

Evaluación de los efectos de minerales solubles en las aguas superficiales del corregimiento de Pajonal, Panamá

Evaluation of the effects of soluble minerals in the surface waters of the town of Pajonal, Panama

Hillary S. Sandoval-Fernández^{1,2*}, Rita D. Rodríguez-Gutiérrez^{1,2}, Ernesto Martínez^{1,2}, Juan Valdés-González^{2,3}, Eufemia Lam^{1,2}, Yinela Y. Solís-Mendoza^{1,2}, Rafael E. Martínez-Domínguez^{2,4}, Tisla Monteza-de Destro²

¹Departamento de Geociencias Aplicadas y Transporte, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá

²Grupo de Investigación Propuesta de Geoparque Puente de las Américas, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá.

³Laboratorio de Química de la Atmósfera, LAQAT-UNA, Escuela de Química, Universidad Nacional de Costa Rica

⁴Licenciatura en Ingeniería de Sistemas Informáticos, Facultad de Ingeniería, Universidad Latina de Panamá

*Autor de correspondencia: hillary.sandoval@utp.ac.pa

RESUMEN. En las visitas previas a la campaña de muestreo para la elaboración de un mapa geológico en el corregimiento de Pajonal, se observó que las aguas de todas las localidades tienen una coloración blancuzca. El objetivo de este estudio es determinar si esta coloración blanca se debe a la disolución de minerales provenientes de la Piedra Jabón de Pajonal y si esta disolución afecta la calidad del agua superficial. Se analizaron 15 muestras, de las cuales 13 muestras corresponden a aguas superficiales obtenidas en la cercanía de los afloramientos de la Piedra Jabón de Pajonal. Los puntos restantes fueron tomados en manantiales asociadas a sistemas hidrotermales vinculados a la formación de esta roca. Se utilizaron métodos organolépticos para la determinación de color y olor. Se usó un multiparámetro para obtener el pH, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos disueltos. Se realizaron pruebas en laboratorios de sólidos totales SM2540B y metales pesados mediante el Método ICP-OES. Además, se evaluaron los límites máximos de metales pesados en el agua según normativas aplicables a agua potable, vida acuática, riego y acuicultura. En conclusión, la Piedra Jabón de Pajonal no altera la calidad del agua superficial de los ríos, ya que los minerales solubles que la componen no se liberan en concentraciones que superen los límites. Sin embargo, se encontraron altos niveles de metales pesados en las muestras de aguas subterráneas hidrotermales, lo que podría representar un riesgo si estos llegaran a filtrarse en los nacientes utilizados como agua potable.

Palabras clave. Calidad de agua, geología, geoquímica, hidrotermalismo, metales pesados, mineralogía.

ABSTRACT. In the visits prior to the sampling campaign for the preparation of a geological map in the village of Pajonal, it was observed that the waters of all the localities had a whitish color. The objective of this study is to determine whether this white coloration is due to the dissolution of minerals from the Piedra Jabón de Pajonal and whether this dissolution affects the quality of surface water. Fifteen samples were analyzed, of which thirteen correspond to surface waters collected near outcrops of the Piedra Jabón de Pajonal. The remaining sampling points were taken from springs associated with hydrothermal systems linked to the formation of this rock. Organoleptic methods were used to determine color and odor. A multiparameter device was used to measure pH, temperature, electrical conductivity, and dissolved solids. Laboratory tests were performed for total solids using method SM2540b and for heavy metals using the ICP-OES method. Additionally, the maximum limits of heavy metals in water were evaluated according to applicable regulations for drinking water, aquatic life, irrigation, and aquaculture. In conclusion, the Piedra Jabón de Pajonal does not alter the quality of river surface water, as the soluble minerals it contains are not released in concentrations that exceed regulatory limits. However, high levels of heavy metals were found in samples of hydrothermal groundwater, which could pose a risk if these were to infiltrate the springs used for drinking water.

Keywords. Water quality, geology, geochemistry, hydrothermalism, heavy metals, mineralogy.

Citación: H. Sandoval, R. Rodríguez, E. Martínez, J. Valdés, E. Lam, Y. Solis, R. Martínez y T. Monteza, "Evaluación de los efectos de minerales solubles en las aguas superficiales del corregimiento de Pajonal, Panamá", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 20, no. 1, pp. (0), 2025.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 29 de abril de 2024. **Recibido con correcciones:** 20 de septiembre de 2024. **Aceptado:** 20 de septiembre de 2025.

DOI:

Copyright: 2025 H. Sandoval, R. Rodríguez, E. Martínez, J. Valdés, E. Lam, Y. Solis, R. Martínez y T. Monteza. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

1. Introducción

La Piedra Jabón de Pajonal expuesta en la figura 1, es una roca utilizada por las comunidades de La Mina, Membrillo Centro y Águila Abajo del corregimiento de Pajonal, como materia prima para la creación de artesanías [1]. Estas artesanías han representado el sustento de muchas familias desde la década de 1950, según lo expresado por artesanos y moradores en distintas entrevistas realizadas durante el proyecto: “Ubicación, clasificación y elaboración del mapa geológico de un polígono ubicado en la comunidad de Membrillo, en Coclé donde se localiza el yacimiento de la “Piedra Jabón” (APY-NI-2019B-11).



Figura 1. Piedra Jabón de Pajonal.

La Piedra Jabón de Pajonal es una roca de origen ígneo que sufrió una alteración hidrotermal argílica intermedia. Está relacionada a las erupciones de aglomerados y brechas volcánicas del Volcán El Valle. Presenta en su composición mineralógica: cuarzo (0.7-0.9%), amorfos y poco cristalino (36-46%), kaolinita (33-58%), cristobalita (1-17%) y los minerales óxidos como maghemita, anatasa y hematita que varían de 0.4-5% [2].

