

ESTUDIO GEOQUÍMICO DE LAS FUENTES DE AGUAS TERMALES ALREDEDOR DEL VOLCÁN MISTI, AREQUIPA, PERÚ

Pablo Masías & Vicentina Cruz

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico INGEMMET, Av. Canadá 1470 San Borja Lima 41
pmasias@ingemmet.gob.pe

INTRODUCCIÓN

El volcán Misti está ubicado en la zona volcánica de los Andes Centrales a sólo 18 km al Noreste del centro de la ciudad de Arequipa que cuenta con alrededor un millón de habitantes, siendo la segunda ciudad más importante del Perú (Fig. 1). El Misti está constituido por dos edificios volcánicos: un estrato volcán "antiguo" erosionado al Oeste, llamado Misti 1, datado en < 833 Ka; y un estrato-cono "moderno" al Este y Sureste, que se eleva hasta los 5800 msnm, emplazado los últimos 112 Ka (Thouret et al., 2001). Este último estrato-cono se formó durante las etapas Misti 2, Misti 3 y Misti 4. Ambos edificios volcánicos se han emplazado al menos sobre cinco ignimbritas riolíticas soldadas y no soldadas que reciben el nombre de "sillares", los cuales son observados en el cañón del río Chili, con más de 300 m de espesor y fueron emplazados entre 13,2 y 1,7 Ma (Paquereau-Lebti et al., 2006). En los últimos 20 Ka, el volcán Misti presentó intensa actividad eruptiva, como la ocurrida hace ~14000 años (Cacya, 2006) o la de hace ~2,000 años (Thouret et al., 2001).

En la actualidad la actividad del Misti se evidencia por la emisión de gases fumarólicos en la cumbre del volcán, proveniente del domo de lava localizado en el fondo del cráter, así como, por la presencia de aguas termales alrededor del volcán, que indicaría la presencia de un importantes sistema hidrotermal (Fig. 1, 2).

La mayoría de las fuentes termales y frías, posiblemente asociadas al sistema hidrotermal del volcán Misti, se encuentran en un radio de 20 a 30 km, principalmente hacía el lado sur del volcán. Estas fuentes presentan temperaturas menores a 40°C. Existe sólo una fuente termal, próxima al volcán denominada Charcani V (CHV), localizada a 6 km del cráter del Misti (Fig. 1). Esta fuente es monitoreada desde el año de 1999, inicialmente por el Instituto Geofísico del Perú y desde el 2005 hasta la actualidad por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (Cruz et al., 2004).

Durante el periodo de monitoreo en la fuente Charcani V, a mediados del 2001 se observó que los iones cloruros (Cl^-) y sulfatos (SO_4^{2-}), así como, la temperatura y pH, han sufrido pulsaciones. También, en la parte de la cumbre del volcán se notó variaciones importantes: 1) Un aumento de la intensidad fumarólica del domo de lava, 2) Un aumento de la temperatura en el domo de lava, que aumentó de 221°C (1 de diciembre de 1997) hasta un máximo de 430°C (11 de septiembre de 2001) (Cruz et al., 2007a).

Las variaciones fisico-químicas observadas a mediados del 2001, coinciden con el terremoto (8.2 Mw) del 23 de junio, en el sur del Perú de (Cruz et al., 2007a). Nuevamente, el 15 de Agosto del 2007 ocurrió un terremoto de 8.0 Mw, en el sur del Perú, cerca a la ciudad de Pisco, durante el cual se registro una importante variación de temperatura de la fuente termal de Charcani V, pero en este caso, registrándose, primero, un descenso de 33.57 a 29.46°C y luego un incremento hasta 36.48°C, por un lapso de 4 días (Cruz et al., 2007b).

Los estudios geoquímicos de las fuentes termales localizadas alrededor de un volcán activo como el Misti, ayuda a conocer mejor el comportamiento a nivel profundo del volcán, la cual contribuye en prevenir desastres por erupciones volcánicas sobre zonas pobladas. Además dado el comportamiento de los materiales y la configuración estructural de un volcán existe una relación entre los cambios de los parámetros fisicoquímicos y los efectos sísmicos, y evidentemente con los efectos volcánicos. Este estudio, tiene en consecuencia, como objetivos principales 1) Realizar la caracterización geoquímica de las fuentes termales y frías, 2) Ampliar los puntos de monitoreo de fuentes de agua, posiblemente asociadas al sistema hidrotermal del volcán.

