

Estabilidad hidrogeoquímica y vulnerabilidad microbiológica del agua subterránea del acuífero de Morroa (Colombia): implicaciones para la seguridad del agua potable

Hydrochemical stability and microbiological vulnerability of groundwater in the Morroa aquifer (Colombia): implications for drinking water safety

Luz E. Vargas-Ortiz¹, Carlos A. Severiche-Sierra², Yesid A. Marrugo-Ligardo²

(1) Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias, Colombia

(2) Grupo de Investigación Medio Ambiente, Alimentos y Salud "MA.A.S", Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias, Colombia

*autor de correspondencia (ymarrugol@unicartagena.edu.co)

Recibido 01/06/2026

Evaluado 23/07/2026

Aceptado 20/08/2026

<https://doi.org/10.65093/aci.v17.n3.2026.59>

RESUMEN

El acuífero de Morroa, en el departamento de Sucre (Colombia), es una fuente estratégica para el abastecimiento humano. Este estudio evaluó la calidad fisicoquímica y microbiológica de diez puntos de captación durante el segundo semestre de 2025. Se determinaron pH, alcalinidad total, dureza total, dureza cálcica, cloruros, coliformes totales y coliformes fecales mediante procedimientos estandarizados. El agua presentó pH ligeramente alcalino (7.81-8.23) y alcalinidad elevada (205.6-263.2 mg CaCO₃/L), con baja variabilidad relativa. La dureza y los cloruros mostraron mayor heterogeneidad espacial, especialmente por un incremento puntual de cloruros en P3. En P2, P7, P8 y P10 se detectaron coliformes totales y fecales, lo que impide el consumo directo. Aunque la composición fisicoquímica fue relativamente estable, la contaminación microbiológica compromete la seguridad sanitaria del recurso y exige desinfección, protección de las captaciones y monitoreo periódico.

Palabras clave: coliformes fecales, alcalinidad, abastecimiento humano, riesgo sanitario

ABSTRACT

The Morroa aquifer in Sucre, Colombia, is a strategic source for human supply. This study evaluated the physicochemical and microbiological quality of ten abstraction points during the second half of 2025. pH, total alkalinity, total hardness, calcium hardness, chlorides, total coliforms, and fecal coliforms were determined using standardized procedures. The water was slightly alkaline (pH 7.81-8.23) and showed high alkalinity (205.6-263.2 mg CaCO₃/L), with low relative variability. Hardness and chlorides were more spatially heterogeneous, particularly because of a localized chloride increase at P3. Total and fecal coliforms were detected at P2, P7, P8, and P10, preventing direct consumption. Although the physicochemical composition was relatively stable, microbiological contamination compromises the sanitary safety of the resource and requires disinfection, protection of abstraction points, and periodic monitoring.

Keywords: fecal coliforms, alkalinity, human supply, sanitary risk

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea constituye una reserva esencial para el abastecimiento humano, la agricultura y diversas actividades productivas, especialmente en zonas rurales y periurbanas con cobertura limitada de acueducto y saneamiento. Aunque suele presentar mayor estabilidad que las aguas superficiales, su calidad depende tanto de la interacción agua-roca como de presiones antrópicas que pueden comprometer su uso (Cerón *et al.*, 2021; Aranguren *et al.*, 2024; Karandish *et al.*, 2025).

La composición fisicoquímica de los acuíferos responde a procesos de disolución mineral, intercambio iónico y tiempo de residencia, que suelen generar aguas ligeramente alcalinas y con capacidad amortiguadora. Sin embargo, una condición hidrogeoquímica estable no equivale a potabilidad, porque puede coexistir con contaminación microbiológica derivada de infiltraciones, sistemas sépticos deficientes, actividades agropecuarias o disposición inadecuada de residuos (Dávalos *et al.*, 2021; López, 2023; Debassi *et al.*, 2025).

