadas, ya que permite separar e identificar compuestos polares y no volátiles con alta precisión. La cromatografía de gases (GC-MS) se emplea para la detección de contaminantes volátiles o semivolátiles, mientras que la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) permite analizar metales pesados asociados a residuos industriales o fertilizantes. (Barakat, 2022; Peluso et al., 2021)

En laboratorios universitarios o de campo se utilizan métodos más simples como MBAS y TOC, que facilitan el control básico de la calidad del agua y la detección de tensoactivos. El conjunto de estas herramientas permite establecer una caracterización integral del agua de riego, combinando la detección de contaminantes con parámetros agronómicos como la conductividad eléctrica (CE), el pH y la Relación de Adsorción de Sodio (SAR), esenciales para evaluar la aptitud del agua en la producción agrícola. (Madjar & Vasile Scăteanu, 2025)

Caracterización fisicoquímica y determinación de parámetros de calidad mediante técnicas analíticas convencionales

Con el objetivo de brindar contextualización acerca de cómo la determinación de parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, turbidez) en el agua de riego para cultivos agrícolas puede influir en la disponibilidad de nutrientes se presenta el estudio de (Biedunkova & Kuznietsov, 2025) en el cual se emplearon cromatografía líquida de intercambio iónico (LIC) para determinar cationes (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) y aniones (Cl^- , SO_4^{2-}) en aguas superficiales del río Styr, Ucrania, utilizando equipos Dionex ICS-1500 e ICS-2000 con columnas de intercambio aniónico (IonPac AS18) y catiónico (IonPac CS18), empleando bicarbonato de sodio 3.5 mM y ácido metilsulfónico 1.2 mM como eluyentes respectivamente. Los parámetros fisicoquímicos fundamentales mostraron que el pH, la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales (TDS) arrojaron valores entre 296-383 mg/dm³, con una distribución iónica específica donde Ca^{2+} y SO_4^{2-} dominaron la composición química del agua. La técnica LIC demostró alta precisión analítica con coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0.995 para todos los iones y desviaciones estándar relativas inferiores al 0.5%. El análisis de correlación de Pearson reveló relaciones positivas significativas entre TDS y las concentraciones iónicas individuales, particularmente entre Ca^{2+} y SO_4^{2-} , indicando procesos geoquímicos interconectados que influyen en la disponibilidad de nutrientes. El análisis de componentes principales identificó cinco componentes que explican la variabilidad de la composición iónica del agua. La evaluación

mediante el software AGREE confirmó que la metodología LIC presenta mayor sostenibilidad ambiental (0.82 puntos para aniones y 0.74 para cationes) comparada con métodos tradicionales como fotometría de llama (0.58) y titulación (0.38 – 0.48), consolidándose como una técnica eficiente, selectiva y ambientalmente responsable para la caracterización fisicoquímica de aguas de riego destinadas a garantizar prácticas agrícolas sostenibles.

Para la cuantificación de cationes y aniones (Pivić et al., 2022) evaluó 215 muestras de agua de riego en la cuenca de los tres ríos Morava, Serbia, empleando técnicas volumétricas y espectroscópicas. Los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} y Na^{+} fueron determinados mediante espectrofotometría de emisión atómica con fotometría de llama según metodología APHA, mientras que los aniones CO_3^{2-} , HCO_3^{-} y Cl^{-} se analizaron mediante técnicas volumétricas, y el SO_4^{2-} por método gravimétrico. Los resultados revelaron un orden de abundancia iónica de $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{K}^{+}$ para cationes y $\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^{-} > \text{CO}_3^{2-}$ para aniones. La conductividad eléctrica osciló entre 20 – 2260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con promedio de 650.91 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que los sólidos disueltos totales variaron de 50-2800 mg/L. El análisis hidrogeoquímico mediante diagramas de Piper identificó tres tipos hidroquímicos principales, siendo el tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca,Mg}$ predominante en 90.23% de las muestras, confirmando que la disolución de calcita y dolomita constituye el principal proceso geoquímico controlador. Las técnicas volumétricas demostraron ser efectivas para la determinación rápida de aniones, aunque presentan menor selectividad comparadas con métodos instrumentales. La espectrofotometría de llama resultó adecuada para alcalinos, proporcionando resultados confiables con error de balance de carga inferior al 5%. El estudio estableció que la combinación estratégica de métodos volumétricos convencionales y técnicas espectroscópicas permite caracterizar eficientemente la composición iónica de aguas de riego, identificando 95.34% de muestras aptas para uso agrícola según clasificaciones establecidas.

(Camacho-Ballesteros et al., 2020), con el objetivo de interpretar riesgos de salinidad, sodificación, capacidad de drenaje y toxicidad general decidió evaluar 89 muestras de aguas residuales en Oaxaca, México, mediante el cálculo de índices de calidad para riego agrícola basados en determinaciones analíticas convencionales. Los cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+}) fueron determinados por espectrofotometría de emisión de llama según métodos APHA, mientras que aniones (CO_3^{2-} , HCO_3^{-} , Cl^{-}) se cuantificaron volumétricamente y SO_4^{2-} gravimétricamente. La conductividad eléctrica fluctuó entre 80-2550 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con promedio de 475 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Se calcularon tres conceptualizaciones de RAS: RAS original (0.27-1.82-11.54), RAS ajustado considerando precipitación de CaCO_3 (0.05-2.76-23.51) según Bower, y RAS corregido incorporando presión parcial de CO_2 (0.18-1.87-12.66) según Suárez. El carbonato de sodio residual presentó valores de (-0.34)-0.74-8.10 mmol/L, clasificando 91.63% de muestras como seguras ($\text{CSR} < 1.25$) para riego según criterios de Wilcox. La relación funcional PSI-RAS demostró que para diferentes coeficientes de selectividad iónica (KG) representativos de suelos oaxaqueños, los valores máximos alcanzaron $\text{RASor} = 16.32$, $\text{RASaj} = 28.43$ y $\text{RAScorr} = 17.63$. Mediante el diagrama

de Richards, 51.68% de muestras correspondieron a clase C2-S1 (salinidad media, bajo sodio) y 37.08% a C1-S1 (baja salinidad y sodio), indicando aptitud para riego con manejo adecuado. El estudio estableció que la composición hidroquímica sulfático – clorhídrico – bicarbonatada requiere monitoreo constante mediante estos índices calculados, demostrando que la integración de parámetros fisicoquímicos en índices específicos constituye una herramienta efectiva para evaluar riesgos de salinización y sodificación en sistemas agrícolas bajo riego con aguas residuales tratadas.