Durante los levantamientos de campo del proyecto se observó, que las aguas de los ríos Sofrito, Sañón, Los Pilares, Salado, Serén, Membrillo, Tranquilla, Marica y Chorrerita, presentaban una coloración blancuzca. Mismos ríos en donde se identificaron afloramientos de Piedra Jabón de Pajonal.

La Organización Mundial de la Salud señala que la presencia de minerales solubles puede alterar la composición física y química del agua. Asimismo, reconoce que ciertos minerales disueltos como el arsénico (As), pueden tener efectos adversos sobre la salud si están en concentraciones elevadas [3] [4] [5].

Esta coincidencia llevó a que se planteara la posibilidad de que la coloración de los ríos estuviera relacionada con la disolución de minerales presentes en esta roca, ya que no se encontró bibliografía referente al origen de este fenómeno en la región. Por lo tanto, se formuló la siguiente pregunta de investigación: ¿los minerales solubles de la Piedra Jabón de Pajonal afectan la calidad del agua superficial en esta región?.

Con el fin de responder a esta interrogante, se incluyó en el estudio un análisis preliminar de las aguas de la zona desde el punto de vista de sus propiedades fisicoquímicas. Asimismo, generar una base de datos que sirva como referencia para futuras investigaciones y para la gestión de los recursos hídricos en el área de estudio.

1.1 Marco geológico

El área de estudio se ubica dentro del Complejo Volcánico El Valle. La característica geológica principal de esta área es la existencia de un volcán cuaternario en el Valle de Antón, ubicado aproximadamente a 11 kilómetros al este de área investigada [6].

En la actualidad, el Valle de Antón se cataloga como un volcán extinto, sin embargo, en el pasado su actividad volcánica fue altamente explosiva y se prolongó durante un período de entre 1,5 y 2 millones de años [6], [7].

Según el documento “Geología y ocurrencias de minerales en tres sectores de Panamá”, el área de estudio pertenece a la zona central de Panamá y está afectado por dos familias de fallas. La Zona de falla de Coclé con una orientación NE-SW y la Cuenca Cerro Turega-Sorá con una orientación E-W [8]. Estos sistemas de fallas se pueden observar a través de la orientación de los ríos en estudio. El río Tranquilla, río Chorrerita y el río Marica con orientación NE-SW y los ríos Sofrito, río Sañón, río Salado, río Serén y río Membrillo con orientación E-W [1].

El mapa “Geología de la zona de estudio de la Piedra Jabón de Pajonal”, escala 1:25,000, nos describe la estratigrafía del sitio. En la base se encuentra material del Mioceno de formación Tucué, seguido de ignimbritas del Plioceno de la formación El Encanto; lavas Pre-Caldera, aglomerados y brechas volcánicas, Piedra Jabón de Pajonal de la formación El Valle; depósitos piroclásticos dacíticos de las erupciones de Río Mar y Depósitos piroclásticos del centro eruptivo Mata Ahogado de la formación Río Hato [1].

1.2 Hidrología

La red hidrográfica del área de estudio pertenece a la subcuenca del río Zaratí, esta forma parte de la cuenca del río Grande (cuenca 134). Localizada en la vertiente del Pacífico, limitada al este por la cuenca del Río de Antón, al oeste por la cuenca del Río Grande, al sur con el corregimiento el Coco, al norte con la cuenca del Río Coclé del Norte [9].

Según la información recaudada de la estación hidrológica de Murcielaguero por la empresa ETESA el área de drenaje del río Zaratí es de 138 km² [10].

La subcuenca del río Zaratí es de suma importancia para la región de Coclé, constituyendo una de las principales fuentes de abastecimiento de agua, utilizada tanto para consumo humano como para actividades agrícolas, ganaderas y agroindustriales.

1.3 Hidrogeología

El Mapa Hidrogeológico de Panamá clasifica los acuíferos del país de acuerdo con la estimación de la productividad de estos y las características generales de las formaciones donde se ubican, la misma sirve como base al momento de realizar un estudio de las aguas de una zona [11].

El área de estudio está dentro de los acuíferos tipo A2 que se pueden definir como acuíferos de permeabilidad variable y moderadamente productivos con un caudal de producción entre 3 y 10 m³/h, en la unidad hidrogeológica de acuíferos de extensión variable, libres, constituidos por productos volcánicos fragmentarios de granulometría variable, sobrepuestos a flujos lávicos indiferenciados, con una calidad química de las aguas generalmente buena [7], [11], [12].

Existen acuíferos termales vinculados a la actividad volcánica de El Valle, estos han sido de interés en múltiples investigaciones como el Estudio de Reconocimiento de los Recursos Geotérmicos de la República de Panamá realizado por el Instituto de Recursos Hidráulicos y Electrificación. Dentro de este estudio se efectuaron análisis geoquímicos en varios de estos acuíferos situados en la región del Complejo Volcánico El Valle [6], [12]. Los resultados más cercanos al área de estudio son:

- Las aguas cloruro-sulfato-alcálinas de Chiguirí Abajo: (aproximadamente 20 km al noroeste de El Valle) con temperaturas entre 29 a 33 °C, TDS de aproximadamente 260 meq/l, alta pCO₂ y temperatura geoquímica de 65 a 70 °C. Las temperaturas geoquímicas indicadas por la composición de los gases son de aproximadamente 120 °C. Este acuífero

puede representar descargas marginales desde un sistema geotérmico ubicado bajo la misma cuenca de "El Valle" [6].

