

# Calidad del agua para consumo humano en una comunidad rural: caso Corral de Piedra, Guanacaste, Costa Rica

## Water quality for human consumption in a rural community: Case of Corral de Piedra, Guanacaste, Costa Rica

Rolando Sánchez-Gutiérrez<sup>1</sup>, Cristina Benavides-Benavides<sup>2</sup>,  
María Chaves-Villalobos<sup>3</sup>, José Quirós-Vega<sup>4</sup>

Sánchez-Gutiérrez, R; Benavides-Benavides, C; Chaves-Villalobos, M; Quirós-Vega, J. Calidad del agua para consumo humano en una comunidad rural: caso Corral de Piedra, Guanacaste, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-2. Abril-Junio 2020. Pág 3-16.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i2.4165>

*Fecha de recepción: 23 de abril de 2019*  
*Fecha de aprobación: 6 de agosto de 2019*



- 1 Químico industrial, investigador del Laboratorio de Recurso Hídrico de la Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: rolando.sanchez.gutierrez@una.ac.cr. Autor de correspondencia.  
 <https://orcid.org/0000-0002-5050-021X>
- 2 Educadora ambiental, investigadora del Laboratorio de Recurso Hídrico de la Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: cristinabenavidesb@gmail.com.  
 <https://orcid.org/0000-0003-2149-8082>
- 3 Química industrial, investigadora del Instituto de Estudios Sociales en Población (IDESPO). Costa Rica. Correo electrónico: maria.chaves.villalobos@una.ac.cr.  
 <https://orcid.org/0000-0002-5632-4149>
- 4 Biólogo, investigador del Instituto de Estudios Sociales en Población (IDESPO). Costa Rica. Correo electrónico: jose.quiros.vega@una.ac.cr  
 <https://orcid.org/0000-0002-2731-2691>

## Palabras clave

Recurso hídrico; calidad de agua; hidrogeoquímica; consumo humano; comunidad rural.

## Resumen

El presente trabajo se desarrolló entre los años 2015 y 2018 en la comunidad de Corral de Piedra de Nicoya, en la provincia de Guanacaste. En esta zona existen dos estaciones: seca y lluviosa; no obstante, los embates del cambio climático han propiciado cambios drásticos en los patrones de precipitación y fuertes épocas de sequía. En el estudio se evaluó la calidad del agua para consumo humano que abastece a la comunidad y se determinó que existe alto cumplimiento con lo establecido en el decreto 38924-S en cuanto a los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Según los criterios de calidad del agua de pozos y nacientes de Mora-Alvarado *et ál*, los resultados obtenidos para las muestras colectadas en la comunidad de Corral de Piedra, en la mayoría de los sitios de muestreo, indican condiciones de calidad excelente. Además, se realizó una caracterización hidrogeoquímica del agua extraída del pozo mediante el diagrama de Piper, que la identificó como agua de tipo bicarbonatada-cálcica. La aplicación de la matriz de correlación de Kendall arrojó 25 correlaciones significativas, de las cuales pH-nitrato y conductividad-bicarbonato fueron las mayores. Por último, se realizó el análisis de componentes principales, y resultó que 5 componentes principales explican en forma significativa la varianza de los datos (85,6%).

## Keywords

Water resources; water quality; hidrogeochemistry; human consumption; rural community.

## Abstract

The present work was developed between 2015 and 2018 in the community of Corral de Piedra, Nicoya, Guanacaste. In this area there are two seasons: dry and rainy; however, drastic climate change has led to extreme changes in rainfall patterns and strong periods of drought. In this study, the quality of communal drinking water was assessed, determining it depicts high compliance with decree 38924-S in terms of physicochemical and microbiological parameters. According to Mora-Alvarado *et al* [1] wells and springs' water quality criteria, the results obtained from analysis of most sampling sites in the community of Corral de Piedra showed excellent quality conditions. A hydrogeochemical characterization of the water extracted from the well was carried out using the Piper diagram, resulting in bicarbonated - calcium type water. The application of the Kendall correlation matrix yielded 25 significant correlations, pH - nitrate and conductivity - bicarbonate being the ones with the highest correlation. Finally, the focal components analysis was performed and it showed that 5 main components explained the data variance in a significant way (85,6%).

## Introducción

El agua, como parte de un ecosistema dinámico en el que interactúan recursos naturales y seres vivos, es indispensable para la vida, el bienestar de las personas y el desarrollo de las sociedades [2]. El principio fundamental que define el agua como un derecho humano obliga a las naciones a realizar esfuerzos para que los pobladores cuenten con un recurso de calidad y en cantidad necesaria para satisfacer sus necesidades [3]. En Costa Rica, a pesar

de las labores que realiza la instancia rectora de la gestión de los servicios de agua potable y saneamiento, el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillado (AyA), para promover la organización de las Asociaciones Administradoras de Acueductos (las ASADA), en todos los ámbitos de competencia, algunas comunidades rurales como Corral de Piedra, Guanacaste, requieren apoyo de otros entes como la Universidad Nacional, en este caso por medio del Laboratorio de Manejo del Recurso Hídrico (LAMRHI) y del Programa Horizontes Ambientales: Innovación y Cambio, perteneciente al Instituto de Estudios Sociales en Poblaciones (IDESPO), para el monitoreo de la calidad de las aguas para consumo humano y el fortalecimiento de la gestión comunitaria del agua.

Algunos indicadores muestran condiciones que favorecen la gestión del agua en el país, como los siguientes:

- Costa Rica cuenta con aproximadamente 100 000 millones de metros cúbicos de agua dulce disponible, según el Informe XXIV del Estado de la Nación, 2017.
- El 99,5% de la población recibe agua por tubería; el 91,8%, de calidad potable, y el 86,8% la recibe con tratamiento y desinfección [4].
- Existen en el país más de 1400 Asociaciones Administradoras de Acueductos (ASADA) rurales, que abastecen un 29,5 % de la población, lo que equivale a aproximadamente 1 460 321 personas; sin embargo, algunas de estas ASADA no cuentan con agua potable para el abastecimiento.

