

Hidroquímica de las aguas subterráneas en la Provincia de Herrera: análisis mediante diagrama de Piper

Hydrochemistry of groundwater in Herrera Province: analysis via Piper diagram

Denise Marie Acosta Eriksson¹, Caleb Guevara Williams Morales¹, Haydée Osorio-Ugarte^{1,2,3,*}

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Civil, Panamá

²Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencia, Ingeniería y Tecnología (CEMCIT-AIP), Panamá

³Grupo de Investigación Forest Hydrology and Urban Waters (FHyUW), Panamá

*Autor de correspondencia: haydee.osorio@utp.ac.pa.

Fecha de recepción: 25 de octubre de 2025. Fecha de aceptación: 1 de febrero de 2026.

Resumen. Este estudio tuvo como objetivo fundamental evaluar la dinámica hidrogeoquímica y la composición iónica de las aguas subterráneas en la provincia de Herrera, Panamá, para identificar patrones de calidad y origen del recurso. La metodología se basó en el muestreo de 11 pozos representativos (distritos de Parita, Pesé, Los Pozos, Chitré y Santa María) realizado durante el año 2024, utilizando el software ArcGIS Pro para la georreferenciación y AquiferApp para el procesamiento de datos fisicoquímicos como pH, conductividad, dureza y alcalinidad, bajo el modelo gráfico del diagrama de Piper. Los resultados revelaron una marcada heterogeneidad química, con una transición desde aguas bicarbonatadas cálcicas y magnésicas en zonas de recarga, hasta facies sulfatadas y cloruradas en sectores específicos del Arco Seco, lo que sugirió procesos de interacción agua-roca vinculados a formaciones volcánicas y sedimentarias (Cretácico al Cuaternario). Asimismo, el análisis gráfico evidenció la influencia de minerales carbonatados y posibles procesos de intrusión salina en áreas cercanas a cuerpos de agua como el río La Villa y el río Parita. Se concluyó que la aplicación del diagrama de Piper es una herramienta técnica esencial que proporcionó una línea base científica para el diagnóstico de la vulnerabilidad de los sistemas acuíferos. Estos hallazgos constituyeron un insumo crítico para fortalecer la gobernanza hídrica y facilitar la planificación de trámites de gestión territorial en una región afectada por una marcada estacionalidad climática.

Palabras clave. Aguas subterráneas, calidad del agua, cationes, diagrama de Piper, hidrogeoquímica.

Abstract. This study's fundamental objective is to evaluate the hydrogeochemical dynamics and ionic composition of groundwater in Herrera Province, Panama, to identify patterns of quality and the resource's origin. The methodology was based on the sampling of 11 representative wells (districts of Parita, Pesé, Los Pozos, Chitré, and Santa María) during 2024, utilizing ArcGIS Pro software for georeferencing and AquiferApp for the processing of physicochemical data such as pH, conductivity, hardness, and alkalinity, under the graphical model of the Piper diagram. The results reveal a marked chemical heterogeneity, with a transition from calcium and magnesium bicarbonate facies in recharge zones to sulfate and chloride facies in specific sectors of the "Arco Seco", suggesting water-rock interaction processes linked to volcanic and sedimentary formations (Cretaceous to Quaternary). Furthermore, the graphical analysis evidences the influence of carbonate minerals and potential saltwater intrusion processes in areas near water bodies such as the La Villa and Parita rivers. It is concluded that the application of the Piper diagram is an essential technical tool that provides a scientific baseline for diagnosing the vulnerability of aquifer systems. These findings constitute a critical input to strengthen water governance and facilitate the planning of land management procedures in a region affected by marked climatic seasonality.

Keywords. Groundwater, water quality, cations, Piper diagram, hydrogeochemistry.

1. Introducción

La gestión de los recursos hídricos ha representado uno de los desafíos más críticos para el desarrollo sostenible, especialmente ante el escenario de variabilidad climática global [1]. En Panamá, a pesar de la abundancia de recursos, la distribución de la precipitación ha sido históricamente irregular, siendo el "Arco Seco" la región más vulnerable debido a su marcada aridez [2]. En la provincia de Herrera, esta condición, potenciada por eventos como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), condicionó la disponibilidad de agua superficial, lo que obligó a una mayor dependencia de las fuentes subterráneas [3].

A pesar de su relevancia, la composición química de los acuíferos en esta región carecía de un monitoreo sistemático que permitiera entender los procesos de evolución del agua [4]. La hidroquímica observada fue el resultado de interacciones complejas entre la fase líquida y las formaciones geológicas, influenciadas por el tiempo de residencia y la actividad antrópica [5].