La presencia de coliformes totales y fecales ha sido documentada en fuentes subterráneas químicamente aceptables de distintos contextos rurales y periurbanos. Estos indicadores evidencian fallas de protección sanitaria y obligan a valorar de manera conjunta los componentes fisicoquímico y microbiológico, especialmente cuando el agua se destina al consumo humano sin tratamiento previo (Kadaoui *et al.*, 2019; Gonzales *et al.*, 2023; Jabeen *et al.*, 2025; Odewade *et al.*, 2025).

En Colombia, el aprovechamiento de pozos aumenta donde las fuentes superficiales o los sistemas de distribución presentan limitaciones. Estudios nacionales han identificado heterogeneidad química, contaminación de origen doméstico y agropecuario, y riesgos asociados a ocupación urbana sin alcantarillado, lo que respalda la necesidad de vigilancia integrada y protección de las zonas de captación (Fonseca *et al.*, 2019; Huerfano *et al.*, 2023; Acosta *et al.*, 2025).

El acuífero de Morroa, localizado en el departamento de Sucre, abastece a varios municipios del Caribe colombiano y posee alta relevancia ambiental y sanitaria (Abad *et al.*, 2023). Por ello, el objetivo de este estudio fue evaluar la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua subterránea en diez puntos de captación, determinar su aptitud para consumo humano e identificar implicaciones para su seguimiento y gestión.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se desarrolló en el acuífero de Morroa, localizado en el departamento de Sucre, región Caribe de Colombia. Este sistema constituye una fuente estratégica de abastecimiento para varios municipios. La delimitación general del acuífero y su contexto regional se presentan en la Figura 1.

El sistema está asociado a materiales sedimentarios con presencia de compuestos carbonatados, condición que favorece aguas ligeramente alcalinas y con capacidad amortiguadora, como se ha descrito para acuíferos controlados por interacción agua-roca (Dávalos *et al.*, 2021; López, 2023).

Diseño del estudio y muestreo

Se realizó un estudio descriptivo de corte transversal durante el segundo semestre de 2025. Se evaluaron diez puntos de captación distribuidos en tres sectores del acuífero, seleccionados para representar espacialmente el área de estudio y explorar la variabilidad fisicoquímica y microbiológica. La información disponible consignó una coordenada de referencia por sector en el sistema WGS 84/UTM, zona 18N: El Rosario-Finca San Pedro (466 215 m E; 1 031 905 m N), correspondiente a P1-P3; El Rincón (469 590 m E; 1 034 571 m N), correspondiente a P4-P7; y Las Flores-Finca El Rosario (464 736 m E; 1 031 018 m N), correspondiente a P8-P10. Debido a que no se contó con coordenadas individuales verificables para cada captación, la interpretación espacial se realizó a escala sectorial y la ubicación de P1-P10 en la Figura 1 debe considerarse aproximada.

