



Características fisicoquímicas de las aguas termales de Phutina, Puno, Perú

Katia Pérez Argollo,¹ Heber Nehemias Chui Betancur,^{2,3,*}
Wido Willam Condori Castillo,² Edgar Octavio Roque Huanca,² Percy Samuel Yabar
Miranda,² Esther Lidia Jinéz García,² and Benito Pepe Calsina Calsina³

¹Universidad Nacional Hermilio Valdizan, Av. Universitaria N° 601-607, Pillco Marca 10003; ²Instituto de Investigación de Ciencias Naturales, Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Av. Floral N° 1153, Puno, Perú;

³Universidad Privada San Carlos, Jr. Conde de Lemos 128, Puno 21001

Keys: *Thermal water, Cretaceous, hydrogeochemistry, sandstone rocks, thermo-medicinal;* **Claves:** *Agua termal, cretácico, hidrogeoquímica, rocas areniscas, termomedicinal*

ABSTRACT

Physicochemical characteristics of the Phutina hot springs, Puno, Peru. The hot springs of southwestern Peru are found in carbonate rock aquifers with medical applications. The purpose of this research was to characterize the hot springs of Phutina, Puno, Peru. Water samples were collected from Phutina geothermal wells with major ions such as Na⁺, Ca²⁺, Cl⁻ in addition to HCO₃⁻, CO₃²⁻ in San Antonio de Putina district in Puno, Peru. Piper diagrams of the chemical types of the Phutina hot spring water samples were used with Na⁺, K⁺ (75%) and Cl⁻ (60%), characteristic of hot spring waters, which are generally salubrious. The electrical conductivity (EC) values of Phutina hot springs were 3160 – 3184 μS/cm respectively. The hot springs have a high electrical conductivity which shows that it has interacted with the rock for a long time. The stratigraphic and structural framework of the Phutina hot springs is formed by a thick sequence of Cretaceous rocks.

RESUMEN

Las aguas termales del suroeste de Perú se encuentran en acuíferos de roca carbonatada con aplicaciones médicas. El propósito de esta investigación fue caracterizar las aguas termales de Phutina, Puno, Perú. Se recolectaron muestras de agua de los pozos geotérmicos de Phutina con iones principales como Na⁺, Ca²⁺, Cl⁻ además de HCO₃⁻, CO₃²⁻ en el distrito de San Antonio de Putina en Puno, Perú. Se emplearon los diagramas de Piper de los tipos químicos de las muestras de aguas termales de Phutina con Na⁺, K⁺ (75%) y Cl⁻ (60%), característicos de las aguas termales, que son generalmente salobres. Los valores de conductividad eléctrica (CE) de las aguas termales de Phutina fueron 3160 – 3184 μS/cm respectivamente. Las aguas termales tienen una alta conductividad eléctrica lo que demuestra que ha interactuado con la roca durante mucho tiempo. El marco estratigráfico y estructural de las aguas termales de Phutina está formado por una gruesa secuencia de rocas cretácicas.

Revista Boliviana de Química, 2024, 41, 1-5
ISSN 0250-5460, Rev. Bol. Quim. Paper edition
ISSN 2078-3949, Rev. boliv. quim. e-edition, Jan-Apr
30 Abril 2024, <https://doi.org/10.34098/2078-3949.41.1.1>

© 2024 Universidad Mayor de San Andrés,
Facultad de Ciencias Puras y Naturales,
Carrera Ciencias Químicas, Instituto de Investigaciones Químicas
Open Access: <http://bolivianchemistryjournal.org>

¹ Recibido el 16 de agosto 2023. Aceptado el 24 de marzo 2024. Publicado el 30 de abril de 2024

*Mail to: heberchui@gmail.com

INTRODUCCIÓN

La energía geotérmica es un tipo de energía limpia caracterizada por la amplia distribución continental, bajos niveles de contaminantes y utilidad directa. El desarrollo de la energía geotérmica se inició rápidamente a partir de la década de los setenta^{1 2}, en respuesta a los graves problemas como la expansión demográfica, la contaminación ambiental y la escasez de energía. La energía geotérmica es una fuente de energía alternativa con mayor atención² por ejemplo en China, donde existen 4000 aguas termales con temperaturas superiores a los 25 °C³. Los recursos geotérmicos derivados equivalen a 2,5 x 10²² J, y la cantidad de energía geotérmica aprovechable es de aproximadamente 7,5 x 10²¹ J⁴. la energía geotérmica que se explota en China es de 1,8 x 10¹⁹J, lo que equivale a una reducción de 1,4 x 10⁸ t de emisión de CO₂⁵.