La investigación realizada en una cuenca de Rajasthan, con el propósito de clasificar la hidroquímica del agua, evaluó la calidad de 95 muestras de agua subterránea durante periodos pre y post – monzónico, siguiendo métodos estandarizados. Los resultados mostraron que la clasificación hidroquímica mediante el diagrama de Piper reveló dominancia de facies mixtas Ca – Mg – Cl y tipo CaHCO_3 , mientras que el diagrama de Chadha confirmó aguas con dureza permanente durante el pre-monzón y temporal en post – monzón. El diagrama USSS clasificó las muestras principalmente en categorías C3S1 y C4S1, indicando alta salinidad, pero bajo riesgo sódico, apropiadas para riego con buen drenaje. Los índices calculados demostraron que durante el post – monzón, 90.48% del área presentó calidad dudosa según conductividad eléctrica, mientras que los valores de relación de adsorción de sodio permanecieron en categoría excelente en ambos periodos. El diagrama de Gibbs evidenció que la mayoría de muestras pertenecen a la zona de evaporación – cristalización, explicando el incremento de salinidad por concentración de sodio y cloruro. El índice de permeabilidad mostró 97.45% de muestras seguras durante post – monzón. Esta caracterización integral mediante diagramas agronómicos estableció que la calidad mejora significativamente después del monzón, con restricciones moderadas principalmente relacionadas con salinidad elevada en zonas específicas, requiriendo manejo especializado para cultivos tolerantes. (Dimple et al., 2023)

Evaluación de contaminantes traza mediante técnicas espectroscópicas avanzadas

Para la cuantificación de metales pesados tóxicos como plomo, cadmio, cromo y mercurio usualmente se utiliza una técnica analítica muy precisa como lo es la espectrometría de Masas con plasma acoplado inductivamente así pues la revisión exhaustiva sobre técnicas ICP-MS para monitoreo de contaminación en recursos hídricos realizada por (Balaram et al., 2023) demuestra avances significativos en la cuantificación de metales pesados tóxicos. Las diferentes configuraciones de ICP-MS (cuadrupolo, tandem ICP-MS/MS, HR – ICP – MS y MC – ICP – MS) han alcanzado límites de detección extraordinariamente bajos, llegando a niveles de picogramos por mililitro para elementos críticos como Pb (1.47 ng/ml), Cd (6.43 ng/ml), Hg (10.22 ng/ml) y Cr (6.13 ng/ml) mediante ICP – MS cuadrupolo convencional. La tecnología ICP – MS/MS ha revolucionado el análisis al reducir interferencias espectrales, logrando límites aún menores: Pb (9 pg/ml), Cr (4.2 pg/ml), As (90 pg/ml) y Hg (40 pg/ml) mediante química de colisión/reacción con gases como H_2 y O_2 . Los estudios reportan que HR-ICP-MS ofrece

precisión superior al 5% RSD para más de treinta elementos traza en matrices acuosas, validado con materiales de referencia certificados NIST. El análisis de especiación mediante HPLC-ICP-MS resulta fundamental para distinguir especies tóxicas específicas como Cr^{6+} versus Cr^{3+} , As^{3+} versus As^{5+} , y metilmercurio, donde la toxicidad varía drásticamente según la forma química. Las aplicaciones documentadas incluyen monitoreo de agua subterránea contaminada por actividades industriales, mineras y agrícolas, identificando fuentes geogénicas versus antropogénicas mediante análisis isotópico. Los estudios confirman que ICP – MS representa la técnica analítica más versátil y sensible para evaluación integral de calidad de aguas de riego, cumpliendo límites regulatorios internacionales de WHO y EPA, permitiendo detección temprana de contaminación y garantizando seguridad para uso agrícola sostenible.

El estudio de validación metodológica mediante ICP – MS para determinación de 24 elementos en agua potable de Antalya, Turquía, demuestra la efectividad analítica para cuantificar metaloides y elementos esenciales con potencial fitotóxico. El método validado alcanzó límites de detección entre 0.04 – 1.53 $\mu\text{g/L}$ para todos los elementos analizados, con coeficientes de correlación superiores a 0.9994 en curvas de calibración. Los valores de recuperación oscilaron entre 94 – 104% para los 24 isótopos monitoreados (^{75}As , ^{63}Cu , ^{66}Zn , ^{55}Mn , ^{57}Fe , ^{11}B , entre otros), con precisión expresada como %RSD entre 0.10-2.31%. La preparación preanalítica mediante digestión ácida (HNO_3 , HCl , HF) a 60°C resultó crucial para eliminar interferencias espectrales, particularmente la interferencia $^{40}\text{Ar}^{35}\text{Cl}$ sobre ^{75}As , preconcentrando analitos desde 100 mL iniciales hasta volumen final de 25 mL. El análisis de 50 muestras reveló concentraciones variables: arsénico (0.20 – 7.39 $\mu\text{g/L}$), hierro (10.41 – 86.38 $\mu\text{g/L}$), zinc (<LOD – 23.17 $\mu\text{g/L}$), cobre (<LOD-6.18 $\mu\text{g/L}$), manganeso (<LOD) y boro (<LOD). La estimación de incertidumbre expandida mediante factor de cobertura $k = 2$ proporcionó valores entre 4 – 32% para diferentes elementos, identificando la curva de calibración y recuperación como contribuyentes principales. El material de referencia certificado (CRM Enviro MAT – Drinking Water – Low) validó la exactitud del método con recuperaciones entre 98.8 – 101%. Esta metodología robusta garantiza trazabilidad metrológica y comparabilidad internacional, resultando fundamental para evaluar seguridad de aguas destinadas a riego agrícola, detectando elementos esenciales que en concentraciones elevadas presentan riesgos fitotóxicos para cultivos. (Kilic, 2023)