- Las aguas cloruro-alcálinas de la cuenca de El Valle (T= 29 a 39 °C, TDS= 14 a 70 meq/l, alta pCO₂) con temperatura geoquímica de 75 a 80 °C. Las temperaturas geoquímicas indicadas por la composición de los gases son de aproximadamente 150 °C [6].

2. Materiales y Métodos

2.1 Criterios de selección de puntos

En la primera etapa del proyecto APY-NI-2019B-11, que dio inicio el 09 de junio de 2021 y finalizó el 29 de octubre de 2021, se realizaron las campañas de muestreo de rocas y la toma de parámetros fisicoquímicos utilizando un multiparámetro tipo pluma (Ohaus ST20M-B) en 32 puntos, tomando en consideración una malla definida en la investigación, orienta por los principales ríos de la zona. En base a los resultados obtenidos y la verificación de los puntos donde se localizaron los afloramientos de la Piedra Jabón de Pajonal, se seleccionaron 13 puntos ubicados en las cercanías de esta roca y dos puntos correspondientes a manantiales asociadas a sistemas hidrotermales vinculados a la formación de dicha roca para realizar el análisis de este estudio.

2.2 Muestreo de aguas

La campaña de muestro se realizó del 27 al 29 de septiembre de 2021. Se recolectaron muestras en envases de 30 mL en 15 puntos, obtenidas en la cercanía de los afloramientos de Piedra Jabón de Pajonal. De los cuales, 13 puntos corresponden a muestras de aguas superficiales y los puntos restantes fueron tomados en manantiales hidrotermales. Se realizaron en sitio, análisis fisicoquímicos (temperatura, pH, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales) a cada una de las muestras con un multiparámetro proporcionado por el laboratorio de análisis industriales y ciencias ambientales (LABAICA). Los análisis en sitio se realizaron en temporada lluviosa. Las muestras tomadas fueron conservadas de forma refrigerada, para realizar ensayos adicionales en los laboratorios siguiendo un protocolo para evitar contaminación de la muestra y el mantenimiento sus condiciones.

2.3 Preparación de las muestras

La determinación de los sólidos totales mediante el método SM2540B fue realizado por el laboratorio de análisis industriales y ciencias ambientales (LABAICA). Las muestras de aguas fueron enviadas a los laboratorios de la empresa ACTLABS, Ontario, Canadá, con el propósito de verificar los metales pesados. El laboratorio implemento el equipo ICP-OES (Agilent Axial 730-ES) para el conjunto de 36 elementos y al Observatorio Vulcanológico y el Sismológico de Costa Rica (OVSICORI-UNA) para la evaluación de los aniones y cationes mayoritarios (ocho elementos y un compuesto).

2.4 Validación analítica

Cabe destacar que, por parte del proyecto, no se enviaron muestras blancas ni materiales de referencia certificados para el control de calidad. Sin embargo, los análisis fueron realizados en laboratorios acreditados que cuentan con su certificación nacional. Un ejemplo de ello es el laboratorio de análisis industriales y ciencias ambientales (LABAICA) que cuenta con una acreditación formal para realizar análisis de aguas, otorgado por el Consejo Nacional de Acreditación (CNA) del Ministerio de Comercio e Industria de Panamá bajo la norma ISO/IEC 17025 [13].

Por su parte, la empresa ACTLABS (Canadá), incluyó la repetición de la muestra W-16, método blanco y estándares de referencia (IV-STOCK-1643 (ICP) Cert y (ICP) Meas), lo que certifica su competencia técnica y la validez de sus resultados, ver tabla 1. Esta empresa está acreditada por el Standars Council of Canada (SCC, Labld:266) y la Canadian Association for Laboratory Accreditation (CALA) [14].

Tabla 1. Control de calidad de la empresa ACTLABS

Elemento Unidad	Límite de Detección	IV-STOCK- 1643 (ICP) Meas	IV-STOCK- 1643 (ICP) Cert	W-16 Original	W-16 Duplicado	Blanco	Blanco
Ba ug/L	20	520	544.2	40	40	< 20	
Al mg/L	0.1	0.1	0.142	< 0.1	< 0.1	< 0.1	
K mg/L	0.1	2	2	2.3	2.2	< 0.1	< 0.1
Mg mg/L	0.1	7.6	8	1.2	1.2	< 0.1	
Mn mg/L	0	0.04	0.03901	< 0.01	< 0.01	<	
Si mg/L	0.1			35.2	35.5	< 0.1	

Elemento Unidad	Límite de Detección	IV-STOCK- 1643 (ICP) Meas	IV-STOCK- 1643 (ICP) Cert	W-16 Original	W-16 Duplicado	Blanco	Blanco
As ug/L	30	60	60.02	< 30	< 30	< 30	
Be ug/L	2	13	14.01	< 2	< 2	< 2	
Bi ug/L	20	< 20	14.01	< 20	< 20	< 20	
Ca mg/L	0.1	30.1	32	5.8	5.8	< 0.1	
Cd ug/L	2	6	7	< 2	< 2	< 2	
Ce ug/L	30			< 30	< 30	< 30	
Co ug/L	2	25	26.99	< 2	< 2	< 2	
Cr ug/L	20	< 20	20	< 20	< 20	< 20	
Fe mg/L	0	0.09	0.098	0.03	0.03	0.01	<
Cu ug/L	2	21	23.01	< 2	< 2	< 2	
Li mg/L	0.1	< 0.05	0.017	< 0.05	< 0.05	0.05	<
Mo ug/L	5	120	121	< 5	< 5	< 5	
Na mg/L	0.1	19.5	21	11.7	11.6	< 0.1	
Ni ug/L	5	57	62.02	< 5	< 5	< 5	
P mg/L	0			< 0.02	< 0.02	0.02	<
Pb ug/L	10	20	20.01	< 10	< 10	< 10	
Sb ug/L	10	60	58.01	< 10	< 10	< 10	
S mg/L	1			< 1	< 1	< 1	
Se ug/L	20	< 20	12	< 20	< 20	< 20	
Sn ug/L	10			< 10	< 10	< 10	
Sr ug/L	10	310	323.4	130	130	< 10	
Te ug/L	10	< 10	1	< 10	< 10	< 10	
Ti ug/L	10			< 10	< 10	< 10	
Tl ug/L	10	< 10	7	< 10	< 10	< 10	
U mg/L	0.1			< 0.05	< 0.05	0.05	<
V ug/L	10	30	38	< 10	< 10	< 10	
W ug/L	10			< 10	< 10	< 10	