Las aguas termales son parte de la energía geotérmica que se observa en todos los continentes^{6 7 8}. La exploración de los recursos hídricos termales con aplicaciones medicinales se ha incrementado desde el siglo XIX^{9 10}, sin embargo la investigación biológica en aguas termales, se inició en los años 50¹¹. La comunidad microbiana presente en las aguas termales son bacterias y arqueas de naturaleza termófila e hipertermófila^{12 13 14 15 16}.

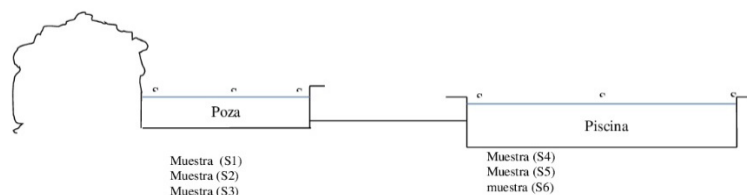
Las aguas termales tienen características particulares que dependen de la composición de las rocas internas y superficiales, y de las reacciones químicas que pueden ocurrir¹⁴, por lo tanto, las aguas termales contienen minerales como: Ca, Na, Mg, Cl⁻, SO₄²⁻ y SiO₄⁴⁻, que generalmente están presentes en aguas geotérmicas con aplicaciones médicas¹⁶. Además, las aguas termales también contienen Rn²²² y Ra²²⁶ en concentraciones de 0,48 -1,54 Bq/L¹⁷.

Las aguas termales alrededor del mundo han sido debidamente estudiadas e identificadas. En Chongqing, sureste de China se ubican acuíferos de rocas carbonatadas en cuyas aguas termales predominan los elementos químicos como Ca, Mg, SO₄ y Ca, SO₄²⁻ con altas concentraciones de Ca²⁺ y SO₄²⁻ se derivan de la disolución de rocas carbonatadas³. En Chagal, norte de Irán, las fuentes termales son del tipo Na, Cl y CaSO₄, caracterizadas por las rocas calizas y carbonatadas de Asmari^{18 19}, la alta concentración de Na, Ca y Mg en las fuentes termales es causada por las interacciones agua-roca y el intercambio de cationes en las rocas carbonatadas¹⁸, mientras que la hidrogeoquímica de las aguas termales de Birdsville, ubicadas en el noreste de Australia, tiene una composición de tipo Na-HCO₃-Cl²⁰. Las aguas termales de Pamukkale en Turquía se pueden dividir en dos grupos: grupo 1A: Ca-HCO₃ y grupo 1B: Ca-SO₄, las concentraciones de estos elementos se deben a la interacción agua-rocas metamórficas basales²¹. El efecto positivo sobre la salud física y mental del uso de aguas termales han confirmado el alivio del dolor físico^{22 23}, también los efectos relajantes y sedantes^{13 24} y el alivio de la artritis reumatoide²⁵. En este estudio se caracterizó las aguas termales de “putina” en 6 muestras ubicadas en el distrito de Putina de Puno, Perú.

EXPERIMENTAL

Área de estudio

Las aguas termales de “Phutina” se encuentran ubicadas al este del distrito de Putina de la provincia “San Antonio de Putina” en el departamento de Puno, Perú, con las coordenadas geográficas: - 4.912995, - 69.866926, la altitud promedio de 3878 msnm, la humedad relativa del 79%. Las aguas termales de “Phutina” son un reservorio geotermal con aplicaciones medicinales a las que se le atribuye la cura del reumatismo y la artritis, también aplicaciones de uso recreativo, como otras^{23 24 25 26 27}. El marco estratigráfico y estructural de las aguas termales “Phutina” está formado por una gruesa secuencia de rocas cretácicas, en el lugar se observa la sinterización de carbonatos²⁶. Se recogieron seis muestras de la piscina y poza:



Toma de muestras

Se recolectaron seis muestras del agua termal de San Antonio de Putina, Perú (Fig. 1) las muestras fueron recolectadas durante estación seca el 20 de octubre de 2018, las muestras se recolectaron en botellas de polietileno. Las concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y SO_4^{2-} se midieron mediante el método de titulación con EDTA. Las concentraciones de K, y Na se determinaron mediante espectrofotometría de absorción atómica de llama con una precisión de 0.1 mg/L en el laboratorio de control de calidad de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno y Laboratorios Analíticos del Sur certificados según normas internacionales tales como como OSHAS 18000, SA 8000, ISO 14000 e ISO/IEC 17025 por el instituto nacional de calidad-INACAL. Para determinar los aniones se utilizaron: ICP-OES (plasma acoplado inductivamente - espectrometría de emisión óptica) es una técnica en la que la composición de elementos en muestras (principalmente disueltas en agua) se puede determinar utilizando plasma.