La investigación sobre especiación metálica en el microambiente ficosférico, capa límite alrededor de células fotosintéticas, revela aspectos críticos para evaluar biodisponibilidad de metales en aguas. El modelado de equilibrio mediante Visual MINTEQ 3.1 con el Modelo Húmico de Estocolmo demostró que alteraciones de pH y O_2 en la ficosfera modifican significativamente la especiación de 12 metales (Al, Cd, Co, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Sc, Sm, Zn). En algas marinas bajo luz, el pH aumentó 0.32 unidades promedio y O_2 incrementó 0.17 mM, mientras en oscuridad disminuyeron 0.10 unidades y 0.03 mM respectivamente. Para algas dulceacuícolas, los cambios fueron mayores: pH aumentó 1.28 unidades y O_2 creció 0.38 mM

bajo iluminación. Estos cambios alteraron la distribución entre ión libre, complejos inorgánicos y orgánicos. En agua marina con incremento de 0.3 unidades de pH, las concentraciones de iones libres disminuyeron: Cu^{2+} (50%), Pb (42%), Co (15%), Zn (39%) y Cd (10%). Para metales trivalentes, el efecto fue más pronunciado: complejos orgánicos de Al disminuyeron 4.5 veces, complejos inorgánicos de Fe aumentaron 1.5 veces, y Sm^{3+} libre se redujo 50%. Las fluctuaciones de O_2 incrementaron tasas de oxidación de Cu(I), Fe(II) y Mn(II) entre 2 – 938 veces. La validación mediante reanálisis de datos de captación metálica por fitoplancton confirmó que considerar especiación ficosférica mejora predicciones de biodisponibilidad tanto para metales divalentes como trivalentes. Esta comprensión resulta fundamental para evaluaciones precisas de calidad de aguas de riego, donde parámetros como pH, carbono orgánico disuelto (0.3 – 32 mg/L agua dulce; 0.14 – 16 mg/L agua marina) y condiciones redox determinan la especiación química y consecuente fitotoxicidad metálica. (Liu et al., 2020)

La investigación en suelos agrícolas bajo riego con aguas residuales en Wuqing, Tianjin, empleó técnicas analíticas avanzadas combinando ICP-MS y MC-ICP-MS para cuantificar 13 elementos (Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, P, Pb, Ti, V, Zn) y relaciones isotópicas de Cd y Pb. El índice de geoacumulación (Igeo) reveló contaminación moderada, con Cd exhibiendo valores entre 0.44 – 1.85 (58.33% sitios sin contaminar a moderadamente contaminados, 41.67% moderadamente contaminados) y Pb con rango -0.34 a 0.24 (25% sitios sin contaminar a moderadamente contaminados). Los contenidos promedio de Cd (0.26 ± 0.06 mg/kg) y Pb (29.92 ± 2.90 mg/kg) excedieron valores de referencia 2.03 – 5.39 y 1.18 – 1.77 veces respectivamente. El análisis mediante factorización de matriz positiva (PMF) integrado con análisis de correlación y componentes principales (PCA) identificó cuatro fuentes de contaminación cuantificadas: material parental del suelo (23.46% contribución), emisiones industriales (18.39%), prácticas agrícolas (29.97%), y fuentes mixtas de riego con aguas residuales más transporte (28.17%). Las relaciones isotópicas determinadas por MC-ICP-MS ($^{111}\text{Cd}/^{114}\text{Cd}$: 0.3845-0.4436; $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$: 2.1030 – 2.1382) mediante modelo EPA – IsoSource confirmaron contribuciones similares entre fuentes (diferencias <10%), indicando ausencia de fuente dominante única. Los errores relativos entre PMF e isótopos de Pb fueron <40% (fuentes agrícolas 20.73%, industriales 0.34%, material parental 12.84%, mixtas 4.25%), validando la robustez metodológica. Esta integración de técnicas espectroscópicas avanzadas con índices de contaminación y análisis multivariado constituye metodología efectiva para evaluar riesgos en sistemas de riego agrícola contaminados. (Wang et al., 2021)