Para interpretar estos fenómenos, se emplearon métodos gráficos como el diagrama de Piper, el cual facilitó la identificación de facies hidroquímicas mediante el análisis de las concentraciones de iones mayoritarios [6]. Al integrar estos datos con el contexto geológico, fue posible determinar el origen de la salinidad y detectar procesos de degradación, como la intrusión marina en zonas costeras [7]. Este estudio caracterizó la hidroquímica regional aportando datos técnicos fundamentales para el fortalecimiento de la gobernanza hídrica.

2. Metodología

2.1 Área de estudio y contexto geológico

La investigación se centró en la provincia de Herrera, que presentó un clima tropical de sabana y una geología que abarcó desde rocas volcánicas del Cretácico hasta depósitos aluviales del Cuaternario [8]. La ubicación de los puntos de control se detalló en la figura 1, mientras que la litología que determinó la química del agua se presentó en la figura 2 [9].

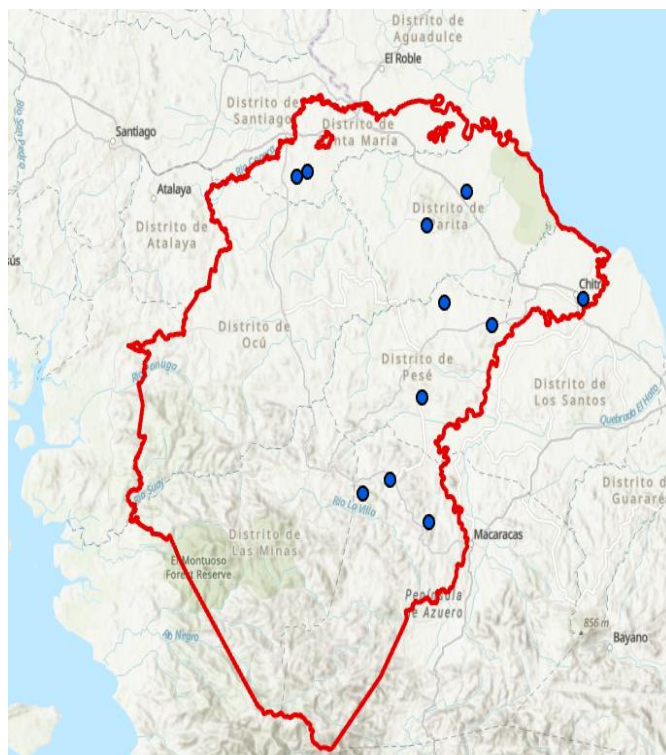


Figura 1. Ubicación de los puntos de control.

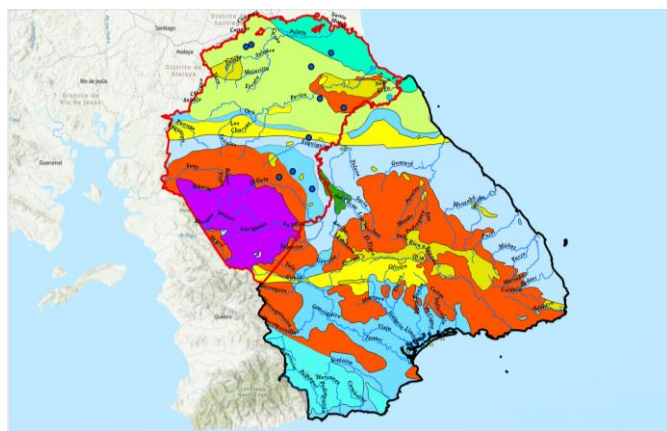


Figura 2. Litología de la zona de estudio.

2.2 Muestreo y Análisis de Parámetros

Se seleccionaron 11 pozos estratégicos considerando su ubicación y uso. En cada punto, se ejecutaron mediciones de parámetros físicoquímicos mediante sensores multiparamétricos [10]. Las muestras fueron procesadas en laboratorio para cuantificar los iones mayoritarios, validando la precisión mediante el balance iónico, donde se aceptó un error inferior al $\pm 5\%$ [11]. La base de datos fue proporcionada por el Ministerio de Salud, a través de su laboratorio en la provincia de Herrera. Los datos cartográficos y geoespaciales, es decir, las capas de análisis (geología, provincia, litología, geomorfología, clima e hidrografía) se descargaron del portal GIS del Smithsonian Tropical Research Institute (STRI). El modelo digital de terreno (DTM) para el mapa de elevación se obtuvo de la base de datos de la República de Panamá.