Análisis

Se utilizaron gráficos de Piper^{28 29} de los principales cationes y aniones (Fig. 1) para mapear las facies hidrogeoquímicas de las muestras de agua termal de Phutina y para demostrar diferentes tipos hidroquímicos de agua³⁰.

Tabla 1. Parámetros físico-químicos de las muestras de agua termal de Putina. La temperatura del agua (T) en °C, la concentración de cationes y aniones en mg/L.

Sample	T	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	HCO_3^-	CO_3^{2-}	SO_4^{2-}	Cl ⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	% salinity
S1	36,8	2160,00	7,21	925,52	1144,29	865,00	3798,82	1945,31	404,64	97,44	73,45	19,80
S2	36,9	2162,00	7,22	921,23	1143,92	864,08	3791,59	1949,42	405,10	97,31	73,49	19,81
S3	36,3	2161,00	7,25	932,20	1143,90	865,07	3796,00	1947,12	404,51	97,50	73,48	19,80
S4	33,8	3140,00	6,77	946,68	1132,95	905,00	3438,93	1875,92	416,00	92,53	72,48	19,60
S5	32,5	3141,00	6,78	952,20	1133,45	904,54	3436,53	1879,96	416,84	92,61	72,34	19,61
S6	32,4	3142,00	6,76	949,40	1132,82	906,79	3439,65	1881,98	416,98	92,57	72,33	19,61

Los índices físicos y químicos de las seis muestras: S1, S2, S3, S4, S5 y S6 (Fig. 1) de las aguas termales “Phutina” ubicadas en el distrito de “San Antonio de Putina”, Perú, se presentan en tabla 1, según las dos áreas de estudio. Los principales cationes y aniones presentes en las aguas termales de Phutina son: K^+ Mg^{2+} Ca^{2+} Na^+ , y HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} respectivamente, según zonas de estudio (Tabla1), los principales cationes son el Na^+ y Ca^{2+} son 1152.58 – 1223.71 mg/L y 257.76 – 278.15 mg/L respectivamente y los principales aniones presentes en las muestras de agua “Phutina” son : Cl^- y SO_4^{2-} con valores mínimos y máximos 2491.28 - 2520.08 mg/L y 751.54- 792.13 mg/L respectivamente. El rango de pH de 6.01 a 7.02 indica basicidad débil. La alta concentración de SO_4^{2-} y los iones Ca^{2+} es característico de las aguas termales generalmente salobres³¹.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Las aguas termales tienen una composición inicial debida a la acción de procesos físico-químicos que ocurren entre el agua y las rocas la alta concentración de SO_4^{2-} está asociada a acuíferos carbonatados^{32 33 34 35} los iones principales de las aguas termales de Phutina son SO_4^{2-} y Ca^{2+} . La concentración de SO_4^{2-} está asociada a aguas termales de origen volcánico, cuyo proceso químico viene dado por: $\text{H}_2\text{S} + 2\text{O}_2 + 2\text{CaCO}_3 = 2\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{HCO}_3^-$ ³⁶. En las aguas termales de Putina el coeficiente de correlación de la concentración de SO_4^{2-} y la concentración de Ca^{2+} es de 0,98. SO_4^{2-} y Ca^{2+} se derivan de la disolución de evaporados como yeso y anhidrita, mientras que en las aguas termales de Phutina el coeficiente de correlación entre SO_4^{2-} y Ca^{2+} es - 0,78, lo que significa que SO_4^{2-} y Los iones Ca^{2+} no se derivan de la disolución de evaporados como el yeso y la anhidrita^{33 37 38 39}. En las aguas termales de Putina el coeficiente de correlación positivo entre Na^+ y Cl^- es de 0,98 mientras que en las aguas termales de Phutina el coeficiente de correlación entre Na^+ y Cl^- es de 0,96 lo que implica la disolución de sales presentes en las rocas^{19 26 37}.