Elemento Unidad	Límite de Detección	IV-STOCK- 1643 (ICP) Meas	IV-STOCK- 1643 (ICP) Cert	W-16 Original	W-16 Duplicado	Blanco	Blanco
ug/L							
Y ug/L	10			< 10	< 10	< 10	
Zn ug/L	5	71	79	7	6	< 5	

2.5 Análisis de resultados

Los resultados obtenidos fueron comparados con los límites máximos de metales pesados en las muestras de aguas recolectadas, con las normas panameñas para el agua potable (Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 23-395-99) [15], el agua de riego, la acuicultura y vida acuática (Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 24-99) [16]. Tras procesar los análisis fisicoquímicos y geoquímicos de las muestras de aguas tomadas en diferentes afluentes, se procedió a ejecutar un análisis cuantitativo de los resultados, en los cuales se buscó determinar la calidad del agua superficial y definir si estas son afectadas por los minerales de la Piedra Jabón de Pajonal.

3. Resultados y discusión

En el siguiente apartado se presentan los resultados de los 15 puntos de muestreo estudiados a detalle por su cercanía a los afloramientos de Piedra Jabón de Pajonal; para la información general de cada punto de muestreo referirse a la tabla 2.

Tabla 2. Información general de los puntos de muestreo

Código	Coordenadas			Tipo	Afluente
	Zona	Latitud	Longitud		
W-2	17 P	586574	952896	Superficial	Río Sofrito
W-2.1	17 P	586574	952896	Superficial	Río Sofrito
W-5	17 P	588238	951521	Subterránea	Ojo de agua (Río Los Pilares)
W-7	17 P	586506	950462	Superficial	Afluente de Quebrada Saladita
W-8	17 P	586509	950434	Superficial	Quebrada Saladita
W-8.5	17 P	586492	950400	Superficial	Quebrada Saladita
W-9	17 P	586352	950386	Superficial	Río Salado
W-9P	17 P	586352	950386	Subterránea	Río Salado
W-10	17 P	586584	950200	Superficial	Río Salado
W-11	17 P	586637	950130	Superficial	Río Salado
W-12	17 P	586774	950108	Superficial	Río Salado

Código	Coordenadas			Tipo	Afluente
	Zona	Latitud	Longitud		
W-14	17 P	586991	948998	Superficial	Río Membrillo
W-15	17 P	587104	948316	Superficial	Quebrada S/N (Chorrerita Arriba)
W-16	17 P	587183	948252	Superficial	Río Chorrera
W-17	17 P	587744	947880	Superficial	Quebrada Chocha

3.1 Características fisicoquímicas

Las propiedades obtenidas a través de métodos organolépticos (color, olor), los parámetros fisicoquímicos tomados con un multiparámetro (pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos) y las pruebas para sólidos totales realizadas en laboratorio de análisis industriales y ciencias ambientales (LABAICA), se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Características fisicoquímicas de las muestras estudiadas

Código	Parámetros							Descripción
	Métodos organolépticos		Medición mediante Multiparámetro en sitio				Pruebas de Laboratorio	
	Olor	Color	Potencial de hidrogeno (pH)	Temperatura (°C)	Conductividad eléctrica (µS/cm)	Sólidos Disueltos (mg/L)		
W-2	Inodora	Blanco	7.31	24.9	89	45	168	Río Sofrito
W-2.1	Inodora	Turbio	7.33	24.5	89	44	61	Río Sofrito
W-5	Metálico	Ocre	6.07	30.5	4000	2000	6278	Pozo de sal
W-7	Inodora	Blanco	7.18	25.9	103	50	70	Río Salado
W-8	Inodora	Blanco	7.24	25.6	80	41	3	Quebrada Saladita
W-8.5	Inodora	Blanco	7.28	25.5	85	42	67	Quebrada Saladita
W-9	Inodora	Blanco	7.07	25.9	138	69	71	Afluente de la quebrada Saladito
W-9P	Metálico	Ocre	6.35	27.4	3999	2000	6174	Pozo de sal
W-10	Inodora	Blanco	7.36	25.9	97	48	113	Río Salado

Código	Parámetros							Descripción
	Métodos organolépticos		Medición mediante Multiparámetro en sitio				Pruebas de Laboratorio	
	Olor	Color	Potencial de hidrogeno (pH)	Temperatura (°C)	Conductividad eléctrica (µS/cm)	Sólidos Disueltos (mg/L)	Sólidos totales SM2540 B (mg/L)	
W-11	Inodora	Blanco	7.5	26	87	45	82	Río Salado
W-12	Inodora	Blanco	7.38	26.4	88	44	108	Río Salado
W-14	Inodora	Traslucido	7.23	25.8	94	48	No se realizó	Río Membrillo
W-15	Inodora	Turbio	6.28	26.5	61	34	No se realizó	Quebrada sin nombre
W-16	Inodora	Traslucido	7.32	24.9	110	55	No se realizó	Río Chorrerita
W-17	Inodora	Blanco	7.23	26.8	108	54	No se realizó	Quebrada Chocha

El 13% de las muestras presentaron olor, mientras que el 87% restante son inodoras. Las muestras con olor metálico corresponden a los puntos identificados como pozos termales proveniente de aguas subterráneas y las que no presentaron olor corresponden a las aguas superficiales recolectadas en ríos y quebradas. Los análisis indican que el 60% de las muestras presentan una coloración blancuzca, el 14% turbio, el 13% translucido y el 13% ocre.