2.3 Análisis hidroquímico

Para la clasificación de los datos, se utilizó la herramienta AquiferApp, con la cual se generó el diagrama de Piper (figura 3). Este análisis permitió agrupar las muestras y mapear su distribución espacial en la figura 4, facilitando la interpretación de los procesos hidrogeoquímicos que predominaron en la cuenca durante el periodo de estudio [12].

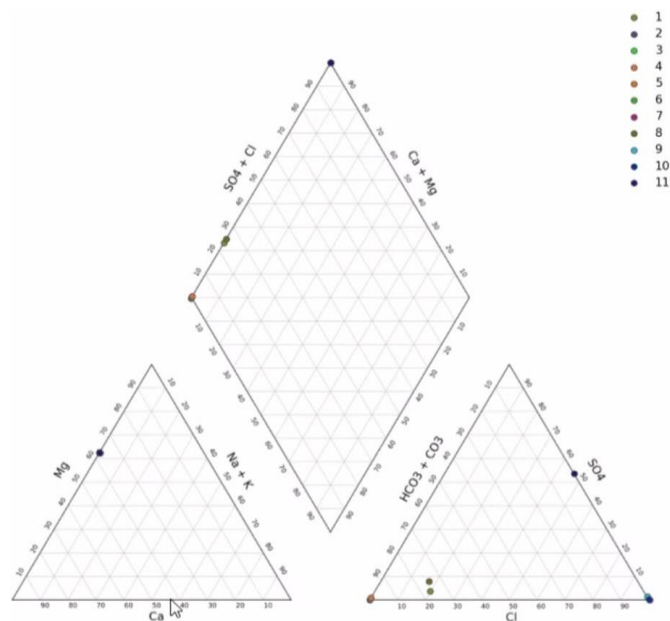


Figura 3. Diagrama de Piper.

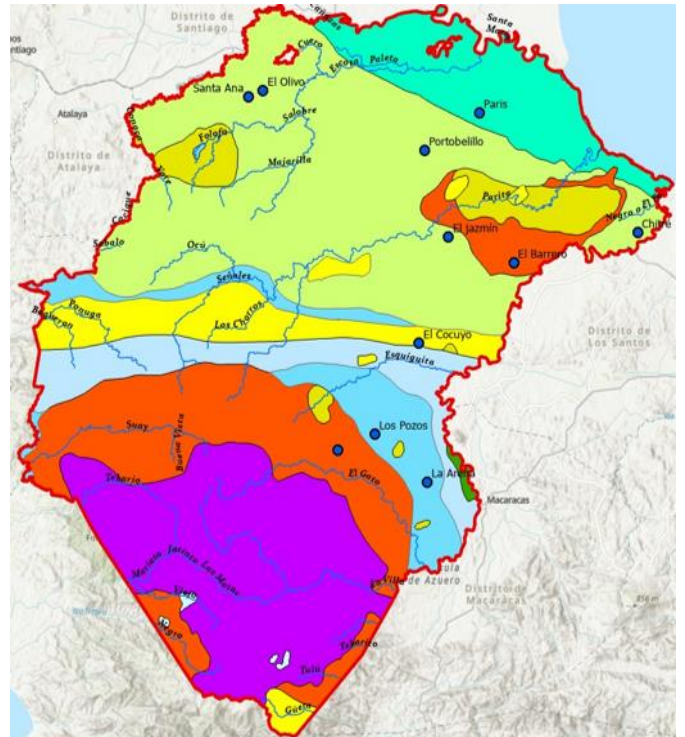


Figura 4. Pozos según el tipo de agua haciendo uso del diagrama de Piper.

3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización físicoquímica

Los análisis realizados en los 11 puntos de muestreo indicaron una variabilidad significativa en los parámetros de calidad. Se registraron valores de pH entre 6.8 y 8.2, lo que situó a la mayoría de las muestras dentro de un rango de neutralidad a ligera alcalinidad. La conductividad eléctrica (CE) mostró un incremento notable en los pozos ubicados en las zonas bajas de los distritos de Chitré y Parita, alcanzando valores superiores a los $800 \mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual se vinculó a una mayor mineralización por el tiempo de residencia y la litología local [13].

3.2 Clasificación mediante el diagrama de Piper

El procesamiento de las concentraciones iónicas en AquiferApp permitió generar la figura 3, donde se visualizó la distribución de las muestras en el rombo central del diagrama. El 64% de los pozos analizados presentaron una facies bicarbonatada cálcica (Ca-HCO_3), predominando en los distritos de Los Pozos y Pesé. Este hallazgo fue consistente con procesos de recarga reciente y la disolución de minerales silicatados y carbonatados presentes en las formaciones volcánicas de la región [14].