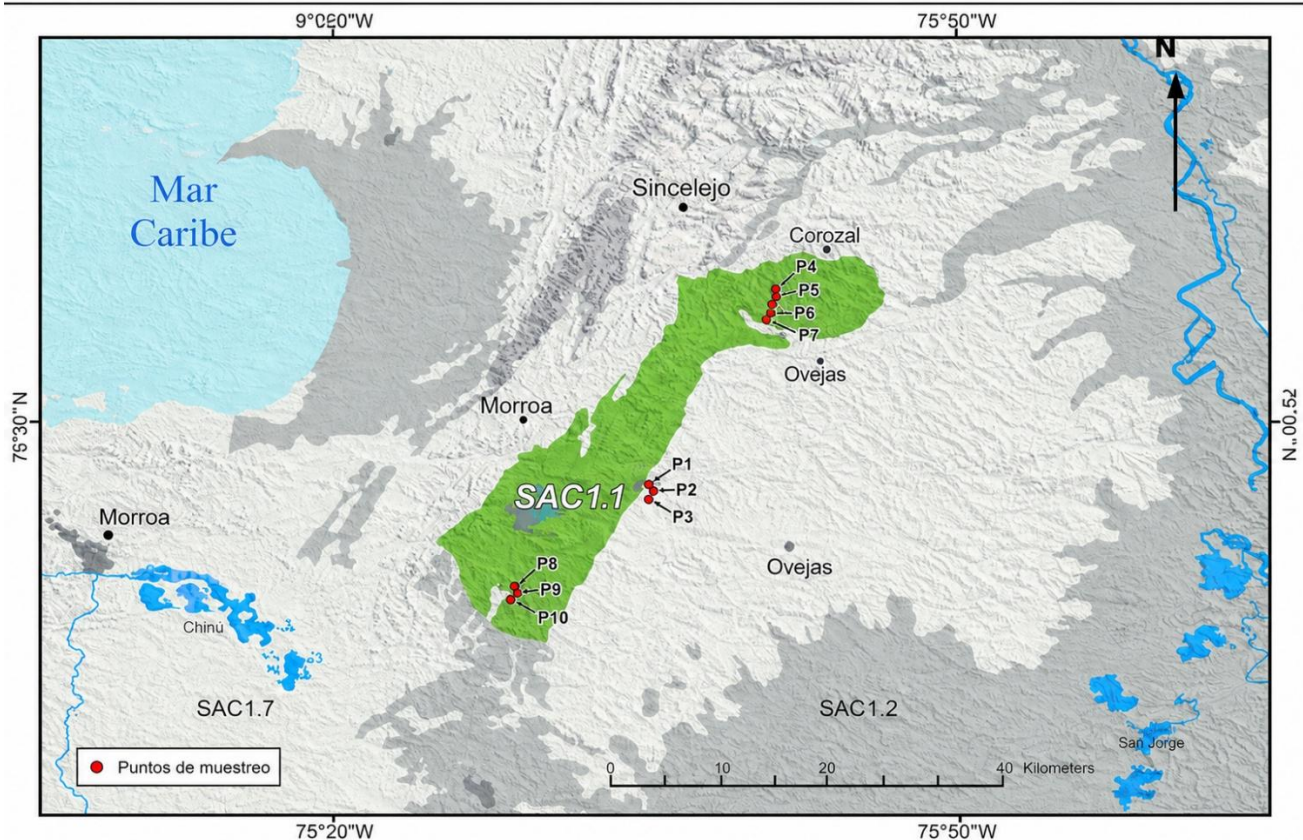


Fig. 1: Localización regional del acuífero de Morroa y ubicación aproximada de los puntos de muestreo por sector.
Fuente: adaptado de IDEAM (2022).

Toma, preservación y transporte de muestras

Las muestras fisicoquímicas se recolectaron en recipientes plásticos limpios de 1 L y las microbiológicas en frascos estériles, evitando la contaminación cruzada. Tras el rotulado, se conservaron bajo refrigeración a una temperatura igual o inferior a 8 °C y se transportaron al laboratorio conforme a Standard Methods (APHA, AWWA y WEF, 2017). No se dispuso de registros verificables sobre el tiempo máximo entre la toma y el análisis, el volumen destinado a las determinaciones microbiológicas ni la aplicación de purga o estabilización previa de los pozos; estos aspectos se reconocen como limitaciones de trazabilidad metodológica.

Parámetros y métodos analíticos

Se determinaron pH, alcalinidad total, dureza total, dureza cálcica, cloruros, coliformes totales y coliformes fecales. El pH se midió mediante método electrométrico; la alcalinidad, las durezas y los cloruros se analizaron mediante procedimientos volumétricos, con base en Standard Methods (APHA, AWWA y WEF, 2017).