La calidad del recurso hídrico está definida como la sumatoria de las características organolépticas y sanitarias que permiten que este sea utilizado para distintos fines, que van desde el consumo hasta el riego de campos y la acuicultura. La introducción de sustancias que alteren esta condición inicial en la composición del recurso es lo que se conoce como contaminación del agua. Puede ocurrir como formas de energía o elementos tanto de fuentes antropogénicas como naturales [5]

El agua para consumo humano en las zonas rurales de Costa Rica presenta condiciones de vulnerabilidad debido a los efectos del cambio climático, la presencia de actividades productivas que requieren de insumos agropecuarios utilizados en algunos casos sin control, la disposición inadecuada de desechos sólidos y líquidos, además de la falta de implementación de acciones de saneamiento en el tratamiento de aguas residuales, entre otros [3], por lo que se hace necesario el monitoreo de las aguas tomando como base las directrices emitidas por el Ministerio de Salud en el Reglamento para la Calidad de Agua Potable, n.º 38924-S, donde se establecen los límites máximos permitidos de los diferentes parámetros físicos, químicos y microbiológicos. Este reglamento tiene como propósito ampliar los parámetros mínimos de potabilidad del agua previamente a su consumo, en todos los operadores de sistemas de abastecimiento en Costa Rica [6]

El agua contaminada y la ausencia de condiciones de saneamiento básico han generado, en todo el mundo, aumento en los casos de enfermedades como el cólera, la hepatitis, la diarrea y la disentería, entre otras [7]. Se estima que aproximadamente 842 000 personas mueren cada año de diarrea como consecuencia de la insalubridad del agua, de un saneamiento insuficiente o de una mala higiene de las manos; si se aumentara la potabilidad del agua se evitarían 361 000 muertes de niños menores de 5 años [5]. Por esta razón el objetivo 6 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible tiene como meta reducir la proporción de la población mundial que no tiene acceso al agua potable; para esto se requiere fortalecer la capacidad de los operadores para brindar agua de mejor calidad, en todas las zonas de Costa Rica, siendo prioridad los operadores ubicados en zonas de alta vulnerabilidad en materia de cambio climático, como el sistema de Corral de Piedra.

## Metodología

### Descripción del área de estudio

Corral de Piedra se localiza en el distrito San Antonio, cantón de Nicoya, de la provincia de Guanacaste, dentro de las coordenadas 10°24'05" N y 85°32'95" O y 10°22'51" N y 85°33'11" O. Tiene una población aproximada de 90 personas. Al este de esta población, se encuentra el cerro Corral de Piedra; al oeste, la comunidad de Caballito, al norte se ubica el humedal tipo lacustre Corral de Piedra y al sur el Cerro Caballito [8].

De acuerdo a Rojas *et ál* [8], en esta zona existen dos estaciones: la seca, en los meses de diciembre a marzo y la lluviosa, de mayo a octubre; la precipitación media anual es de 2000 mm y la temperatura promedio es de 26 °C, sin embargo, esta zona sufre los embates del cambio climático, pues presenta cambios drásticos en los patrones de precipitación y fuertes épocas de sequía. El Instituto Meteorológico Nacional (IMN) previó en esta zona, para finales del 2018, la influencia del fenómeno de El Niño, pronosticando una disminución de las lluvias y aumentos de las temperaturas, esta condición se extendería hasta julio del 2019 [9].

El área incluye planicies y serranías de poca elevación, con lagunas interconectadas, sujetas a inundaciones estacionales de gran magnitud [8]. La comunidad de Corral de Piedra se encuentra sobre terrenos constituidos por depósitos aluviales formados desde el Holoceno y sobre estos los depósitos de arcilla y limo formando el humedal Corral de Piedra, constituidos en la misma era (Holoceno). El Cerro Corral de Piedra surgió de la formación Curú y Barra Honda hace 65 millones de años, en el Paleoceno [10]; este cerro es rico en material calizo.

Las principales actividades económicas de la zona son la ganadería y cultivos de arroz, piña, caña de azúcar y en menor proporción, otros granos como frijol y maíz [8]. Las personas que viven en Corral de Piedra dependen del agua subterránea para satisfacer sus necesidades básicas, por lo que es extraída de un pozo cercano y abastecida por un grupo comunal que administra el acueducto del lugar; esta gestión se realiza de manera paralela a otros esfuerzos por ser oficializado como una asociación administradora del acueducto comunal (ASADA).

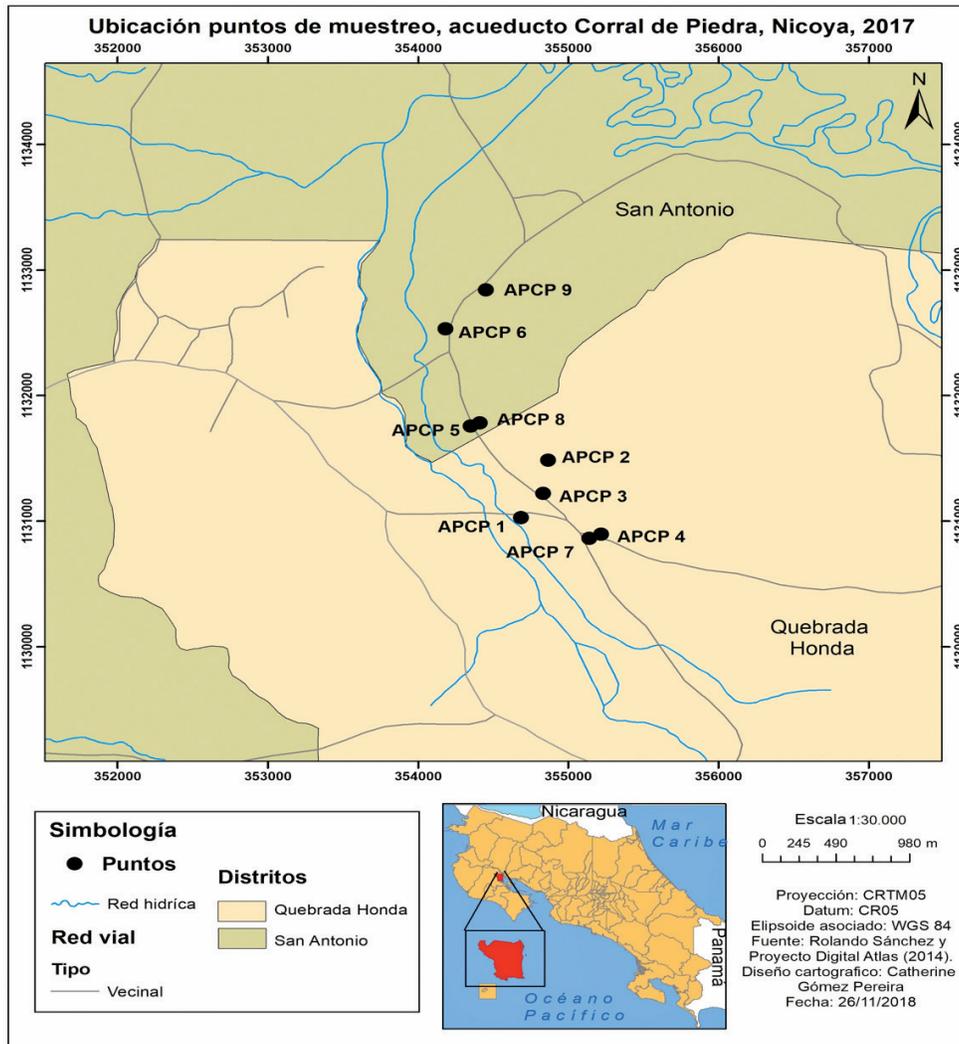
### Campañas de muestreo y análisis realizados