Detección de contaminantes orgánicos mediante técnicas cromatográficas

(Munitz et al., 2022) desarrolló una investigación que validó metodologías cromatográficas para detección multiresiduo de seis plaguicidas (cyproconazole, epoxiconazole, kresoxim – metil, propiconazole, azoxystrobin, deltametrina) en aguas de riego arrozero mediante microextracción en fase sólida (SPME) acoplada a GC – μ ECD con confirmación por GC-MS. La optimización

metodológica estableció fibra PDMS 100µm, pH 7, agitación 200rpm, extracción 15min y desorción 250°C durante 5min como condiciones óptimas. El método validado según guía SANTE demostró linealidad $R^2 > 0.9945$, límites de detección 0.01 – 0.03 µg/L, límites de cuantificación 0.02 – 0.05 µg/L, recuperaciones 90.5 – 104.2% y precisión RSD <7.0% en tres niveles de concentración (0.5, 2.5, 10.0 µg/L). El análisis de 100 muestras de agua reveló frecuencia de ocurrencia 86%, detectando plaguicidas en concentraciones 0.51 – 4.26 µg/L, excediendo sistemáticamente el límite máximo permitido (0.1 µg/L) entre 11.6 – 43.6 veces. Los resultados mostraron 58 – 65% muestras positivas sobre LOD, con epoxiconazole presentando mayor prevalencia (65%). La co – ocurrencia de múltiples plaguicidas fue común, evidenciando contaminación multicomponente. Paralelamente, la metodología QuEChERS modificada para arroz alcanzó LOD 0.22 – 0.27 µg/kg y LOQ 0.72 – 0.90 µg/kg, con recuperaciones 98.9 – 107.8% y precisión RSD <8.1%. El análisis de 100 muestras comerciales detectó contaminación en 29 – 84% muestras, con concentraciones 0.77 – 72.39 µg/kg generalmente bajo LMR excepto epoxiconazole (36 muestras excedieron límites SENASA). Estos métodos cromatográficos demuestran sensibilidad, selectividad y robustez adecuadas para screening multiresiduo, permitiendo monitoreo efectivo de calidad de aguas de riego y productos agrícolas, identificando fuentes de contaminación y riesgos asociados al uso de aguas contaminadas en sistemas arroceros.

(Vistnes et al., 2022) comparó dos técnicas cromatográficas para determinar 16 hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) de la EPA en aguas de lavado de túneles viales en Noruega, aplicables a matrices agrícolas contaminadas. La extracción en fase sólida (SPE) con cartuchos C18 Bondesil y extracción acelerada con solventes (ASE) fueron acopladas a cromatografía de gases con espectrometría de masas (GC-MS) y cromatografía líquida de alta resolución con detectores de arreglo de diodos y fluorescencia (HPLC – DAD – FLD). La técnica GC-MS separó los 16 HAPs en 34.75 minutos utilizando columna TraceGOLD TG-5MS con gradiente de temperatura, mientras que HPLC – DAD – FLD completó la separación en 22.50 minutos mediante columna Zorbax Eclipse PAH con gradiente de acetonitrilo. Las recuperaciones absolutas oscilaron entre 57 – 104% para fase particulada y 42 – 79% para fase disuelta. GC – MS demostró límites de detección inferiores para 13 de 16 HAPs, siendo hasta dos órdenes de magnitud menores para naftaleno. En fase particulada, HAPs de alto peso molecular (BbF, BkF, BgP, DBA) se detectaron entre 0.043 – 0.93 µg/g, HAPs intermedios (FLT, PYR, BaA, CHR) entre 0.075-2.0 µg/g, mientras que HAPs de bajo peso molecular predominaron en fase disuelta (0.0098 – 0.50 µg/L). La comparación cruzada reveló que HPLC – DAD – FLD detectó algunos HAPs exclusivamente o en mayores concentraciones, indicando posibles falsos positivos por co – elución de compuestos fluorescentes isobáricos. El estudio estableció que GC-MS resulta preferible por su selectividad superior mediante identificación por relación masa/carga, mientras HPLC – DAD – FLD sirve como técnica complementaria de confirmación, demostrando la importancia de seleccionar metodologías analíticas apropiadas según matriz y analitos objetivo.

(Meher & Zarouri, 2025) revisó exhaustivamente las aplicaciones de espectrometría de masas para detectar contaminantes emergentes en matrices ambientales, incluyendo aguas de riego agrícola. La cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas en tándem (LC – MS/MS) demostró ser la técnica más efectiva para compuestos no volátiles y termolábiles como productos farmacéuticos, productos de cuidado personal y disruptores endocrinos. La espectrometría de masas de alta resolución (HR – MS) permitió la detección de contaminantes desconocidos mediante análisis no dirigido, facilitando la identificación de productos de transformación formados durante procesos naturales o tratamientos. Los autores destacaron que técnicas como Orbitrap y tiempo de vuelo (TOF) ofrecen precisión en mediciones de masa, permitiendo elucidar fórmulas moleculares y estructuras químicas. Para fármacos como bisfenol A y triclosan, LC – MS/MS alcanzó límites de detección de 1.13 – 5.45 ng/L en matrices acuosas complejas mediante extracción en fase sólida (SPE). La espectrometría de movilidad iónica acoplada a MS (IMS – MS) mejoró la selectividad analítica separando iones según forma y carga, diferenciando especies isoméricas e isobáricas. Las técnicas de ionización ambiental como DESI y DART revolucionaron el campo al permitir muestreo directo de superficies bajo condiciones ambientales, reduciendo tiempos de preparación. Los principales desafíos identificados incluyen efectos matrices, falta de protocolos estandarizados y bibliotecas espectrales limitadas para contaminantes emergentes. La integración de inteligencia artificial y aprendizaje automático en flujos de trabajo MS promete automatizar identificación de picos, clasificar compuestos y predecir productos de transformación. El estudio enfatizó que avances continuos en instrumentación MS, combinados con métodos robustos de preparación de muestras como QuEChERS y técnicas innovadoras como extracción dispersiva micro – SPE, son esenciales para monitoreo ambiental efectivo y evaluación de riesgos asociados con contaminantes emergentes en sistemas de riego agrícola.