Con base en el registro metodológico disponible, los coliformes totales y fecales se evaluaron mediante filtración por membrana con porosidad nominal de 0,45 µm e incubación durante 24 h. Los resultados se registraron cualitativamente como presencia o ausencia. No fue posible verificar el diámetro de la membrana,

el medio de cultivo, el volumen filtrado, la temperatura exacta de incubación ni los controles de calidad; por ello, estos elementos se reconocen como limitaciones de trazabilidad del procedimiento microbiológico.

Criterios de interpretación y análisis de datos

La aptitud del agua se interpretó con referencia a la Resolución 2115 de 2007, aplicable al control de la calidad del agua para consumo humano en Colombia. La base consolidada incluyó un único valor por parámetro fisicoquímico en cada punto (P1-P10), mientras que los resultados microbiológicos se registraron como presencia o ausencia. Para alcalinidad total, dureza total, dureza cálcica y cloruros se calcularon media, desviación estándar, rango y coeficiente de variación. Debido a la ausencia de réplicas de campo, réplicas analíticas y datos crudos adicionales, no se aplicaron ANOVA, análisis de conglomerados ni análisis de componentes principales. Tampoco se calculó un índice de calidad del agua, dado el número limitado de parámetros y el carácter cualitativo de los resultados microbiológicos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Panorama general

Los diez puntos presentaron una composición fisicoquímica compatible con aguas subterráneas ligeramente alcalinas, pero cuatro sitios mostraron contaminación microbiológica. Por tanto, la estabilidad química observada no garantiza el consumo directo y la dimensión sanitaria constituye el principal criterio de restricción.

Comportamiento fisicoquímico

El pH osciló entre 7.81 y 8.23. La alcalinidad total varió entre 205.6 y 263.2 mg CaCO_3/L y presentó un coeficiente de variación de 10.92 %, lo que refleja una dispersión relativa baja entre los puntos (Figura 2). Este comportamiento es coherente con una señal hidrogeoquímica regional dominada por materiales carbonatados y capacidad amortiguadora elevada.

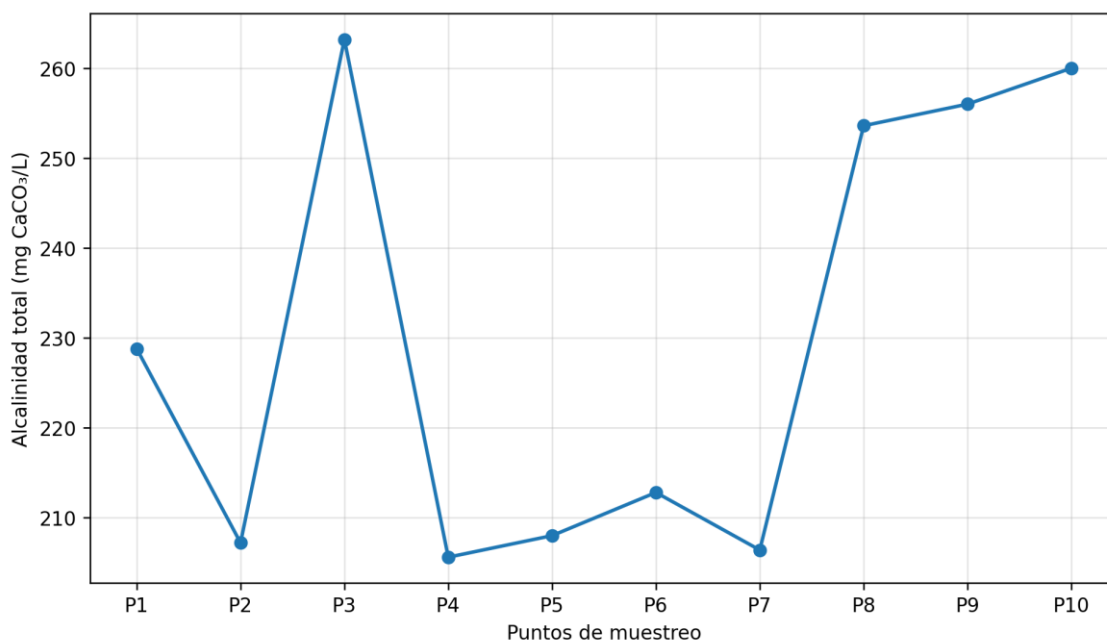


Fig. 2: Variación de la alcalinidad total entre los puntos de muestreo. La línea facilita la lectura y no representa continuidad espacial.