Los resultados para el Potencial de hidrogeno (pH) registran valores que oscilan entre 6.07 a 7.50, valores que están dentro del rango (6.0-9.0) establecido en la Normativa Nacional de Panamá. Los valores de pH en las muestras de aguas subterráneas son notoriamente menores que las muestras de aguas superficiales, lo que refleja la diferencia en su origen, interacción roca-agua y proceso geoquímicos dominantes.

La temperatura de los puntos de muestreo para las aguas superficiales registra valores que oscilaron entre 24.5 a 26.8 °C. Los puntos de aguas subterráneas registran valores que oscilaron 30.0 a 31.0 °C, estos valores se encontraron 5 °C por encima de las

temperaturas de los ríos de la zona, por ende, son clasificadas como hipotermas, ver figura 2.

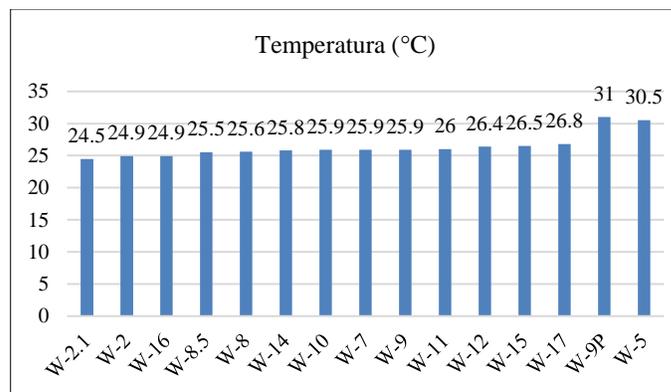


Figura 2. Resultados del análisis de temperatura por punto de muestreo.

Los resultados de los análisis para la conductividad eléctrica en los puntos de aguas superficiales varían de 61 µS/cm a 138 µS/cm, el parámetro conductividad no es regulado bajo la Normativa Nacional de Panamá, sin embargo, se relaciona directamente con la concentración de sólidos disueltos. Los resultados para la conductividad eléctrica en los pozos termales arrojaron valores superiores a 3999 µS/cm.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud no se establece un límite para sólidos disueltos en el agua. Los valores obtenidos en campo para los sólidos disueltos en los puntos de aguas superficiales varían de 34 a 69 mg/L. En contraste, las aguas subterráneas presentan valores superiores a 2000 mg/L. Al comparar estos valores con el resultado de conductividad eléctrica, se puede inferir que la mayoría de estos sólidos disueltos se consideran sólidos inorgánicos. Estos altos niveles de sólidos disueltos pueden afectar la potabilidad del agua, ya que superan los límites recomendados para consumo humano.

Los valores obtenidos para los sólidos totales en los puntos de aguas superficiales varían de 3 a 168 mg/L, mientras que los puntos de aguas subterráneas presentan concentraciones entre 6174 a 6278 mg/L.

3.2 Análisis de metales pesados

Se realizaron análisis de la concentración de metales pesados en las muestras recolectadas verificando 36 elementos, en las muestras de aguas superficiales no fue detectada una variación significativa, en cambio, para las aguas subterráneas se encontró una gran concentración de 11 elementos: Arsénico (As), Bario (B), Calcio (Ca), Potasio (K), Litio (Li), Magnesio (Mg), Manganeseo

(Mn), Sodio (Na), Azufre (S), Silicio (Si), Estroncio (Sr), ver tabla 4.

Tabla 4. Resultados de análisis ICP-OES (metales pesados)

Método ICP-OES		Muestra									
Ele m.	Unid ad-LD.	W-5	W-7	W-8	W-9	W-9P	W-10	W-11	W-14	W-15	W-16
Ag	ug/L 5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Al	mg/L 0.1	0.1	<1	<1	<1	0.3	<1	<1	<1	<1	<1
As	ug/L 30	70	<30	<30	<30	30	<30	<30	<30	<30	<30
Ba	ug/L 20	50	40	30	40	80	30	30	50	30	40
Be	ug/L 2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Bi	ug/L 20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20
Ca	ug/L 0.1	197	6.8	5.2	6.3	252	5.4	5.4	6.2	3.7	5.8
Cd	ug/L 2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Ce	ug/L 30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30
Co	ug/L 2	2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Cr	ug/L 20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20
Fe	mg/L 0.01	0.03	0.03	0.06	0.03	0.03	0.02	0.04	<0.01	0.06	0.03
K	mg/L 0.1	149	1.7	1.5	2	136	1.7	1.7	2.2	0.7	2.2
Li	mg/L 0.05	2.08	<0.05	<0.05	<0.05	1.86	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Mg	mg/L 0.1	52.9	1.2	1	1.4	67.6	1.2	1.2	1.1	0.7	1.2
Mn	mg/L 0.01	0.09	<0.01	<0.01	<0.01	0.17	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Mo	ug/L 5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Na	mg/L 0.1	2040	9.9	8.1	16.4	2080	9.2	9.4	9.8	6.7	11.7
Ni	ug/L 5	6	<5	<5	<5	6	<5	<5	<5	<5	<5
P	mg/L 0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.03	0.02	<0.02	<0.02
Pb	ug/L 10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
S	mg/L 1	78	<1	<1	<1	57	<1	<1	<1	<1	<1
Sb	ug/L 10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Se	ug/L 20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20