(Centanni et al., 2024) evaluó la persistencia, movilidad y riesgo ecotoxicológico de cobre y glifosato en aguas de riego mediante modelización SWAT acoplada a determinaciones cromatográficas. Las muestras de agua superficial fueron analizadas quincenalmente durante 2021 mediante cromatografía de gases y líquidos acoplada a espectrometría de masas (GC/LC – MS) con límite de cuantificación $<0.5 \mu\text{g/L}$. El cobre fue cuantificado mediante espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente según UNI EN ISO 17294 – 2:2016 (límite $0.5 \mu\text{g/L}$), detectándose en todas las muestras con concentración mediana de $2.1 \mu\text{g/L}$ (máximo $6.2 \mu\text{g/L}$). El glifosato se detectó en ocho muestras con mediana de $0.29 \mu\text{g/L}$ (máximo $0.42 \mu\text{g/L}$), excediendo el estándar europeo de calidad ambiental (EQS) de $0.1 \mu\text{g/L}$ establecido por Directiva 2020/2184/UE. El modelo SWAT, calibrado satisfactoriamente ($R^2=0.63$, $\text{NSE}=0.50$, $\text{PBIAS}=21.6\%$ para cobre; $R^2=0.78$, $\text{NSE}=0.57$, $\text{PBIAS}=6.8\%$ para glifosato), predijo concentraciones ambientales (PEC) de $0\text{-}245 \mu\text{g/L}$ para cobre y $0\text{-}8.5 \mu\text{g/L}$ para glifosato. Los parámetros críticos de calibración fueron el coeficiente de adsorción al carbono orgánico del suelo

(SKOC), eficiencia de aplicación (AP_EF), coeficiente de percolación (PERCOP) y coeficiente de reacción en sedimentos (SEDPST_REA). La evaluación ecotoxicológica mediante relación Toxicidad – Exposición (TER) reveló riesgo crónico para cobre (TER<10) en múltiples tramos fluviales durante noviembre – enero, coincidiendo con aplicaciones y escorrentía superficial elevada. El glifosato presentó riesgo agudo (TER<100) para organismos bentónicos en marzo – abril y noviembre, con duración típica < 24 horas, demostrando rápida disipación post – aplicación y relación directa entre picos de concentración y eventos pluviométricos.

Tabla 1

Comparación de Técnicas Analíticas para Evaluación de Calidad de Aguas de Riego

Técnica Analítica	Analitos Determinados	Ventajas	Desventajas	Costo Relativo
Cromatografía Líquida de Intercambio Iónico (LIC)	Cationes (Na ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺), Aniones (Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻)	- Alta precisión (R ² > 0.995) - RSD < 0.5% - Alta sostenibilidad ambiental (0.82 puntos) - Selectividad superior	- Requiere instrumentación especializada - Preparación de muestras específica	Alto
Espectrofotometría de Emisión Atómica con Fotometría de Llama	Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺ , Na ⁺	- Resultados confiables - Error de balance de carga < 5% - Adecuada para alcalinos - Rapidez analítica	- Menor sostenibilidad ambiental (0.58 puntos) - Menor selectividad vs métodos instrumentales	Medio
Métodos Volumétricos (Titulación)	CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ , Cl ⁻	- Bajo costo - Determinación rápida - No requiere instrumentación compleja	- Menor selectividad - Baja sostenibilidad (0.38-0.48 puntos) - Mayor susceptibilidad a interferencias	Bajo
Método Gravimétrico	SO ₄ ²⁻	- Alta precisión - No requiere calibración constante - Bajo costo operativo	- Tiempo de análisis prolongado - Requiere mayor cantidad de muestra	Bajo-Medio
ICP-MS (Cuadrupolo)	Pb, Cd, Hg, Cr, elementos traza	- Límites de detección ultrasensibles - Análisis multielemental simultáneo - Amplio rango dinámico	- Costo inicial elevado - Requiere personal altamente capacitado - Interferencias espectrales	Muy Alto

		- Cumple estándares WHO/EPA		
ICP-MS/MS (Tándem)	As, Pb, Cr, Hg	- Reducción significativa de interferencias - Sensibilidad extremadamente alta - Química de colisión/reacción efectiva	- Costo muy elevado - Complejidad operacional - Mantenimiento especializado	Muy Alto
HR-ICP-MS	> 30 elementos traza	- Precisión superior - Resolución de masa alta - Validación con CRM	- Demasiado costoso - Requiere infraestructura avanzada	Muy Alto
MC-ICP-MS	Relaciones isotópicas ($^{111}\text{Cd}/^{114}\text{Cd}$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$)	- Identificación de fuentes de contaminación - Diferenciación geogénica/antropogénica - Trazabilidad de contaminantes	- Costo prohibitivo - Aplicación especializada - Análisis prolongado	Extremadamente Alto
SPME-GC-μECD	Plaguicidas (cyproconazole, epoxiconazole, kresoxim-metil, etc.)	- Bajo consumo de solventes - Recuperaciones 90.5-104.2% - RSD < 7.0% - Método verde	- Requiere optimización por matriz - Tiempo de análisis moderado	Medio-Alto
GC-MS	HAPs (16 EPA), plaguicidas	- Alta selectividad - Identificación por m/z - Confirmación estructural - Separación 34.75 min	- Limitado a compuestos volátiles - Derivatización necesaria para algunos analitos	Alto
HPLC-DAD-FLD	HAPs, compuestos polares	- Análisis rápido (22.50 min) - Compuestos termolábiles - Múltiples detectores	- Posibles falsos positivos - Co-elución de compuestos fluorescentes - Menor selectividad vs GC-MS	Alto
LC-MS/MS	Productos farmacéuticos, disruptores endocrinos, contaminantes emergentes	- Ideal para compuestos no volátiles - Alta sensibilidad - Análisis dirigido efectivo	- Efectos matriz significativos - Costo elevado de mantenimiento - Bibliotecas espectrales limitadas	Muy Alto

HR-MS (Orbitrap/TOF)	Contaminantes emergentes desconocidos	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis no dirigido - Identificación de productos de transformación - Elucidación estructural 	<ul style="list-style-type: none"> - Demasiado costoso - Requiere bioinformática avanzada - Interpretación compleja 	Demasiado Alto
---------------------------------	---------------------------------------	--	--	----------------