Por otro lado, se identificó un grupo secundario de muestras con tendencia hacia facies cloruradas sódicas (Na-Cl) y sulfatadas cálcicas. Este comportamiento se observó principalmente en los pozos cercanos a la línea de costa y en áreas con intensa actividad agropecuaria. La figura 4 ilustró cómo la transición química ocurrió de forma gradual desde las zonas de mayor elevación hacia las llanuras sedimentarias, sugiriendo que la composición iónica estuvo fuertemente influenciada por la geología regional y, en menor medida, por procesos de evaporación en el Arco Seco [15].

3.3 Evolución Geoquímica y calidad

La interpretación de los resultados evidenció que la lixiviación de las rocas volcánicas (Formación Ocú y similares) aportó la mayor carga de cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+}) al sistema acuífero. No obstante, la presencia de niveles elevados de cloruros en sectores específicos de Herrera indicó una posible intrusión marina incipiente o el impacto de procesos de retorno de riego en zonas de cultivo [16]. Estos hallazgos confirmaron que, aunque la calidad general fue apta para los usos actuales, existe una vulnerabilidad latente que requiere una gestión territorial basada en datos técnicos robustos.

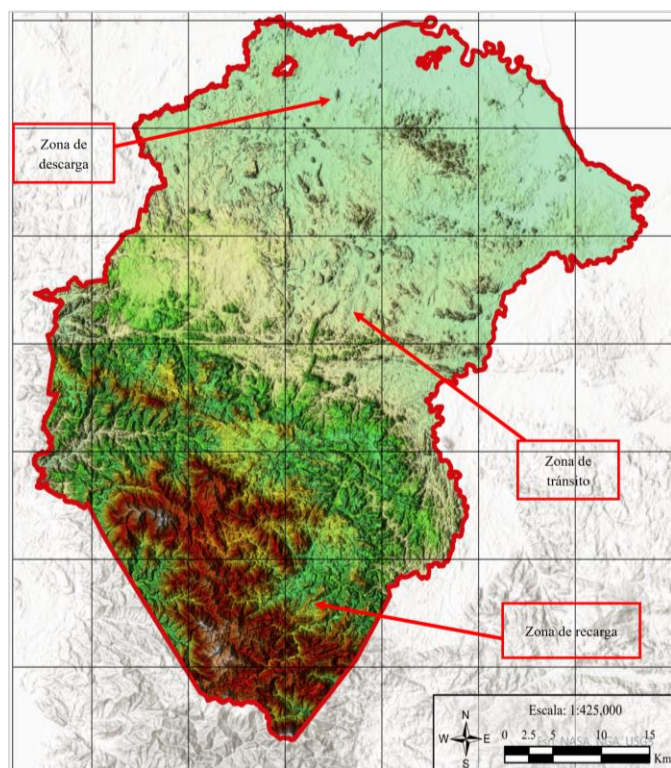


Figura 5. Zonas de recarga, tránsito y descarga de la provincia de Herrera

4. Conclusiones

La aplicación sistemática del diagrama de Piper permitió clasificar con precisión las aguas subterráneas de la provincia de Herrera, revelando que la composición iónica estuvo dominada por facies bicarbonatadas cálcicas en el 64% de los puntos evaluados. Este patrón confirmó que el proceso de interacción agua-roca, específicamente la disolución de silicatos y carbonatos de las formaciones volcánicas fue el mecanismo principal de mineralización en la región [17].

Se identificó una transición hidroquímica significativa hacia facies cloruradas sódicas en los distritos costeros, lo que evidenció una vulnerabilidad latente ante procesos de intrusión salina o concentración por evaporación, fenómenos críticos dada la aridez característica del Arco Seco. Los resultados demostraron que el uso de herramientas de procesamiento digital como AquiferApp optimizó la interpretación de grandes volúmenes de datos fisicoquímicos, facilitando la detección de anomalías en la calidad del recurso [1].