La dureza total alcanzó valores entre 32.2 y 137.0 mg CaCO₃/L, con un coeficiente de variación de 49.32 %, mientras que la dureza cálcica osciló entre 28.8 y 93.6 mg CaCO₃/L y registró un coeficiente de variación de 37.06 %. Los cloruros mostraron la mayor heterogeneidad: variaron entre 7.00 y 270.92 mg/L y alcanzaron un coeficiente de variación de 181.58 %, debido principalmente al valor de P3. En consecuencia, la alcalinidad fue el parámetro más homogéneo y los cloruros concentraron la principal señal localizada de diferenciación espacial.

Tabla 1: Resultados fisicoquímicos y microbiológicos por punto de muestreo.

Punto	Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /L)	Dureza total (mg CaCO ₃ /L)	Dureza cálcica (mg CaCO ₃ /L)	Cloruros (mg/L)	Coliformes totales y fecales
P1	228.8	34.6	28.8	39.99	Ausencia
P2	207.2	32.2	29.6	32.99	Presencia
P3	263.2	40.6	32.8	270.92	Ausencia
P4	205.6	134.6	67.2	7.50	Ausencia
P5	208.0	137.0	93.6	8.00	Ausencia
P6	212.8	132.2	58.4	7.75	Ausencia
P7	206.4	133.8	60.0	7.00	Presencia
P8	253.6	79.4	55.2	22.99	Presencia
P9	256.0	78.6	51.2	22.49	Ausencia
P10	260.0	79.8	53.6	23.49	Presencia

Tabla 2: Estadísticos descriptivos de los parámetros volumétricos.

Parámetro	Media	Desviación estándar	Rango	CV (%)
Alcalinidad total	230.16	25.14	205.60-263.20	10.92
Dureza total	88.28	43.54	32.20-137.00	49.32
Dureza cálcica	53.04	19.66	28.80-93.60	37.06
Cloruros	44.31	80.46	7.00-270.92	181.58

Nota: CV = coeficiente de variación.

Calidad microbiológica

En P2, P7, P8 y P10 se detectaron simultáneamente coliformes totales y fecales, equivalentes al 40 % de los puntos evaluados (Figura 3). Esta condición impide considerar el agua apta para consumo directo en esos sitios y exige tratamiento, particularmente desinfección, antes de cualquier uso humano.

La distribución microbiológica no coincidió con el punto de mayor concentración de cloruros. P3 mostró la principal anomalía química, pero no presentó coliformes; en cambio, los cuatro puntos con afectación bacteriológica no registraron el máximo de cloruros. Este desacople sugiere que los procesos que controlan la composición química y la contaminación fecal no son necesariamente los mismos.

Interpretación y contraste con la literatura

La baja variabilidad relativa de la alcalinidad y el intervalo estrecho del pH respaldan la influencia de la interacción agua-roca y la disolución de minerales carbonatados. Patrones semejantes han sido descritos en acuíferos donde la química regional se mantiene relativamente estable, aunque existen diferencias locales asociadas al flujo, la litología y los aportes externos (Dávalos *et al.*, 2021; López, 2023; Aranguren *et al.*, 2024).