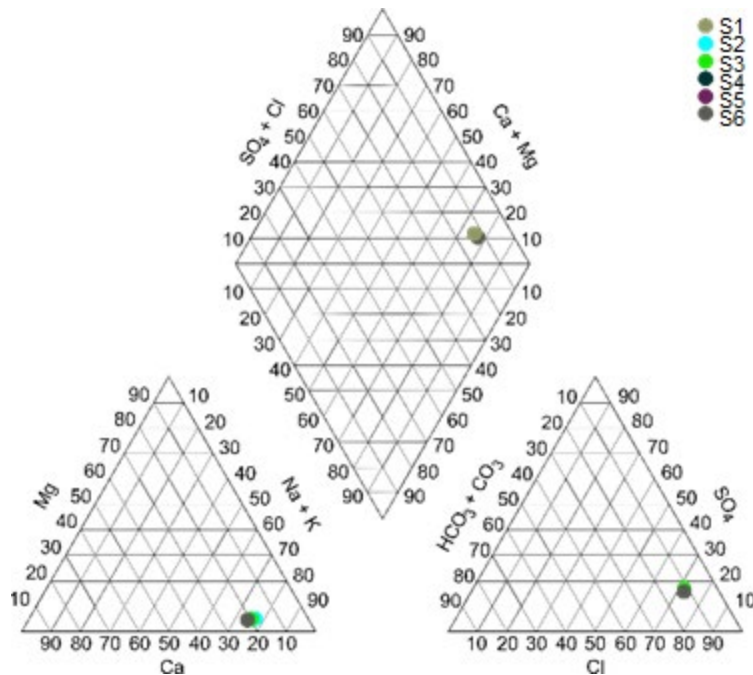


Fig. 1. Piper plot of the Phutina thermal water samples, All the samples are of the Na, K–Cl type.

La concentración de Mg^{2+} en las aguas termales de Phutina es similar a la de Obuki Spring³⁸, y al agua termal Karstic en Chongqing³⁹. En el agua termal de Putina el coeficiente de correlación de las concentraciones de Mg^{2+} y las concentraciones de HCO_3^- es de -0,94 mientras que en las aguas termales de Phutina el coeficiente de correlación entre Mg^{2+} y HCO_3^- es de -0,48 lo que implica que la concentración de Mg^{2+} no se deriva de Dolomita, esto sugiere que la concentración de Mg^{2+} se deriva de rocas que contienen sulfato de magnesio³². La baja concentración del anión HCO_3^- en las aguas termales de Phutina (Tabla 1), sugiere que la producción de Ca^{2+} se forma a través de la disolución de yeso y anhidrita^{32 40}. Las aguas termales de Phutina se ubican en un grupo en los diagramas de Schoeller²⁹. Las aguas termales presentan una concentración importante de Na, Cl y CO_3 (meq/L), característica de aguas termales generalmente salobres^{26 41 42 43}.

CONCLUSIÓN

Las manantiales de aguas termales de Phutina en Puno, distrito de San Antonio, suroeste de Perú, están formados por rocas de arenisca roja y conglomerados y una secuencia gruesa de rocas del Cretácico - de carbonato²⁶. Los iones principales son Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- y CO_3^{2-} . Según los diagramas de Piper²⁸, los tipos químicos de las muestras de aguas termales de Phutina son Na^+ y K^+ (76%) y Cl^- (72%), éstos son característicos de las aguas termales generalmente salobres. Los valores de conductividad eléctrica (EC) del agua termal de Phutina son 3160 – 3184 $\mu S/cm$, las aguas termales tienen alta conductividad eléctrica demostrando así la interacción con la roca huésped por mucho tiempo³³.

RECONOCIMIENTOS

Los autores deseamos reconocer a los laboratorios de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

REFERENCIAS

- 1 J. W. Lund, D. H. Freeston, and T. L. Boyd, *Geothermics*, 2011, **40**, 159.
- 2 L.A. Peñuela and J. J. Carrillo, *Investigaciones Geográficas*. 2013, **81**, 18.