El monitoreo de la calidad del agua se realizó en 9 puntos de la red de abastecimiento de agua para consumo, incluyendo el pozo de extracción principal, el tanque de almacenamiento y 7 puntos de la red distribuidos en toda la extensión del acueducto. Se realizaron 7 campañas de muestreo, en las estaciones secas y lluviosas, desde abril del 2015 hasta marzo del 2018, y se logró coleccionar 57 muestras en todo el estudio. En la figura 1 se muestra la distribución de los puntos de monitoreo y su nomenclatura.

La recolección de muestras se realizó en botellas de plástico previamente tratadas según las especificaciones del método 1060 del Standard Methods for Examination of Water and Waste Water [11]. Estas se mantuvieron en refrigeración a 6 °C o menos y fueron trasladadas al laboratorio en un periodo menor de 24 horas, donde permanecieron en almacenamiento en las mismas condiciones; las muestras para los análisis microbiológicos fueron tomadas en recipientes de plástico estériles de un solo uso.

Los parámetros de pH y conductividad se midieron *in situ* utilizando un medidor de campo Thermo Orion Star A222 (Chelmsford, MA, USA); en el mismo lugar también se realizaron las mediciones nefelométricas de turbiedad utilizando un medidor de campo Oakton T100 (Vernon Hills, IL, USA). La alcalinidad total se analizó mediante titulación con ácido sulfúrico (2320 B); la dureza total, mediante complejometría con EDTA (2340 C); los aniones y cationes (cloruro, fluoruro, nitrato, sulfato, calcio, magnesio, sodio y potasio) se analizaron mediante cromatografía

de iones (4110), utilizando un cromatógrafo ThermoScientific ICS 5000 + (Sunnyvale, CA, USA). Los análisis microbiológicos se realizaron mediante la técnica de fermentación en tubo múltiple (9221 E), utilizando el reactivo de Fluorocult®.



**Figura 1.** Mapa de ubicación de los puntos de muestreo

Los resultados obtenidos fueron comparados con los parámetros establecidos en el decreto 38924-S Reglamento para la Calidad del Agua Potable y con las Guías para la Calidad del Agua Potable, de la Organización Mundial de la Salud [12]; además se complementó el análisis de calidad utilizando una adaptación de la propuesta publicada por Mora-Alvarado, “Actualización de los criterios para la calidad del agua en pozos y nacientes para potabilización en Costa Rica” [1].

Se realizó un análisis estadístico descriptivo de los datos y se aplicó la técnica de regresión robusta en orden estadístico descrita por Helsel [13] para aquellos datos con valores menores al límite de cuantificación del instrumento o técnica analítica empleada. Los parámetros con más del 80% de los datos con esta característica fueron omitidos de los posteriores análisis estadísticos.

Se calcularon las correlaciones Tau de Kendall y los componentes principales para poder comprender la relación existente entre los parámetros medidos y la calidad del agua en la zona; finalmente, con los resultados obtenidos en el sitio de muestreo correspondiente al pozo de extracción, se realizó el análisis descrito por Piper [14] con el fin de obtener información relevante acerca de la hidrogeoquímica del agua en la zona. Todos los análisis estadísticos, así como la producción de figuras para la presentación de los resultados, se realizaron en R 3.5.1, R Core Team [15], utilizando paquetes como NADA [16] y ggplot2 [17], respectivamente.

## Resultados y discusión

### Características fisicoquímicas y análisis de calidad

**Cuadro 1.** Resumen de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua de consumo en la comunidad de Corral de Piedra

Parámetro	Unidades	Promedio	DE	Mínimo	Máximo	CR <sup>3</sup>	OMS <sup>4</sup>
pH	-	6,87	0,32	6,05	7,42	6,0-8,0	6,5-9,5
Conductividad		598	107	334	776	400	-
Turbiedad <sup>1</sup>	NTU	1,31	5,01	<0,02	34,1	5,0	5,0
Dureza total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	257,6	86,3	63,0	333,6	400	-
Calcio	mg/L	93,8	28,7	19,8	116,0	100	-
Magnesio	mg/L	11,80	0,50	10,50	13,40	50	-
Sodio	mg/L	22,69	6,59	16,00	55,00	200	200
Potasio	mg/L	1,20	1,27	0,42	7,40	10	-
Fluoruro <sup>2</sup>	mg/L	-	-	<0,323	1,973	0,7	1,5
Bicarbonato	mg/L	358,7	53,4	268,2	427,2	-	-
Cloruro	mg/L	6,28	0,31	5,39	6,82	250	250
Nitrate <sup>1</sup>	mg/L	3,15	0,92	2,09	6,70	50	50
Sulfato	mg/L	7,95	1,51	6,09	11,28	250	500
Coliformes fecales <sup>2</sup>	NMP/100 mL	-	-	ND	23	0	0
Escherichia coli <sup>2</sup>	NMP/100 mL	-	-	ND	23	0	0

Notas: 1 Estimación utilizando el método ROS; 2 >80% de los datos son menores al límite de cuantificación de la técnica analítica; 3 Lesgilación de Costa Rica para la calidad del agua potable (Decreto 38924-S); 4 Estándares de la Organización Mundial de la Salud; DE: desviación estándar; NMP: número más probable,

Las características fisicoquímicas del agua de consumo en la comunidad de Corral de Piedra en Nicoya se muestran en el cuadro 1. Estos resultados se compararon con los valores máximos admisibles establecidos en la normativa nacional vigente y con los valores recomendados por las guías para la calidad del agua potable de la OMS. Destaca que los valores de conductividad eléctrica oscilaron de 334 a 776  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con un promedio de 598  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Estos resultados superan los estándares para el consumo humano y a su vez sugieren un contenido importante de minerales disueltos en el agua. No obstante, en algunos índices de calidad aplicados para

el agua de consumo, este parámetro posee un peso relativo menor al 1% [18], debido a que el incumplimiento del parámetro se encuentra relacionado con un posible rechazo por parte del consumidor y no con riesgos para la salud [12]. Para los demás parámetros evaluados, los valores promedio no superan las normativas mencionadas, por lo cual se sugiere que el agua en la red de consumo de la comunidad es apta para el uso que se destina actualmente.