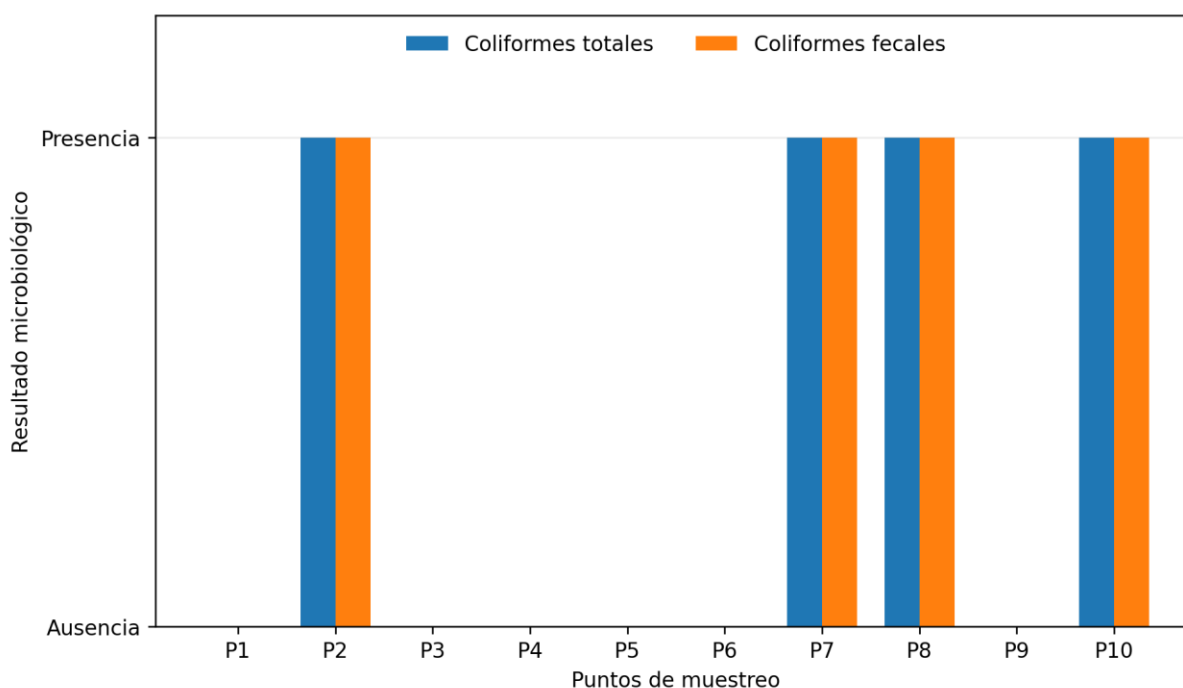


Fig. 3: Presencia o ausencia de coliformes totales y fecales en los puntos evaluados. Ambas categorías coincidieron en P2, P7, P8 y P10.

El comportamiento de los cloruros en P3 debe interpretarse como una señal puntual que requiere seguimiento, no como evidencia de deterioro generalizado. Variaciones localizadas de cloruros y conductividad han sido relacionadas con condiciones hidrogeológicas particulares o presiones antrópicas específicas en otros sistemas subterráneos (Dávalos *et al.*, 2021; Teixeira *et al.*, 2025). La información disponible no permite atribuir una fuente concreta, por lo que se requieren mediciones repetidas y caracterización del entorno inmediato.

La presencia de coliformes en cuatro puntos confirma que la aceptabilidad fisicoquímica puede coexistir con riesgo sanitario. Estudios en Perú, Argentina, Marruecos y Nigeria han documentado contaminación fecal en pozos asociados a saneamiento insuficiente, proximidad de letrinas, prácticas agropecuarias y deficiente protección de las captaciones (Kadaoui *et al.*, 2019; Urseler *et al.*, 2019; Gonzales *et al.*, 2023; Odewade *et al.*, 2025). Estos antecedentes son consistentes con la vulnerabilidad observada en Morroa, aunque el diseño transversal no permite establecer causalidad.