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2

Contaminantes Emergentes en Aguas de Riego: Concentraciones Reportadas y Efectos Documentados

Contaminante	Tipo	Concentración Reportada	Efectos Documentados	Matriz Analizada
Epoxiconazole	Fungicida	0.51-4.26 µg/L (agua) Prevalencia: 65% muestras Excede LMP 11.6-43.6 veces	<ul style="list-style-type: none"> - Alta frecuencia de detección - Contaminación multicomponente - Persistencia en sistemas arroceros - 36 muestras de arroz excedieron LMR 	Agua de riego arroceros
Cyproconazole	Fungicida	0.51-4.26 µg/L	<ul style="list-style-type: none"> - Co-ocurrencia con otros plaguicidas - Excede límite máximo permitido 	Agua de riego arroceros
Kresoxim-metil	Fungicida	Detectado en 58-65% muestras	<ul style="list-style-type: none"> - Persistencia en aguas superficiales - Contaminación sistemática 	Agua de riego arroceros
Propiconazole	Fungicida	Detectado en muestras positivas	<ul style="list-style-type: none"> - Frecuencia de ocurrencia 86% - Riesgo de bioacumulación 	Agua de riego arroceros
Azoxystrobin	Fungicida	Detectado en sistema arroceros	<ul style="list-style-type: none"> - Contaminación multiresiduo - Impacto en calidad de agua 	Agua de riego arroceros
Deltametrina	Insecticida	Detectado en muestras	<ul style="list-style-type: none"> - Toxicidad para organismos acuáticos - Persistencia ambiental 	Agua de riego arroceros
Glifosato	Herbicida	Mediana: 0.29 µg/L Máximo: 0.42 µg/L Detectado en 8 muestras	<ul style="list-style-type: none"> - Excede estándar europeo - Riesgo agudo (TER<100) para bentónicos - Picos relacionados con eventos pluviométricos 	Agua superficial de riego

			- Rápida disipación (<24 h post-aplicación)	
Cobre (Cu)	Metal pesado / Fungicida	Mediana: 2.1 µg/L Máximo: 6.2 µg/L PEC: 0-245 µg/L (modelo SWAT)	- Riesgo crónico (TER<10) noviembre-enero - Detectado en todas las muestras - Persistencia y movilidad elevadas - Relación con escorrentía superficial	Agua superficial de riego
Cadmio (Cd)	Metal pesado	0.26±0.06 mg/kg (suelo) Excede referencia 2.03-5.39 veces	- Contaminación moderada (Igeo: 0.44-1.85) - 58.33% sitios moderadamente contaminados - Fuentes: agrícolas (29.97%), industriales (18.39%), riego residual (28.17%)	Suelo bajo riego con aguas residuales
Plomo (Pb)	Metal pesado	29.92±2.90 mg/kg (suelo) Excede referencia 1.18-1.77 veces	- Igeo: -0.34 a 0.24 - 25% sitios moderadamente contaminados - Fuentes mixtas identificadas isotópicamente - Contribución transporte/riego residual significativa	Suelo bajo riego con aguas residuales
Arsénico (As)	Metaloide	0.20-7.39 µg/L	- Variabilidad significativa en agua potable - Interferencias espectrales (⁴⁰ Ar ³⁵ Cl) - Requiere preconcentración analítica	Agua potable (aplicable a riego)
Mercurio (Hg)	Metal pesado	Límites detección reportados	- Alta toxicidad según especiación (metilmercurio) - Biodisponibilidad variable según pH y materia orgánica	Aguas diversas
Cromo (Cr)	Metal pesado	Límites detección reportados	- Toxicidad variable según especie química	Aguas diversas

			- Cr ⁶⁺ altamente tóxico vs Cr ³⁺ esencial - Requiere análisis de especiación	
HAPs (16 EPA)	Hidrocarburos aromáticos policíclicos	Fase disuelta: 0.0098-0.50 µg/L Fase particulada: 0.043-0.93 µg/g (BbF, BkF, BgP, DBA)	- Diferenciación por peso molecular - HAPs alto PM en particulados - HAPs bajo PM en fase disuelta - Riesgo carcinogénico	Aguas de lavado de túneles (aplicable a riego contaminado)
Bisfenol A (BPA)	Disruptor endocrino	LOD: 1.13-5.45 ng/L	- Alteración sistema endocrino - Persistencia en matrices acuosas - Contaminante emergente prioritario	Matrices acuosas complejas
Triclosan	Antimicrobiano	LOD: 1.13-5.45 ng/L	- Bioacumulación - Resistencia antimicrobiana - Efectos en ecosistemas acuáticos	Matrices acuosas

Fuente: Elaboración propia

DISCUSIÓN

A partir del análisis de los estudios revisados se identificó que, en su mayoría, coinciden en que la presencia de contaminantes emergentes y tensoactivos en aguas de riego es un problema cada vez más frecuente en los sistemas agrícolas de América Latina y otras regiones con fuerte actividad agroindustrial. La literatura consultada destaca que fármacos, pesticidas y surfactantes son compuestos con más prevalencia y concentraciones que oscilan entre microgramos y nanogramos por litro. A pesar de que estos niveles son bajos, su persistencia en campos de cultivo puede generar efectos acumulativos sobre el suelo y las plantas.

El estudio propuesto por (Munitz et al., 2022) habría de confirmar esta problemática en cultivos arroceros, donde la fuente de riego es lo más importante, en los cuales se identificaron seis plaguicidas diferentes en un 86% de sus plantaciones que excedieron el límite máximo permitido.