Los valores de pH oscilaron de 6,05 a 7,42, con un valor promedio de 6,87, lo cual indica que el agua es neutra-ligeramente ácida. Esto contrasta con las concentraciones de ion bicarbonato determinadas, las cuales oscilaron entre 268,2 y 427,2 mg/L, con un promedio de 358,2 mg/L, lo cual sugiere un contenido de alcalinidad importante. Según la secuencia de Chevotareb, las aguas con altos contenidos de este ion tienen tiempos de residencia en el suelo muy cortos, que se relacionan con un tipo de recarga en el acuífero directa y rápida [19], [20].

La dureza total osciló de 63,0 a 333,6 mg/L  $\text{CaCO}_3$ , con un valor promedio de 257,6 mg/L  $\text{CaCO}_3$ , lo que sugiere que el agua en la zona presenta una tendencia a ser dura o muy dura. Estos resultados son congruentes con los estudios realizados por Mora-Alvarado *et ál* [21], que en la zona de Quebrada Honda de Nicoya determinaron un promedio de dureza de 259,6 mg/L  $\text{CaCO}_3$ . Este resultado se correlaciona con altas tasas de longevidad, ya que Nicoya posee una de las cinco *zonas azules* que existen en el mundo. Aunada a esto, los resultados pueden sugerir que la naturaleza geológica de la zona de extracción del agua es de un acuífero rico en minerales de calcio y/o magnesio, tipo calizas o dolomitas [22].

La turbidez presentó valores menores al límite de detección del instrumento utilizado y hasta de 34,1 NTU, con un resultado promedio de 1,31 NTU. Algunos resultados obtenidos en el periodo de estudio sobrepasaron los estándares admisibles de las normativas comparadas. La principal fuente de turbidez en el agua es la presencia de partículas en suspensión provenientes de procesos de tratamiento deficientes o bien de la re-suspensión de sólidos en el sistema de distribución. La turbidez es un parámetro de control operativo, ya que además de asegurar la aceptación del recurso por parte del usuario, facilita los procesos de desinfección del agua [12]. En la comunidad de Corral de Piedra, los administradores del acueducto han tenido serios problemas de incrustaciones en las tuberías a causa de los altos niveles de dureza del agua, por lo que se sugiere que estas incrustaciones pueden ser posibles fuentes de la turbidez del agua en la zona.

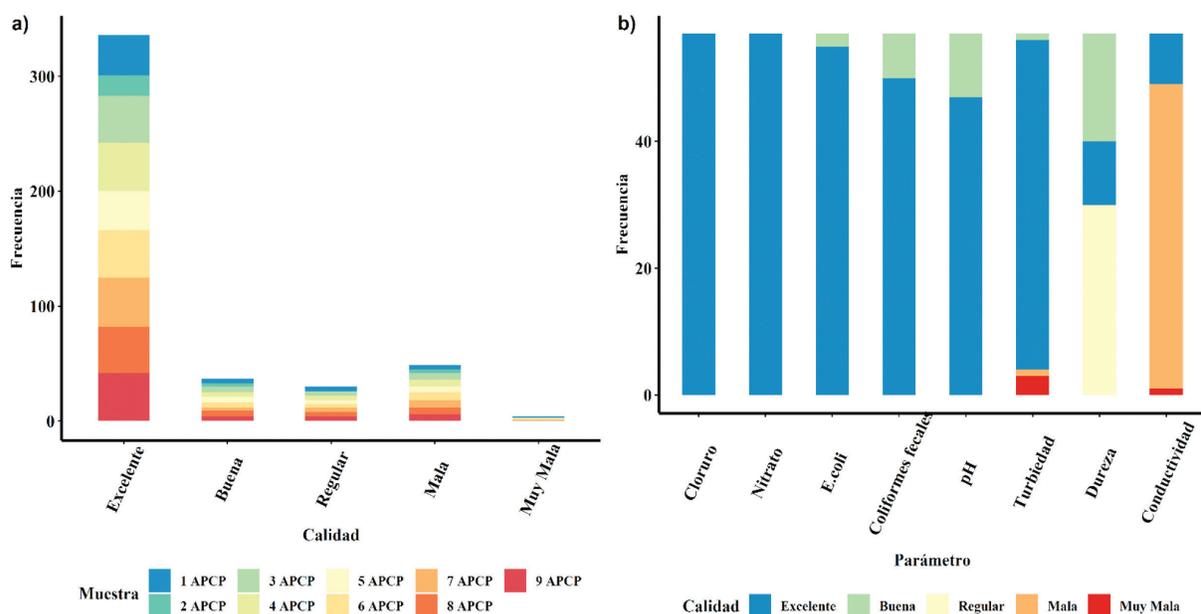
La concentración de los aniones muestra la siguiente tendencia:  $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ . El ion bicarbonato predomina sobre los demás iones, lo que sugiere que existe una recarga rápida del acuífero por influencia del tipo de materiales aluviales no consolidados y la composición del material con contenidos calcáreos [10], [20]. Las concentraciones promedio de sulfato, cloruro y nitrato determinadas fueron de 7,95 mg/L, 6,28 mg/L y 3,15 mg/L, respectivamente; esto indica bajas concentraciones de estos iones [12]. Las fuentes de sulfato y cloruro en aguas subterráneas normalmente se deben a la disolución de minerales de yeso y halita, fuentes antrópicas y deposición atmosférica [23]; mientras que en aguas ya tratadas para el consumo, pueden relacionarse con los productos utilizados para el tratamiento de las aguas [12]. Respecto al ion nitrato, no debe encontrarse de forma natural en aguas subterráneas o de consumo en valores mayores a 10 mg/L, esto debido a que la principal fuente de contribución de esta especie son las actividades antropogénicas, ya sea el uso excesivo de fertilizantes en campos agrícolas o la contaminación con aguas servidas debido a deficientes condiciones de saneamiento [23], [24].