La posible superposición de fuentes puntuales y difusas exige una lectura territorial del problema. La ocupación sin alcantarillado, los vertimientos domésticos, la agricultura y la disposición de residuos pueden actuar simultáneamente sobre los acuíferos (Fonseca *et al.*, 2019; Huerfano *et al.*, 2023). Por ello, la respuesta de gestión debe combinar protección sanitaria de pozos, control de fuentes cercanas, desinfección y monitoreo periódico, en lugar de limitarse a una campaña aislada (Conejeros *et al.*, 2021; Debassi *et al.*, 2025; Teixeira *et al.*, 2025).

El estudio aporta una línea de base integrada, pero presenta limitaciones derivadas del diseño transversal, de la disponibilidad de un único valor por punto y de la falta de coordenadas individuales, profundidad de los pozos y registros completos de trazabilidad analítica. Estas condiciones restringen las pruebas inferenciales, los análisis multivariados y la atribución de fuentes. Futuras campañas deben incorporar réplicas temporales, georreferenciación individual, profundidad de las captaciones, protocolos microbiológicos completamente documentados y un conjunto ampliado de variables para evaluar tendencias e índices de calidad.

CONCLUSIONES

El acuífero de Morroa presentó aguas ligeramente alcalinas y una alcalinidad relativamente homogénea, lo que indica estabilidad hidrogeoquímica regional. La dureza mostró mayor variación entre puntos y los cloruros registraron una anomalía localizada en P3 que requiere seguimiento.

La detección de coliformes totales y fecales en P2, P7, P8 y P10 constituye la principal limitación para el consumo humano directo. La calidad fisicoquímica favorable no compensa el riesgo microbiológico; por ello, el agua de los puntos afectados debe someterse a tratamiento antes de su uso.

La gestión del acuífero debe priorizar la protección sanitaria de las captaciones, la identificación de fuentes cercanas de contaminación y el monitoreo periódico con réplicas temporales. La georreferenciación individual de cada captación, el registro de la profundidad de los pozos y la documentación completa de los procedimientos analíticos fortalecerán la evaluación espacial y la toma de decisiones sobre abastecimiento seguro.

REFERENCIAS

- Abad, M.J., Salazar Almanza, P.A. & Viaña Méndez, S.D. (2023). *Acuífero de Morroa, el tesoro devaluado de la sabana*. Trabajo de grado, Corporación Universitaria del Caribe. <https://repositorio.cecar.edu.co/handle/cecar/10237>
- Acosta, M., Villalobos, J., Salcedo, N. & Meza, J. (2025). Aguas subterráneas: retos y oportunidades para un uso eficiente del recurso hídrico. *Revista INGENIUS*, 1 (1), 88-97. <https://revistas.unisucre.edu.co/index.php/RCl/article/view/1187/1266>
- APHA, AWWA y WEF. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23.^a ed.). American Public Health Association.
- Aranguren, Y., Galán-Freyle, N.J., Guerra, A., Manares-Romero, A., Pacheco-Londoño, L.C., Romero-Coronado, A., *et al.* (2024). Aquifers and groundwater: Challenges and opportunities in water resource management in Colombia. *Water*, 16 (5), 685. <https://doi.org/10.3390/w16050685>
- Cerón, L.M., Sarria, J.D., Torres, J.S. & Soto-Paz, J. (2021). Agua subterránea: tendencias y desarrollo científico. *Información Tecnológica*, 32 (1), 47-56. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642021000100047>
- Conejeros, A., Hueichaqueo Pichunman, C., Martínez-Jiménez, B.L. & Placeres Remior, A. (2021). Monitoreo de calidad del agua en sistema de agua potable rural. *RIELAC*, 42 (3), 60-70. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59282021000300060
- Dávalos, I., Fuentes-Rivas, R.M., Fonseca-Montes de Oca, R.M.G., Ramos-Leal, J.A., Morán-Ramírez, J. & Martínez Alva, G. (2021). Assessment of physicochemical groundwater quality and hydrogeochemical processes in an area near a municipal landfill site: A case study of the Toluca Valley. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18 (21), 11195. <https://doi.org/10.3390/ijerph182111195>
- Debassi, B., Allaoua, N., Ghanem, N., Hafid, H., Benacherine, M. & Chenchouni, H. (2025). Assessment of water quality of groundwater, surface water, and wastewater using physicochemical parameters and microbiological indicators. *Science Progress*, 108 (2), 1-33. <https://doi.org/10.1177/00368504251348544>
- Fonseca, A., Madrigal-Solís, H., Núñez-Solís, C., Calderón-Sánchez, H., Moraga-López, G. & Gómez-Cruz, A. (2019). Evaluación de la amenaza de contaminación al agua subterránea y áreas de protección a manantiales en las subcuencas Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica. *Uniciencia*, 33 (2), 76-97. <https://doi.org/10.15359/ru.33-2.6>
- Gonzales, W., Acharte Lume, L.M., Poma Palacios, J.C., Sánchez Araujo, V.G., Quispe Coica, F.A. & Meseguer Pallares, R. (2023). Evaluación fisicoquímica y microbiológica del agua de consumo humano en seis comunidades rurales