Método ICP-OES		Muestra									
Ele m.	Unid ad-LD.	W-5	W-7	W-8	W-9	W-9P	W-10	W-11	W-14	W-15	W-16
Si	mg/L 0.1	51.3	31.5	27	28.8	46.3	30.3	31.5	35.7	16.2	35.4
Sn	ug/L 10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Sr	ug/L 10	8460	150	110	140	6660	110	110	140	90	130
Te	ug/L 10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Ti	ug/L 10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Tl	ug/L 10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
U	mg/L 0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
V	ug/L 10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
W	ug/L 10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Y	ug/L 10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Zn	ug/L 5	7	7	6	8	13	7	5	6	6	7

Se presenta en la tabla 5, datos obtenidos por el Observatorio Sismológico de Costa Rica (OVSICORI-UNA) para la evaluación de los aniones y cationes mayoritarios, siendo la concentración más elevada en Cloro (Cl), Potasio (K), Magnesio (Mg), Calcio (Ca) y Sulfatos (SO₄) en muestras de aguas subterráneas.

Tabla 5. Resultados de análisis de aniones y cationes mayoritarios

Código	Muestra (mg/L)								
	F	Cl	Br	SO ₄	Li	Na	K	Mg	Ca
W-2	n.a.	11.67	n.a.	1.01	0.04	21.41	3.53	3.07	7.57
W-2.1	n.a.	2.09	0.03	0.33	0.09	9.74	2.02	1.73	6.50
W-4	0.04	2.54	0.02	0.16	0.02	11.40	2.42	1.41	5.00
W-5	0.01	2633.77	3.65	199.11	2.42	n.a.	158.71	67.01	24.94
W-7	n.a.	2.31	n.a.	0.22	0.10	11.14	2.39	1.42	5.94
W-8	n.a.	2.11	n.a.	0.15	0.09	10.75	2.29	1.20	5.26
W-8.5	0.02	2.00	0.03	0.09	0.02	10.32	2.21	1.26	5.65
W-9	n.a.	8.86	n.a.	0.67	0.03	17.32	2.85	1.65	5.75
W-9P	0.03	3091.13	1.83	160.76	2.13	n.a.	140.09	83.26	28.02
W-10	n.a.	2.80	n.a.	0.15	0.03	11.75	2.49	1.46	5.52
W-12	n.a.	2.37	n.a.	0.23	0.09	11.20	2.44	1.43	5.56

Código	Muestra (mg/L)								
	F	Cl	Br	SO ₄	Li	Na	K	Mg	Ca
W-14	n.a.	2.39	n.a.	0.72	0.02	11.46	2.91	1.32	5.86
W-15	0.0 2	2.58	0.0 4	0.17	0.02	9.83	1.29	0.96	4.12
W-16	n.a.	4.48	n.a.	0.33	0.02	13.13	2.98	1.37	5.13
W-17	n.a.	2.38	n.a.	0.22	0.09	12.02	4.12	1.62	6.08

3.2.1 Comparación de metales pesados y la norma de agua potable en Panamá

El 67% de los resultados obtenidos indican que la calidad del agua superficial de los afluentes analizados es apta en Panamá para el agua potable de acuerdo con la Reglamentación Técnica DGNTI-COPANIT 23-395-99 AGUA. Un 33% corresponde a las muestras que no se evaluaron, ya que el laboratorio donde se realizó el ensayo no evalúa el límite acorde a lo establecido en la normativa panameña.

El 10% restante, corresponde a las aguas subterráneas. Estas presentan una concentración alta en Arsénico (As), Sodio (Na), Aluminio (Al), Manganeseo (Mn) y Cloro (Cl), no aptos para ser ingerido por seres vivos.

3.2.2 Comparación entre los resultados de metales pesados y la norma de acuicultura y vida acuática en Panamá

El 72.5% de las muestras de la calidad del agua superficial de los afluentes analizados es apta en Panamá dentro del Reglamentación Técnica DGNTI-COPANIT 24-99 para la acuicultura y vida acuática. El 25% corresponden a las muestras que no se evaluaron, ya que el laboratorio donde se realizó el ensayo no evalúa el límite acorde a lo establecido en la normativa panameña.

Mientras que el 2.5% corresponden a las muestras de aguas subterráneas, las cuales presentan una concentración mayor de Aluminio (Al), Cloro (Cl) y Arsénico (As) no aptos para la acuicultura y vida acuática.

3.2.3 Comparación de metales pesados en las muestras recolectadas con norma del agua de riego en Panamá

El 96% de las muestras de la calidad del agua superficial de los afluentes analizados es apta en Panamá, de acuerdo con el Reglamentación Técnica DGNTI-COPANIT 24-99, para el acuicultura y vida acuática. Mientras que el 4% corresponde a la muestra recolectadas en aguas subterráneas, las cuales presentan

una alta concentración de Sodio (Na) y Arsénico (As) no apto para la agricultura.