La concentración de los cationes muestra una tendencia en la que  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ . Destaca que la concentración de ion calcio es bastante superior a la de los demás cationes, siendo incluso muy cercana al valor máximo admisible por los estándares comparados, ya que en promedio es de 93,8 mg/L, con valores máximos en el periodo de estudio de 116,0 mg/L.

Este comportamiento es de esperarse cuando se analizan los valores de dureza obtenidos, ya que aguas duras y muy duras suelen contener una cantidad importante de iones calcio [22], [25]. Por su parte, las concentraciones promedio de sodio, magnesio y potasio podrían considerarse bajas si se comparan con el valor máximo admisible de la OMS [12].

La evaluación microbiológica de la calidad se realizó analizando las concentraciones de coliformes fecales y *E.coli*. Los resultados obtenidos muestran que en la mayoría de puntos de monitoreo y campañas realizadas, no se obtuvieron valores detectables según la técnica analítica empleada. No obstante, en 6 de las 57 muestras tomadas (10,5%) se encontraron resultados positivos para coliformes fecales y un único resultado positivo para *E.coli* (1,8%), lo cual indica que en un 89% de las muestras la condición del agua se mantiene dentro de lo establecido en el decreto 38924-S [6].

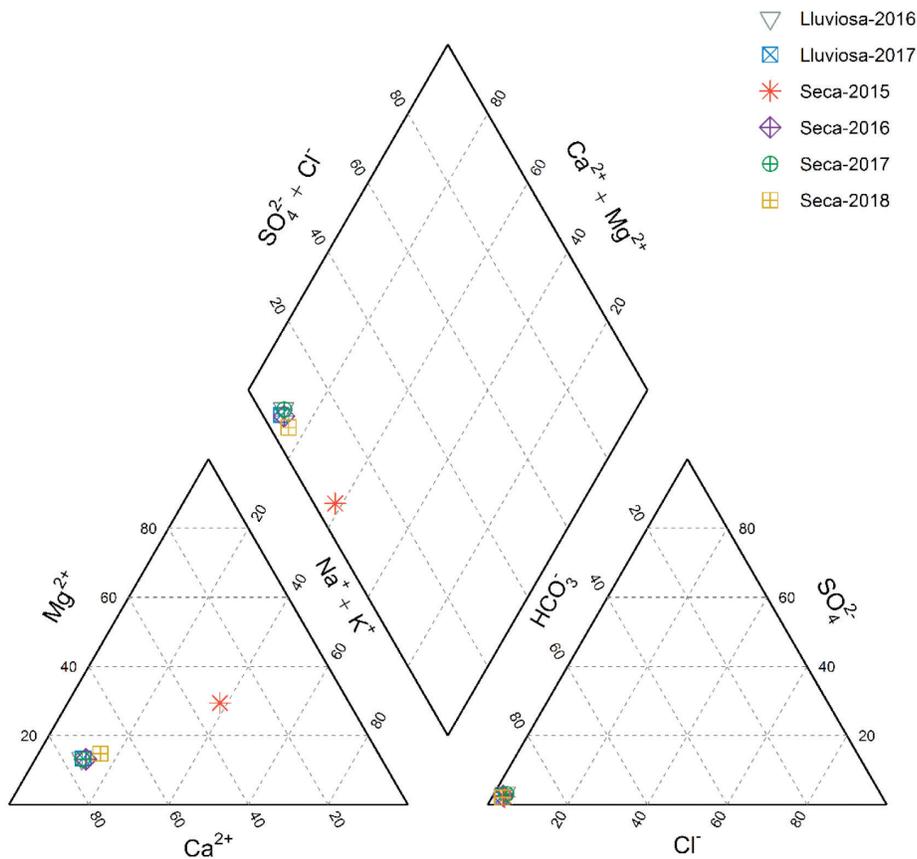
Para complementar el análisis de calidad del agua sobre los parámetros evaluados, se aplicó la actualización de los criterios para la calidad del líquido en pozos y nacientes, publicada por Mora-Alvarado *et ál* [1]. Esta propuesta establece categorías de calidad según los rangos de concentración de algunos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua. Los resultados obtenidos para las muestras colectadas en la comunidad de Corral de Piedra aparecen en la figura 2. De manera general, la figura 2a, indica que la mayoría de sitios de muestreo presentaban condiciones de calidad excelente; sin embargo, destaca que hay una porción de aproximadamente 50 muestras de categoría “Mala”. En este sentido, la figura 2b indica que el parámetro de conductividad presenta mayor cantidad de resultados de esta categoría. A su vez, destaca que los análisis de nitratos y cloruros corresponden a la categoría de calidad “Excelente”, esto sugiere que el riesgo de contaminación química por estas sustancias provenientes de materia fecal es bajo. Aunado a esto, en relación con los parámetros microbiológicos, para más de 50 muestras, se determinó una calidad “Excelente”, mientras que para las restantes, una calidad “Buena”.



**Figura 2.** Aplicación de criterios de calidad en el agua de consumo en la comunidad de Corral de Piedra en Nicoya. a) Calidad por punto de muestreo, b) Calidad por parámetro.

### Caracterización hidrogeoquímica del agua captada para consumo

La caracterización hidrogeoquímica de las aguas naturales puede ser comprendida por medio del diagrama de Piper [14], donde 7 categorías se definen de acuerdo a las cantidades relativas de aniones y cationes, a través de diagramas triangulares utilizados para demostrar las relaciones más importantes en términos de los constituyentes iónicos predominantes [24], [26]. En la figura 3 se muestra la distribución de los resultados obtenidos en el diagrama Piper de las muestras tomadas en el pozo de extracción. El ión bicarbonato y el ion calcio presentan las mayores concentraciones equivalentes relativas, de lo cual resulta agua del tipo bicarbonatada-cálcica. Esto refuerza la hipótesis de que el tiempo de tránsito del agua por el acuífero es corto ; además es congruente con las características geológicas de la zona y los resultados de dureza encontrados [10], [21].