- ³ P. Yang, Q. Cheng, S. Xie, J. Wang, L., and Chang, Q. Yu, *China. J Hydrol* 2017, **03**, 54.
- ⁴ X. Zhao and G. Wan, *Enew Sustain Energy Rev*, 2014, **32**, 651.
- ⁵ Y. Kong, Z. Pang, H. Shao, S. Hu, and O. Kolditz. *Recent studies Geotherm Energy*. 2014, **2**, 1.
- ⁶ Y. Horikiri, M. Shimodouzono, X. J. Wong, K. Sudou, K. Hayashi, and N. Tanaka, *Jpn Assoc Phys Med Balneol Climatol*. 2000, **63**, 181.
- ⁷ E. Lopes, *Cuadernos de Turismo*, 2005, **16**, 10.
- ⁸ G. J. Arévalo, H. R. Guerrero, *Economía y Sociedad*, 2014, **18**, 121.
- ⁹ R. O. Fournier and A. H., Truesdell. *Geochim Cosmochim Acta*. 1973, **37**, 1255.
- ¹⁰ J. Gómez and F. J. Delgado, *Investigación y ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 2017, **25**, 93.
- ¹¹ C. L. Marsh and D. H. Larsen, *J Bacteriol*, 1953, **65**, 193.
- ¹² O. López, K. Knapik, M. E. Cerdán, and M. I. González, *Front Microbiol*, 2015, **6**, 1.
- ¹³ I. N. Najjar, M. T. Sherpa, S. Das, and S. Das, *Science of the Total Environment*, 2018, **637**, 730.
- ¹⁴ H. P. Heasler, C. Jaworowski, and D. Foley, *The Geological Society of America*, 2009, **273**, 1.
- ¹⁵ M. H. S. Zangana, *Water SA*, 2015, **26**, 200.
- ¹⁶ A. Rezaei, M. Rezaeian, and S. Porkhial, *NW Iran. Geothermics*, 2019, **78**, 9.
- ¹⁷ R. Rodríguez, R. Olmos, and J. Payes, *El Salvador. Revista Geológica de América Central*, 2014, **50**, 71.
- ¹⁸ Z. Mohammadi, R. Bagheri, and R. Jahanshahi, *Geothermics*, 2010, **39**, 242.
- ¹⁹ Y. Rafighdoust, Y. Eckstein, R. M. Harami, M. H. M. Gharaie, E. M. Griffith, and A. Mahboubi, *Geothermics*, 2015, **55**, 24.
- ²⁰ M. C. Pirlo, *Geothermics*, 2004, **33**, 743.
- ²¹ H. Alçiçek, A. Bülbül, İ. Yavuzer, and M. Cihat Alçiçek, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2018, **76**, 1
- ²² A. P. Verhagen, S. M. Bierma, M. Boers, J. Cardoso, J. Lambeck, and R. A. de Bie, *Database Syst Rev*. 2007, **4**, 64.
- ²³ <https://doi.org/10.1002/14651858.CD006864>. Access date: junio 2023
- ²⁴ R. M. Maxe, *Revista de Investigación y Cultura*, 2015, **4**, 38.
- ²⁵ A. P. Verhagen, S. M. Bierma, M. Boers, J. R. Cardoso, J. Lambeck, R. A. de Bie, and Henrica C.W. de Vet *Cochrane Database Syst*. 2015, **4**, CD000518.
- ²⁶ A. Huamaní and G. Valenzuela, *Revista de Investigación y Cultura*, 2003, **156**, 1.
- ²⁷ C. Quintana, *Revista Brasileira de Pesquisa em Turismo*, 2011, **5**, 248.
- ²⁸ A. M. Piper, *Trans Am Geophys Union*, 1944, **25**, 914.
- ²⁹ H. Schoeller, *Methods and techniques of groundwater investigations and development*, 1965, **54**, 83.
- ³⁰ R.E. Hunt, New York, *United States of America: Taylor and Francis Group*, 2006, **47**, 1.
- ³¹ J. Benitez, M. Monstue, and M. Lopez, *Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente*, 2015, **27**, 94.
- ³² N. Goldscheider, J. Mádl-Szönyi, A. Eröss, and E. Schill, *Hydrogeol*, 2010, **18**, 1303.
- ³³ S. E. Grasby, I. Hutcheon, and H. R. Krouse, *Appl Geochem*, 2000, **15**, 439.
- ³⁴ J. Gunn, S. H. Bottrell, and D. J. Lowe, *Worthington SRH, Hydrogeol J*, 2006, **14**, 868.
- ³⁵ L. Peiffer, C. Wanner, N. Spycher, E. L. Sonnenthal, and B. M. Kennedy *Geothermics*, 2014, **51**, 154.
- ³⁶ A. N. Palmer, *Geol Soc Am Bull*, 1991, **103**, 21.
- ³⁷ W. F. Giggenbach, *Geochim Cosmochim Acta*, 1988, **52**, 749.
- ³⁸ Y. Yoshiike, *Geochem J*, 2003, **37**, 649.
- ³⁹ P. Yang, D. Yuan, X. Ye, S. Xie, X. Chen, and Z. Liu, *Chin Sci Bull*, 2013, **58**, 2488.
- ⁴⁰ J. L. Bischoff, R. Juliá, W. C. Shanks III, R. J. Rosenbauer, *Geol*, 1994, **22**, 995.
- ⁴¹ A. Apaydin, *Environ Earth Sci*, 2016, **75**, 1.
- ⁴² A. Baba and C. Ertekin, *Securing Groundwater Quality in Urban and Industrial Environments*, 2007, **7**, 1.
- ⁴³ H. Chenaker, B. Houha, and V. Vincent, *Geothermics*, 2018, **75**, 137.