4. Conclusiones

- Se ha determinado que los minerales solubles que componen la Piedra Jabón de Pajonal no alteran la calidad del agua superficial de los ríos. Esto se debe a que los minerales solubles que la componen como la kaolinita no se liberan en concentraciones que superen los límites establecidos por las normativas ambientales panameñas. Este hallazgo es fundamental, ya que descarta la influencia de que este material sea una fuente de contaminación en las aguas superficiales.
- Las aguas subterráneas del área de investigación están relacionadas con las aguas subterráneas del volcán el Valle, ambas se sitúan dentro de la zona de falla E-W, mismas fallas que ayudaron a la transformación de la Piedra Jabón de Pajonal. Se recomienda realizar más estudios, para determinar con exactitud si estas aguas son cloruro-sulfato-alcálinas o cloruro-alcálinas.
- Los resultados de la calidad del agua superficial indican, que los límites máximos de los metales pesados en las muestras recolectadas cumplen con las normas vigentes para el agua potable, la vida acuática, el agua de riego y para la acuicultura.
- Las aguas subterráneas analizadas no son utilizadas como agua potable, no obstante, los resultados presentan altas concentraciones de Arsénico (As), Sodio (Na), Aluminio (Al), Cloro (Cl) y Manganeseo (Mn), no aptos para ser ingerido por seres vivos; Aluminio (Al), Cloro (Cl) y Arsénico (As) no aptos para la acuicultura y vida acuática; Sodio (Na) y Arsénico (As) no aptos para la agricultura.
- Esta información fue brindada a todas las comunidades implicadas en este estudio mediante una presentación de resultados en la comunidad de Cerro Colorado. Se entregó un informe de manera física al representante presente del Ministerio de Ambiente de Coclé con toda la información obtenida.
- Es muy importante que se considere, como vital, esta información y se realicen estudios sobre la calidad del agua potable en las zonas rurales, que utilizan las aguas subterráneas como abastecimiento de agua potable. Asimismo, implementar planes de monitoreo y estrategias de remediación para garantizar la salud pública y la protección ambiental.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación bajo el proyecto “Ubicación, clasificación y elaboración del mapa geológico de un polígono ubicado en la comunidad de Membrillo, en Coclé donde se localiza el yacimiento de la “Piedra Jabón”, código APY-NI-2019B-11. A la Universidad Tecnológica de Panamá por facilitarnos el tiempo para realizar las giras de campo. A los laboratorios ACTLABS, OVSICORI-UNA y LABAICA por sus servicios. Se agradece al curso-taller IMRAD UTP 2024: Redacción de manuscritos científicos por la revisión del borrador de este artículo. Al Grupo de Investigación Propuesta de Geoparque Puente de las Américas, al Sr. Mariano Ojo, al Sr. Carlos Soto de la finca Palma Bellota, a la Sra. Auxiliadora Bustamante y a los moradores y artesanos del corregimiento de Pajonal por su colaboración.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

H.S. Investigador principal, análisis de resultados y redacción del artículo.

R.R. Apoyo en el trabajo de campo, análisis de resultados y revisión del artículo.

E.M. Apoyo en el trabajo de campo, análisis de resultados y revisión del artículo.

J.V. Apoyo en el trabajo de campo, análisis de resultados y revisión del artículo.

E.L. Revisión del artículo y traducción del resumen.

Y.S. Apoyo en el trabajo de campo y revisión del artículo.

R.M. Apoyo en el trabajo de campo y en el desarrollo y gestión de los aspectos tecnológicos del estudio.

T.M. Asesora de la investigación, apoyo en la revisión y análisis de los resultados.

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] H. Sandoval, «Elaboración del mapa geológico de un polígono establecido en los corregimientos de Pajonal y San Juan de Dios, en Coclé donde se ubica y clasifica el yacimiento de la Piedra Jabón de Pajonal y análisis preliminar de las aguas superficiales en el entorno.» 2021.
- [2] H. Sandoval, T. Destro, R. Rodríguez, E. Martínez, E. Gutiérrez y Y. Solís, «Estudio y descripción de la Piedra Jabón de Pajonal,» *8° Congreso Internacional de Ingeniería, Ciencias y Tecnología (IESTEC)*, pp. 733-739, 2022. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10040812>
- [3] World Health Organization, «Guidelines for drinking-water quality (4th ed.),» 2011. [En línea]. Available: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>
- [4] World Health Organization, «Protecting surface water for health: Identifying, assessing and managing drinking-water quality risks in surface-water catchments (Edited by J. Fewtrell & J. Bartram). WHO Press.,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241510554>
- [5] World Health Organization, «Total dissolved solids in drinking-water: Background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality. WHO Press.,» 2003. [En línea]. Available: https://www.who.int/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/total-dissolved-solids-background-document.pdf?sfvrsn=3e6d651e_4.
- [6] IRHE-810-0LADE, «Informe final del estudio de reconocimiento de los recursos geotérmicos de la República de Panamá,» julio 1987. [En línea]. Available: <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0168.pdf>.
- [7] E. Martínez y R. Rodríguez, «Diseño de un modelo para crear un geoparque en el Valle de Antón,» 2017.
- [8] Swedidh Geological International, «Informe Final Parte I Geología y ocurrencias de minerales en tres sectores de Panamá,» 1990. [En línea]. Available: <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0168.pdf>.
- [9] Autoridad Nacional del Ambiente, «Atlas Ambiental de la República de Panamá,» 2010. [En línea]. Available: <https://aquadocs.org/handle/1834/7995>
- [10] Empresa de Transmisión Eléctrica, S.A - ETESA, «Lista de estaciones hidrológicas,» [En línea]. Available: <https://www.hidromet.com.pa/es/estaciones-hidrologicas/p3>
- [11] Gerencia de Medio Ambiente IRHE, «Mapa Hidrogeológico de Panamá,» ETESA, Julio 1998. [En línea]. Available: https://skat.ihmc.us/rid=1NDQGJ59S-NRFG2C-2LK6/Mapa_Hidrogeologico.pdf
- [12] Gerencia de Medio Ambiente IRHE, «Nota explicativa del mapa Hidrogeológico de Panamá,» ETESA, Julio 1998. [En línea]. Available:

- https://www.imhpa.gob.pa/uploads/documentos/Nota_Explicativa_Hidrogeologico.pdf
- [13] Consejo Nacional de Acreditación, «Resolución N.º 02 que mantiene la acreditación del Laboratorio de Aguas, Biodiversidad y Cambio Climático de la Universidad de Panamá (LABAICA). vLex.» 2021. [En línea]. Available: <https://vlex.com.pa/vid/resolucion-n-02-mantiene-857267025>.
- [14] Activation Laboratories Ltd. (s.f.), «Accreditations and certifications. Actlabs.» 2023. [En línea]. Available: <https://actlabs.com/our-advantage/quality/accreditation>
- [15] Ministerio de Comercio e Industria, «Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 23-395-99AGUA-Resolución N°597,» 12 noviembre 1999. [En línea]. Available: https://www.asep.gob.pa/wp-content/uploads/agua/legislacion/dgnti_23-395.pdf.
- [16] Ministerio de Comercio e Industria, «Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 24-99 (Agua. Calidad de agua. Reutilización de aguas residuales tratadas),» 2 febrero 2000. [En línea]. Available: <https://mici.gob.pa/wp-content/uploads/2021/12/24rt-dgnti-copanit-24-1999-1.pdf>.
- [17] A. Caballero, «Exploración de aguas subterráneas en el Arco Seco de Panamá mediante métodos geofísicos,» 19 enero 2010. [En línea]. Available: <https://www.tdx.cat/handle/10803/288042#page=1>
- [18] D. Buchs, D. Irving, H. Coombs, *et al* «Contribución volcánica al surgimiento de Panamá Central en el Mioceno temprano,» vol. 9, n° 1417, 2019. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37790-2>
- [19] P. S. Serrano, «Modelo hidrológico de la cuenca del Río Zaratí,» 2010. [En línea]. Available: http://www.biblioteca.unlpam.edu.ar/rdata/tespo/r_salmod000.pdf
- [20] C. Canet, A. Rodríguez, I. Bernal, T. Pi, M. Sánchez, F. Núñez, R. Villanueva, G. Molina, M. Reich, B. Peláez, E. Jiménez, E. González, F. Sandoval Medina y C. Carrillo, «Consideraciones sobre el sistema geotérmico de San Bartolomé de los Baños, Guanajuato (México), desde un análisis de la alteración hidrotermal y las inclusiones fluidas,» *Geofísica internacional*, vol. 58, 1 julio 2019.
- [21] W. Carrasco, «Tesis: Manejo y protección de zonas de recarga hídrica y fuentes de agua para consumo humano en la subcuenca del río Zaratí, Panamá,» 2011. [En línea]. Available: <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/2932>
- [22] Dirección General de Recursos Minerales, «Estudio de las arenas continentales - Tobas incoherentes del complejo volcánico del Valle de Antón,» Panamá, 1996.
- [23] Dirección General de Recurso Minerales, «Mapa geológico de Panamá 1:250,000,» 1990. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/322506802/0-1-Mapa-Geologico-de-Panama>
- [24] W. Montero, «Neotectónica de la región central de Costa Rica: Frontera oeste de la microplaca de Panamá,» 2001. [En línea]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6274239>
- [25] A. Coates, L. Smith, M. Pierre, W. Berggren «La geología del Darién, Panamá, y la colisión entre el Mioceno tardío y el Plioceno del arco de Panamá con el noroeste de América del Sur,» noviembre 2004. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/249526960_The_Geology_of_the_Darien_Panama_and_the_late_Miocene-Pliocene_collision_of_the_Panama_arc_with_northwestern_South_America
- [26] Z. Kurt, J. Coatney, T. Silvera «Calidad del agua y posibles tecnologías de tratamiento en las áreas urbanas de Colón, Panamá: Agua Colón. Acta de Artículos, 108. XVIII Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología (APANAC 2021), Panamá,» 2021. [En línea]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/478229951.pdf#page=108>
- [27] M. Bonilla, «Caracterización geotérmica y consideraciones ambientales de los baños termales de San Vicente, provincia del Guayas,» 2003. [En línea]. Available: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/32463?locale=es>
- [28] F. Barat, B. Mercier, M. Sosson, C. Müller, P. Baumgartner, C. Baumgartner. «Transición de la subducción de la placa de Farallón a la colisión entre América del Sur y Central: evolución geológica del istmo de Panamá,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004019511400136X?via%3Dihub>
- [29] A. Domínguez, F. Segundo, J. Arrocha, L. Miranda, T. Chong, H. Sandoval, E. Martínez, E. Gutiérrez, R. Rodríguez, C. Nieto, et al. «Perspectivas geoquímicas sobre los riesgos para la salud derivados de elementos potencialmente tóxicos en los acueductos rurales de Coclé, Panamá: Revelando vínculos con la geología local,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-4441/17/1/110>
- [30] A. González, J. Fábrega, E. Adar, B. Atencio, «Aplicación de isótopos ambientales para determinar zonas de recarga en el

complejo sistema acuífero de la subcuenca del río Zarafí.
apanac, pp. 190-195,» 2023. [En línea]. Available:
[https://revistas.utp.ac.pa/index.php/apanac/article/view/3934/
4450](https://revistas.utp.ac.pa/index.php/apanac/article/view/3934/4450)