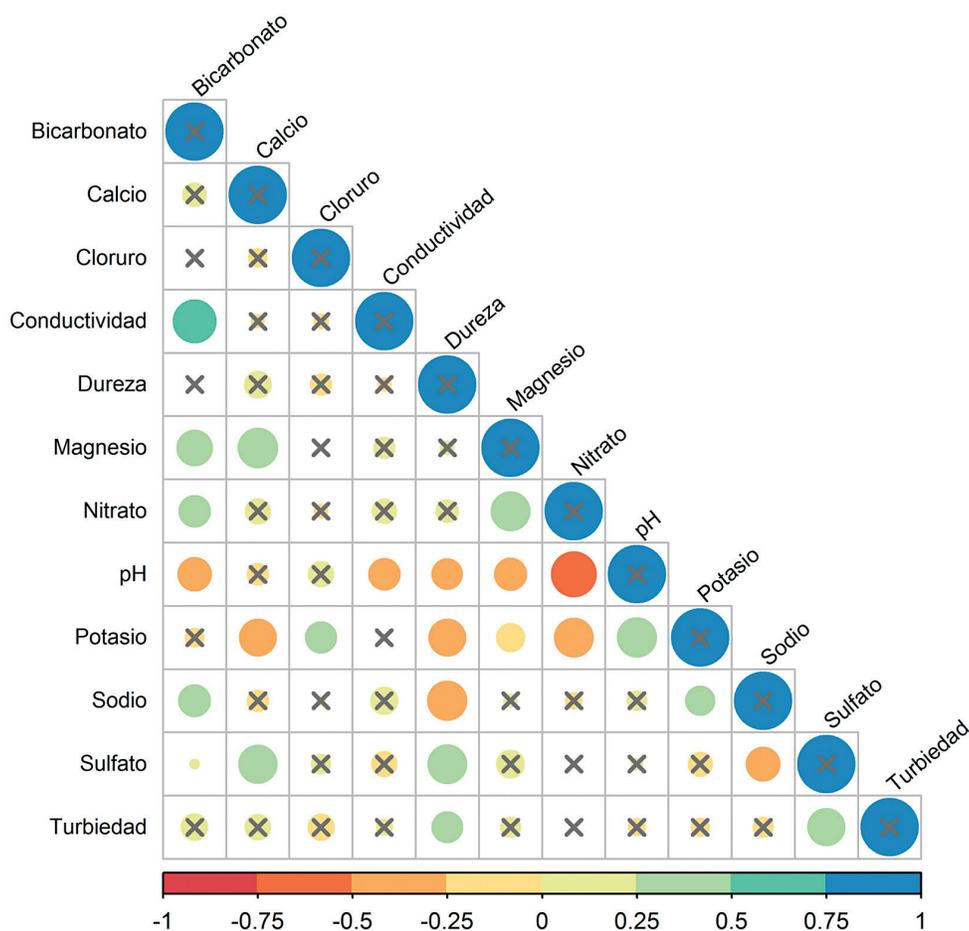


**Figura 3.** Caracterización hidrogeoquímica del agua extraída para consumo de la comunidad de Corral de Piedra, mediante el diagrama de Piper [14]

### Análisis de correlación y de componentes principales

Por medio del coeficiente Tau, que describe la correlación de Kendall, y el análisis de componentes principales, se analizó la asociación que existe entre los parámetros monitoreados en la zona de estudio. En la figura 4 se muestra la matriz de correlaciones, donde destaca una alta cantidad de valores estadísticamente no significativos (41 de 66,  $p > 0,05$ ). Por su parte, las 25 correlaciones significativas, los valores más altos, se deben a la relación de pH-nitrato y conductividad-bicarbonato, ambos con una categoría de correlación moderada; mientras

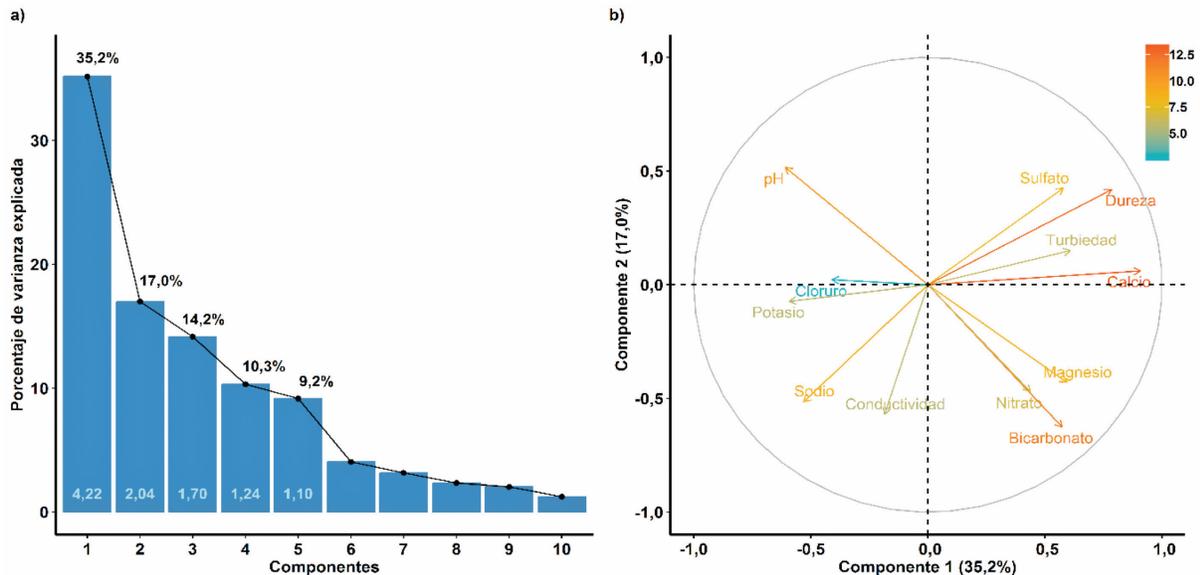
que para las restantes correlaciones, a pesar de ser significativas, los valores Tau sugieren una baja asociación entre los parámetros [13]. En aguas naturales, principalmente del tipo subterráneas, es común que exista una correlación importante entre iones mayoritarios, esto debido a los procesos naturales de mineralización del agua como a las interacciones agua-roca y otros procesos naturales [22]. Sin embargo, en este caso las muestras provienen de una red de abastecimiento para agua de consumo, lo cual podría favorecer el hecho de que las asociaciones existentes sean menores, debido a los tiempos de residencia del agua en contacto con la tubería y el tanque de almacenamiento, donde además se realizan procesos de cloración, que alteran las correlaciones naturales existentes entre los parámetros.



**Figura 4.** Matriz de correlación de Kendall entre los parámetros analizados en la zona de estudio (la escala inferior describe los valores del coeficiente Tau; las casillas con x indican valores  $p > 0,05$ ).