Se señala que la técnica LC-MS/MS es la más eficiente para identificar y cuantificar contaminantes orgánicos polares, debido a su alta sensibilidad y precisión. Como se describió previamente esta técnica permite detectar simultáneamente más de 50 compuestos diferentes en una sola corrida analítica. En cambio, la GC-MS resulta más adecuada para compuestos volátiles o semivolátiles, como solventes y pesticidas persistentes. Paralelamente, la ICP-MS es utilizada

para determinar la concentración de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico) que pueden provenir de fertilizantes o descargas industriales.

En laboratorios universitarios o rurales, los métodos MBAS y TOC se presentan como alternativas prácticas y económicas. El primero permite detectar tensoactivos aniónicos, mientras que el segundo ofrece una visión general de la carga orgánica del agua. Sin embargo, la evidencia científica manifiesta que incluso las técnicas analíticas convencionales pueden proporcionar información importante para el agricultor sin necesidad de recurrir a metodología con inversión excesiva. Así sabemos que la cromatografía líquida usada por (Biedunkova & Kuznietsov, 2025) demostró alta precisión analítica con coeficientes de determinación superiores para todos los iones con una desviación estándar menor al 0.5% alcanza sostenibilidad ambiental comparada con el método de fotometría de llama y titulación.

Los resultados analizados en las distintas fuentes consultadas demuestran que la presencia de contaminantes emergentes y tensoactivos en aguas de riego es una problemática creciente en la agricultura moderna. Estos compuestos, provenientes de actividades domésticas, industriales y agrícolas, pueden alterar las propiedades físico-químicas del suelo, reducir la fertilidad y afectar la productividad de los cultivos. Si bien las técnicas instrumentales como LC-MS/MS, GC-MS e ICP-MS ofrecen alta sensibilidad y precisión, su uso en laboratorios rurales es limitado por el costo y la necesidad de personal capacitado. En este sentido, los métodos simples como MBAS o TOC se mantienen como alternativas accesibles para el monitoreo básico, permitiendo a las instituciones educativas y agrícolas realizar controles de calidad sin depender de equipos especializados.

La revisión bibliográfica también evidencia la necesidad de fortalecer la gestión del recurso hídrico a través del uso combinado de métodos analíticos y prácticas agronómicas sostenibles. La aplicación de humedales artificiales, filtros de carbón activado y la reutilización controlada de aguas residuales tratadas se presentan como opciones viables para reducir la carga contaminante. Además, se destaca la importancia de implementar políticas locales de monitoreo continuo y capacitación técnica, que garanticen la calidad del agua de riego y contribuyan a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. En conjunto, la química analítica se consolida como una herramienta clave para preservar los recursos naturales y promover una producción agrícola responsable.

CONCLUSIÓN

El análisis realizado demuestra que la química analítica cumple un papel fundamental en la evaluación de la calidad del agua destinada al riego agrícola. A través de la revisión de diferentes estudios se comprobó que las técnicas instrumentales, como la LC-MS/MS, GC-MS e ICP-MS, permiten detectar contaminantes en concentraciones muy bajas y ofrecen resultados confiables para la toma de decisiones agronómicas. Sin embargo, su aplicación en laboratorios rurales aún enfrenta limitaciones por los costos y la necesidad de personal capacitado.

Por otro lado, los métodos colorimétricos como MBAS y el análisis de carbono orgánico total representan una alternativa viable para los laboratorios universitarios o de campo, ya que permiten un control básico de la calidad del agua sin requerir equipamiento costoso. La revisión también evidencia que los contaminantes emergentes y los tensoactivos pueden alterar las propiedades del suelo y afectar el crecimiento de los cultivos, por lo que su monitoreo debe integrarse dentro del manejo agrícola sostenible.

En conclusión, combinar las herramientas de la química analítica con prácticas agronómicas adecuadas permite optimizar el uso del recurso hídrico, proteger la productividad de los suelos y fortalecer la sostenibilidad de la agricultura.

REFERENCIAS

- Azam, M. M., & Tripathi, J. K. (2025). Health and ecological risk assessment of metals in surface water from the Himalayan tributaries of the Ganga river, India. *Geochemical Transactions*, 26(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s12932-025-00100-7>
- Balaram, V., Copia, L., Kumar, U. S., Miller, J., & Chidambaram, S. (2023). Pollution of water resources and application of ICP-MS techniques for monitoring and management—A comprehensive review. In *Geosystems and Geoenvironment* (Vol. 2, Issue 4). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2023.100210>
- Barakat, A. I. (2022). Evaluation of water pollution using physicochemical parameters, heavy metals concentrations, and organic pollutants: Study area El-Behaira Governorate. *Journal of Medical and Life Science*, 4(4), 105–119. <https://doi.org/10.21608/jmals.2022.361047>
- Biedunkova, O., & Kuznietsov, P. (2025). Liquid Ion Chromatographic Determination of Soluble Ions in Water: Comparison of Greenness and Comprehensive Assessment of Irrigation Suitability. *Water, Air, and Soil Pollution*, 236(5). <https://doi.org/10.1007/s11270-025-07975-3>
- Camacho-Ballesteros, A., Ortega-Escobar, H. M., Sánchez-Bernal, E. I., & Can-Chulim, Á. (2020). Quality indicators physical chemistry of wastewater of state Oaxaca, Mexico. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 361–34736. <https://doi.org/10.28940/TERRA.V38I2.610>
- Centanni, M., Ricci, G. F., De Girolamo, A. M., & Gentile, F. (2024). Modeling pesticides and ecotoxicological risk assessment in an intermittent river using SWAT. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56991-6>
- Dimple, Singh, P. K., Kothari, M., Yadav, K. K., & Bhakar, S. R. (2023). Groundwater quality analysis using different water quality indices in the hard rock aquifer region in semi-arid environment. *Water Supply*, 23(7). <https://doi.org/10.2166/ws.2023.150>
- Garizi, A. Z., Sheikh, V., & Sadoddin, A. (2020). Assessment of seasonal variations of chemical characteristics in surface water using multivariate statistical methods. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 8(3), 581–592. <https://doi.org/10.1007/BF03326244>
- Hernández, F., Fabregat-Safont, D., Campos-Mañas, M., & Quintana, J. B. (2023). Efficient Validation Strategies in Environmental Analytical Chemistry: A Focus on Organic Micropollutants in Water Samples. *Annual Review of Analytical Chemistry*, 16(1), 401–428. <https://doi.org/10.1146/annurev-anchem-091222-112115>
- Hussein, E. E., Derdour, A., Zerouali, B., Almaliki, A., Wong, Y. J., Ballesta-de los Santos, M., Minh Ngoc, P., Hashim, M. A., & Elbeltagi, A. (2024). Groundwater Quality Assessment and Irrigation Water Quality Index Prediction Using Machine Learning Algorithms. *Water*, 16(2), 264. <https://doi.org/10.3390/w16020264>