- altoandinas de Huancavelica-Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 25 (1), 23-31. <https://doi.org/10.18271/ria.2023.486>
- Huerfano, G.J., Rojas-Peña, J.I., Zapata-Muñoz, Y.L., Trujillo-González, J.M., Torres-Mora, M.A., García-Navarro, F.J., et al. (2023). Comparative assessment of the quality and potential uses of groundwater in a typical rural settlement in Colombia. *Water*, 15 (4), 667. <https://doi.org/10.3390/w15040667>
- IDEAM. (2022). *Estudio Nacional del Agua 2022: Anexo 7. Aguas subterráneas*. https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/prensa/boletines/2024-09-05/anexo_7_aguas_subterraneas_ena_2022_1.pdf
- Jabeen, S., Ahmed, N., Arshad, M., Ali, A. & Parkash, O. (2025). Assessing groundwater quality in Islamabad: A microbiological and physicochemical analysis in compliance with WHO standards for potable water. *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences: B. Life and Environmental Sciences*, 62 (3), 193-203. [https://doi.org/10.53560/PPASB\(62-3\)1103](https://doi.org/10.53560/PPASB(62-3)1103)
- Kadaoui, M., Bouali, A. & Arabi, M. (2019). Assessment of physicochemical and bacteriological groundwater quality in irrigated Triffa Plain, North-East of Morocco. *Journal of Water and Land Development*, 42, 100-109. <https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0050>
- Karandish, F., Liu, S. & de Graaf, I. (2025). Global groundwater sustainability: A critical review of strategies and future pathways. *Journal of Hydrology*, 657, 133060. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133060>
- López, C. (2023). Evaluación de la calidad del agua subterránea utilizando métodos de índice y análisis estadístico multivariado: cuenca del río Pavas (Colombia). *South Sustainability*, 4 (1), e072. <https://doi.org/10.21142/SS-0401-2023-e072>
- Odewade, L.O., Imam, A.A., Adesakin, T.A. & Odewade, J.O. (2025). Assessment of human faecal contamination on groundwater quality and reporting consequent waterborne diseases in Funtua Metropolis, Katsina State, Nigeria. *Frontiers in Water*, 7, 1561777. <https://doi.org/10.3389/frwa.2025.1561777>
- Teixeira, P., Costa, S., Brandão, J. & Valério, E. (2025). From quality to purpose: Rethinking groundwater microbiological standards for emergency urban water use. *Water*, 17 (22), 3329. <https://doi.org/10.3390/w17223329>
- Urseler, N.L., Bachetti, R.A., Damilano, G., Morgante, V., Ingaramo, R.N., Saino, V., et al. (2019). Calidad microbiológica y usos del agua subterránea en establecimientos agropecuarios del centro-sur de Córdoba, Argentina. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35 (4), 839-848. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.04.06>