Se realizó un análisis de componentes principales (PCA) el cual consiste en una prueba de estadística multivariada que permite reducir la amplitud de un conjunto de datos, mediante la generación de componentes que explican, de cierta manera, la variabilidad total de los datos cuando su factor numérico principal (autovector) es mayor a 1. Cada parámetro analizado posee un factor de aporte distinto en cada componente, tomando valores de -1 hasta 1; la mayor contribución relativa a cada componente es la de los valores más cercanos a la unidad, esta técnica ha sido empleada en varios estudios para el análisis de la calidad del agua en pozos de consumo y estudios hidrogeoquímicos [27], [29].

En la figura 5 se muestran los resultados obtenidos del PCA aplicado a los datos de la zona de estudio. Los primeros cinco componentes principales poseen autovectores con valores mayores a 1 (figura 5a), lo que implica que son capaces de explicar en forma significativa la varianza; estos determinan el 85,6% de la variación total de los datos.



**Figura 5.** Análisis de los componentes principales en los datos obtenidos en la zona de estudio: a) Porcentaje de varianza explicada por cada componente b) Contribución de cada parámetro en los componentes más significativos

En la figura 5b, se indica el peso relativo de cada parámetro analizado en los componentes 1 y 2, ya que estos explican más del 50% de la variación total; en el componente 1 se identifican la dureza, el calcio, el bicarbonato y el pH como los de mayor contribución; sin embargo, este último posee un valor negativo, lo que sugiere una relación inversa con los primeros; esta puede ser explicada en términos de que los equilibrios de solubilidad que determinan la cantidad de calcio y dureza en el agua, son inversamente proporcionales a la variable de pH. Además, esta relación es congruente con los datos discutidos previamente, ya que el agua en la zona de estudio posee altos niveles de dureza y es del tipo bicarbonatada-cálcica. En el componente 2, nuevamente el bicarbonato y el pH son parámetros cuya contribución relativa es importante; sin embargo, en este caso se suma la conductividad, lo cual también es congruente con lo explicado en el cuadro 1, debido a que el agua en esta zona posee valores altos que superan los máximos admisibles según la normativa nacional; a su vez, se determinó que la correlación existente con los demás parámetros de aporte era del tipo moderada y significativa.

## Conclusiones y recomendaciones

Para los parámetros evaluados, los valores promedio no superan lo establecido en el decreto 38924-S del Ministerio de salud, ni lo recomendado por la OMS, por lo que se concluye que el agua es apta para uso y consumo humano.

El valor promedio de pH fue de 6,87, con variaciones que clasifican al agua como neutra - ligeramente ácida, contrastando con las concentraciones de ion bicarbonato determinadas, las cuales sugieren un contenido de alcalinidad importante, con un promedio de 358,2 mg/L.

El valor promedio de dureza total del agua fue de 257,6 mg/L CaCO<sub>3</sub>, que es congruente con los estudios realizados por Mora-Alvarado en el 2015, los cuales indicaron que la zona es de agua dura, con un valor de dureza de 259,6 mg/L CaCO<sub>3</sub>, correlacionado con las altas tasas de longevidad.

Según los criterios de calidad del agua de pozos y nacientes de Mora-Alvarado *et ál.* (2015), los resultados obtenidos para las muestras colectadas en la comunidad de Corral de Piedra en la mayoría de sitios de muestreo indicaron condiciones de calidad excelente; sin embargo, destaca que hay una porción de aproximadamente 50 muestras en que la calidad es de categoría “Mala”, debido principalmente al parámetro de conductividad.

La caracterización hidrogeoquímica realizada del agua del pozo por medio del diagrama de Piper mostró que el agua en la zona de estudio es del tipo bicarbonatada-cálcica, esto se relaciona con características importantes del acuífero del que se extrae el agua, y sugiere que el tiempo de tránsito en el suelo es corto y la recarga es rápida. Por otra parte, la caracterización también apuntó a que el principal mineral de la formación geológica de la zona de estudio puede ser la caliza, debido a las altas concentraciones de calcio y bicarbonato.

Por medio del análisis estadístico se evaluó la interrelación que existe entre los parámetros fisicoquímicos evaluados, y se encontró una alta proporción de correlaciones de Kendall no significativas; se determinó que esto se debe a que el agua evaluada es de una red de abastecimiento, por lo cual los tiempos de residencia del líquido en las tuberías puede afectar las correlaciones naturales entre los parámetros.

Finalmente, se realizó un análisis de los componentes principales para disminuir la amplitud del conjunto de datos y así poder explicar la variabilidad total de los resultados. Se obtuvieron 5 componentes principales que se relacionan de manera significativa con el 85,6% de la variación total; incluso, se determinó que los componentes 1 y 2 explican más del 50% de esta variabilidad; la dureza, el calcio, el bicarbonato, el pH y la conductividad fueron los parámetros de mayor aporte relativo en estos dos componentes.

## Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a los miembros de la junta directiva del Comité Comunal Administrador del Agua de Corral de Piedra por el acompañamiento en la toma de las muestras en la comunidad.

A los compañeros Leonardo Mena-Rivera y Viviana Salgado-Silva, quienes participaron durante un periodo importante del proyecto aportando su conocimiento en el diseño, las giras de campo y el análisis de laboratorio.

Al Dr. Juan Carlos Rojas Carrión, director del Centro Médico San Martín, por su apoyo incondicional en la realización de los análisis microbiológicos.

Al M.Sc. Efraín Solís Montiel, coordinador del Laboratorio de Servicios Químicos (LASEQ) de la Universidad Nacional, por su apoyo durante el periodo del estudio.

## Declaración de contribuciones

El diseño del estudio fue propuesto por Benavides, las giras de campo fueron realizadas por Benavides, Sánchez, Chaves y Quirós, los análisis de laboratorio y de resultados fueron realizados por Sánchez y colaboración de Chaves; todos los autores contribuyeron a la revisión del manuscrito.