- Intriago-Flores, J., & Quiroz-Fernandez, L. (2021). Calidad del agua de la cuenca media del río Portoviejo. Estrategias para mitigar la contaminación. *Polo Del Conocimiento*, 6(6), 1144–1171.
- Kilic, M. (2023). Validation and measurement uncertainty of the determination of 24 elements in drinking water using ICP-MS. *Water Practice and Technology*, 18(12), 3299–3314. <https://doi.org/10.2166/wpt.2023.218>
- Liu, F., Tan, Q. G., Weiss, D., Crémazy, A., Fortin, C., & Campbell, P. G. C. (2020). Unravelling Metal Speciation in the Microenvironment Surrounding Phytoplankton Cells to Improve Predictions of Metal Bioavailability. *Environmental Science and Technology*, 54(13), 8177–8185. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07773>
- Madjar, R. M., & Vasile Scăteanu, G. (2025). An Overview of Heavy Metal Contamination in Water from Agriculture: Origins, Monitoring, Risks, and Control Measures. *Sustainability*, 17(16), 7368. <https://doi.org/10.3390/su17167368>
- Martínez-Huitle, C. A., Montagner, C. C., Hinojosa-Reyes, L., & Aguilar-Cordero, J. C. (2024). Environmental/analytical chemistry and/or toxicology and risk assessments in Latin-American countries. *Chemosphere*, 350, 141110. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141110>
- Meher, A. K., & Zarouri, A. (2025). Environmental Applications of Mass Spectrometry for Emerging Contaminants. In *Molecules* (Vol. 30, Issue 2). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/molecules30020364>
- Munitz, M. S., Medina, M. B., Ravio, F., Subovich, G., Novoa, M., Williman, C., & Parma, F. (2022). Determinación de plaguicidas en agua de riego en cultivos arroceros, granos de arroz y subproductos. *Suplemento CDyT*, 12(13), 462–485.
- Peluso, J., Pérez Coll, C. S., Cristos, D., Rojas, D. E., & Aronzon, C. M. (2021). Comprehensive assessment of water quality through different approaches: Physicochemical and ecotoxicological parameters. *Science of The Total Environment*, 800, 149510. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149510>
- Pivić, R., Maksimović, J., Dinić, Z., Jaramaz, D., Majstorović, H., Vidojević, D., & Stanojković-sebić, A. (2022). Hydrochemical Assessment of Water Used for Agricultural Soil Irrigation in the Water Area of the Three Morava Rivers in the Republic of Serbia. *Agronomy*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/agronomy12051177>
- Quinteros Carabalí, J. A., Gómez-García, J., Solano, M., Llumiquinga, G., Burgos, C., & Carrera-Villacrés, D. (2020). Evaluación de la calidad de agua para riego y aprovechamiento del recurso hídrico de la quebrada Togllahuayco. *Siembra*, 6(2), 046–057. <https://doi.org/10.29166/siembra.v6i2.1641>
- Rajendran, S., Sivaprakasam, V., Sathyanarayanan, B., Gunasekaran, S., Periyasami, S., & Jeyasingh, V. (2025). Seasonal hydrogeochemical insights of groundwater quality and its

- suitability for drinking and irrigational purposes in Pennagaram and Palacode Taluk, Dharmapuri district, Tamil Nadu, India. *Environmental Earth Sciences*, 84(13), 353. <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12358-2>
- Ramírez-Morales, D., Pérez-Villanueva, M. E., Chin-Pampillo, J. S., Aguilar-Mora, P., Arias-Mora, V., & Masis-Mora, M. (2021). Pesticide occurrence and water quality assessment from an agriculturally influenced Latin-American tropical region. *Chemosphere*, 262, 127851. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127851>
- Songara, Y., Singhal, A., Garg, R. D., & Rallapalli, S. (2025). Hydro-chemical profiling and contaminant source identification in agricultural canals using data driven clustering approaches. *Scientific Reports*, 15(1), 24806. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08620-z>
- Vistnes, H., Sossalla, N. A., Røsvik, A., Gonzalez, S. V., Zhang, J., Meyn, T., & Asimakopoulos, A. G. (2022). The Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) with HPLC-DAD-FLD and GC-MS Techniques in the Dissolved and Particulate Phase of Road-Tunnel Wash Water: A Case Study for Cross-Array Comparisons and Applications. *Toxics*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/toxics10070399>
- Wang, J., Yu, D., Wang, Y., Du, X., Li, G., Li, B., Zhao, Y., Wei, Y., & Xu, S. (2021). Source analysis of heavy metal pollution in agricultural soil irrigated with sewage in Wuqing, Tianjin. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96367-8>