Finalmente, el estudio proporcionó una línea base técnica indispensable para la gestión hídrica provincial. Estos hallazgos constituyeron un insumo científico de alto valor para orientar futuros trámites de planificación territorial y fortalecer la gobernanza del agua en áreas con alta variabilidad climática, asegurando que la explotación del recurso se realice bajo criterios de sostenibilidad técnica.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo se basa en los resultados del trabajo de graduación presentado por Franklin Bianco para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería Ambiental. La investigación forma parte del proyecto “Análisis de los impactos ambientales, con énfasis en los indicadores de biodiversidad íctica, en la cuenca del Río Caimito, Panamá Oeste, República de Panamá”, beneficiado de la convocatoria pública de Fomento a la Investigación y Desarrollo realizada por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación. Los objetivos propuestos se alcanzaron producto de la colaboración entre la Universidad Tecnológica de Panamá, la Universidad Marítima Internacional de Panamá y la empresa Corporación de Desarrollo Ambiental.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] J. Pérez, E. Cherrington y B. Hernández, "Los Impactos Potenciales del Cambio Climático en los Recursos Hídricos de América Central y el Caribe", CATHALAC e IDRC, Ciudad de Panamá, Panamá, Inf. Téc., 2015. [En línea]. Disponible: <http://www.cathalac.int>. [Accedido: 25-oct-2026].
- [2] ETESA, "Registros Históricos de Precipitación y Temperatura - Estación Capitán Alonso Valderrama (Chitré)", Empresa de Transmisión Eléctrica S.A., Ciudad de Panamá, Panamá, Base de Datos Hidrometeorológica, 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.hidromet.com.pa/>. [Accedido: 25-oct-2026].
- [3] D. Morales, "Caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas en la subcuenca del río Zaratí", en XIX Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología - APANAC 2023, Panamá, 2023, pp. 26-29. [En línea]. Disponible: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/apanac/article/download/3935/4452/>. [Accedido: 25-oct-2026].
- [4] D. Acosta y C. Guevara, Aplicación del diagrama de Piper para identificar patrones de la composición iónica de las aguas subterráneas en la provincia de Herrera, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá, 2025.
- [5] C. Appelo y D. Postma, Geochemistry, Groundwater and Pollution, 2da ed. Leiden, Países Bajos: CRC Press, 2005.
- [6] A. Piper, "A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses," Transactions, American Geophysical Union, vol. 25, no. 6, pp. 914-928, 1944
- [7] F. N. Martínez, "Caracterización de los factores hidrogeológicos, hidrológicos y antrópicos que condicionan la interacción de aguas superficiales-subterráneas del río Andarax", Tesis Doctoral, Universidad de Almería, Almería, España, 2018.
- [8] Instituto Geográfico Nacional "Tommy Guardia" y Dirección General de Recursos Minerales (DGRM), "Mapa Geológico de la República de Panamá", Escala 1:250,000, Proyecto Inventario Minero (BID - Swedish Geological Co.), Ciudad de Panamá, Panamá, 1990.
- [9] M. Pineda-Falconett, X. Batista, R. Villarán y J. Nieto, "Teledetección en la cartografía geológica de la Península de Azuero (Panamá)," Centros: Revista Científica Universitaria, vol. 7, no. 1, 2018. [En línea]. Disponible: <https://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/228/2281023011/2281023011.pdf>. [Accedido: 25-oct-2026].
- [10] APHA, AWWA y WEF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23ra ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2017
- [11] W. W. Wood, W. E. Sanford, J. A. Cherry y W. T. Wood, "Wrecking the Rocks: Continental weathering by groundwater," Geology, vol. 51, no. 12, pp. 1122-1126, 2023.
- [12] Esri, "An overview of the Hydrology toolset", ArcGIS Pro Documentation, 2024. [En línea]. Disponible: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-hydrology-tools.htm>. [Accedido: 25-oct-2026].
- [13] OMS, Guías para la calidad del agua de consumo humano, 4ta ed. Ginebra, Suiza: Organización Mundial de la Salud, 2017.
- [14] AquiferApp, Digital Tools for Hydrogeochemical Modeling, [En línea]. Disponible: [lineas\] https://aquifer.hatarilabs.com](https://aquifer.hatarilabs.com), 2024. [Accedido: 25-oct-2026].
- [15] A. González, C. J. C. Martínez y J. R. Fábrega-Duque, "Description of the Availability of Hydrological and Hydrogeological Information on Wells in the Zaratí River Sub-Basin", en 2022 8th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC), Ciudad de Panamá, Panamá, 2022, pp. 528-535.
- [16] M. E. Gutiérrez y T. Espinosa, "Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático: Diagnóstico inicial, avances, vacíos y potenciales líneas de acción en Mesoamérica", Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Washington, D.C., Inf. Téc. IDB-TN-184, 2010.
- [17] J. M. Pérez, "Meteorización química", Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, vol. 22, no. 3, pp. 230-238, 2014