## Referencias

- [1] D. A. Mora-Alvarado, A. Mata-Solano, y M. Sequeira-Barquero, "Actualización de los criterios de calidad del agua de pozos y nacientes para potabilización en Costa Rica", *Tecnol. en Marcha*, vol. 29, no. 3, pp. 85–98, 2015.
- [2] D. V. Chapman *et ál.*, "Developments in water quality monitoring and management in large river catchments using the Danube River as an example," *Environ. Sci. Policy*, vol. 64, pp. 141–154, 2016.
- [3] K. M. Bower, "Water supply and sanitation of Costa Rica," *Environ. Earth Sci.*, vol. 71, no. 1, pp. 107–123, 2014.
- [4] J. Herrera-Murillo, "Uso y estado de los recursos: Recurso hídrico", en *Informe Estado de la Nación en Desarrollo Sostenible 2017*, San José, Costa Rica: Programa Estado de la Nación, 2017, pp. 3–31.
- [5] *Agua*, Organización Mundial de la Salud, [Online]. Disponible en <http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water> [recuperado 29-nov.-2018]
- [6] Reglamento para la Calidad del Agua Potable, Decreto n.º 38924-S, 2015
- [7] A. Y. Katukiza, M. Ronteltap, P. van der Steen, J. W. A. Foppen, y P. N. L. Lens, "Quantification of microbial risks to human health caused by waterborne viruses and bacteria in an urban slum," *J. Appl. Microbiol.*, vol. 116, no. 2, pp. 447–463, 2014.
- [8] D. Rojas-Cantillano, J. M. Coto-Campos, C. Benavides-Benavides, V. Salgado-Silva, y J. Jiménez-Torres, "Percepción de los pobladores sobre cambios del entorno en Corral de Piedra, Nicoya, Guanacaste", *Biocenosis*, vol. 29, no. 1–2, pp. 90–96, 2014.
- [9] L.F. Alvarado, Fase actual: transición El Niño", en Boletín del ENOS n.º 115, Instituto Meteorológico Nacional, San José, Costa Rica. Informe 6, 2018.
- [10] P. Denyer T. Aguilar, y W. Montero, Cartografía geológica de la península de Nicoya, Costa Rica: Mapa Geológico de la Hoja Talolinga (1:50000), 29-nov.-2018. [en línea] Disponible en [www.geologia.go.cr/paginas/eliminadas/75...75.../memorias\\_potenciales\\_percy.pdf](http://www.geologia.go.cr/paginas/eliminadas/75...75.../memorias_potenciales_percy.pdf)
- [11] APHA-AWWA-WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* 22st. ed., American Public Health Association, 2012 [en línea]. Available: <https://www.standardmethods.org/>. [Último acceso: 8-nov.-2018].
- [12] Organización Mundial de la Salud, *Guidelines for Drinking-Water Quality*, 4a ed. Ginebra, 2011.
- [13] D. Helsel y R. Hirsch, "Statistical Methods in Water Resources," en *Hydrologic Analysis and Interpretation*, C. Groat y G. Norton, Eds. Washington, D.C.: U.S. Geological Survey, 2011, pp. 100–218.
- [14] A.M. Piper, "A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses," *Transactions, American Geophysical Union*, vol. 25, no. 6, p 914. doi:10.1029/TR025i006p00914
- [15] R Core Team. *R: Language & Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing 2017.
- [16] L. Lee y D. Helsel, *NADA: Nondetects and Data Analysis for Environmental Data*, R Package Version 1.6-1. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2017.
- [17] H. Wickham. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. New York: Springer-Verlag 2017.
- [18] R. Herojeet, M. S. Rishi, R. Lata, and R. Sharma, "Application of environmetrics statistical models and water quality index for groundwater quality characterization of alluvial aquifer of Nalagarh Valley, Himachal Pradesh, India," *Sustain Water Resour. Manag.*, vol. 2, no. 1, pp. 39–53, 2016.
- [19] H. Khairy and M. R. Janardhana, "Hydrogeochemistry and quality of groundwater of coastal unconfined aquifer in Amol-Ghaemshahr plain, Mazandaran Province, Northern Iran," *Environmental Earth Scs.*, vol. 71, no. 11, pp. 4767–4782, 2014.
- [20] S. M. Yidana, P. Bawoyobie, P. Sakyi, and O. F. Fynn, "Evolutionary analysis of groundwater flow: Application of multivariate statistical analysis to hydrochemical data in the Densu Basin, Ghana," *J. African Earth Scs.*, vol. 138, pp. 167–176, 2018.
- [21] D. A. Mora-Alvarado, C. F. Portuguese-Barquero, N. Alfaro-Herrera, and M. Hernández-Mirault, "Diferencias de dureza del agua y las tasas de longevidad en la península de Nicoya y los otros distritos de Guanacaste," *Rev. Tecnol. en Marcha*, vol. 28, no. 3, pp. 3–14, 2015.
- [22] Y. Zhang *et ál.*, "Hydrochemical characteristics and multivariate statistical analysis of natural water system: A case study in Kangding County, Southwestern China," *Water*, 2018.
- [23] C. Singaraja, S. Chidambaram, M. V Prasanna, C. Thivya, and R. Thilagavathi, "Statistical analysis of the hydrogeochemical evolution of groundwater in hard rock coastal aquifers of Thoothukudi district in Tamil Nadu, India," *Environmental Earth Scs.*, vol. 71, pp. 451–464, 2014.

- [24] N. Chandrasekar, S. Selvakumar, Y. Srinivas, J. S. John Wilson, T. Simon Peter, and N. S. Magesh, "Hydrogeochemical assessment of groundwater quality along the coastal aquifers of southern Tamil Nadu, India," *Environmental Earth Scs.*, vol. 71, no. 11, pp. 4739–4750, 2014.
- [25] I. A. Abboud, "Geochemistry and quality of groundwater of the Yarmouk basin aquifer, North Jordan," *Environmental Geochem. Health*, no. 89, 2018.
- [26] M. El Alfy, A. Lashin, F. Abdalla, and A. Al-Bassam, "Assessing the hydrogeochemical processes affecting groundwater pollution in arid areas using an integration of geochemical equilibrium and multivariate statistical techniques," *Environmental Pollut.*, vol. 229, pp. 760–770, 2017.
- [27] M. Al-harbi, F. M. Al-ruwaih, and A. Alsulaili, "Statistical and Analytical Evaluation of Groundwater Quality in Al-Rawdhatain Field," *Environmental Progress & Sustainable Energy J.*, vol. 33, no. 3, pp. 895–904, 2014.
- [28] H. Saldarriaga-Noreña *et ál.*, "Chemical Evaluation of Groundwater from Supply Wells in the State of Coahuila, México," *J. Water Resource and Protection*, vol. 6, January, pp. 49–54, 2014.
- [29] J. Xu *et ál.*, "Statistical analysis of groundwater chemistry of the Tarim River lower reaches, Northwest China," *Environmental Earth Scs.*, vol. 65, no. 6, pp. 1807–1820, 2012.