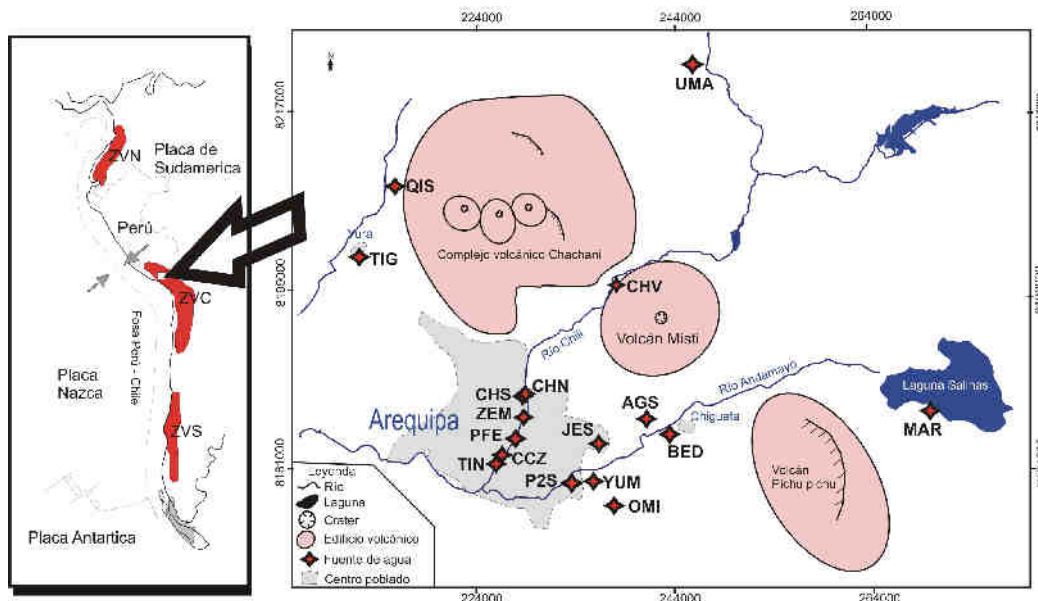


Fig. 1.- A la izquierda la ubicación del volcán Misti en la ZVC, y la derecha localización de las fuentes las fuentes de agua que brotan alrededor del volcán Misti.



Fig. 2. Vista tomada desde el SE. Se observa los dos cráteres (interior y exterior) del volcán Misti. La flecha en color rojo señala la localización de las fumarolas exteriores al cráter, que tienen temperaturas de hasta 79 °C en el flanco superior ENE del Misti. (Foto extraída del libro “The Active Volcanoes of Perú”, F. Legros, 1998).

METODOLOGÍA

En febrero del 2006 se realizó el muestreo de 17 fuentes de aguas termales y frías alrededor del volcán Misti, en un radio de ~30 km (Fig. 1). Estas fuentes fueron cartografiadas como: Humaluso (UMA), Charcani V (CHV), Chilina Norte (CHN), Chilina Sur (CHS), Zemanat (ZEM), Agua Salada (AGS), Jesús (JES), La Bedoya (BED), Puente de Fierro (PFE), Calle Cuzco (CCZ), Tingo (TIN), Sabandia (P2S), Yumina (YUM), Ojo del Milagro (OMI), incluyendo las fuentes Quiscos (QIS) y el Tigre (TIG) localizadas al lado NO del volcán Chachani. Asimismo se muestreo la fuente Mariposa (MAR) localizado a 28 km al Este-Sureste del Misti, posiblemente asociada al volcán Ubinas. También, entre febrero del 2006 y septiembre del 2007 se midieron la temperatura, pH, conductividad eléctrica y los sólidos totales disueltos (TDS).

El muestreo de aguas se realizó por inmersión simple, con botellas de plástico apropiadas. Se colectaron 2 muestras, la primera filtrada para el análisis de cationes, la cual se adicionó ácido nítrico (HNO_3) como conservante, la segunda también filtrada, sin la adición de ácido, para la determinación de aniones. Posteriormente las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Química del INGEMMET por métodos de Absorción Atómica (AA), espectrometría UV, volumetría y gravimetría.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en febrero del 2006 muestran que las aguas termales y frías presentaron temperaturas por debajo de 40 °C y pH entre 6 y 7 (Tabla 1), con excepción de la fuente termal de Jesús (JES) que presentó un pH ácido de 5.7 (Tabla 1). Por otro lado, los resultados de la composición química de las aguas muestreadas desde las fuentes termales y frías alrededor del volcán Misti se presentan en la Tabla 2. Las 16 fuentes termales (UMA, CHV, CHN, CHS, ZEM, AGS, JES, BED, PFE, CCZ, TIN, P2S, YUM, OMI, QIS, TIG,) han mostrado como cationes dominantes los iones calcio (Ca^{2+}) y sodio(Na^+), con concentraciones que varían entre 35 mg/l a 146 mg/l y de 37 mg/l a 404 mg/l, respectivamente.

También se han observado, como aniones predominantes, a los iones bicarbonatos (HCO_3^{2-}), cloruros (Cl^-) y sulfatos (SO_4^{2-}) cuyos rangos de concentración fueron entre 32.1 mg/l y 5656mg/l, 19.5 mg/l y 743.9mg/l, 1.2 mg/l y 152 mg/l, respectivamente. Algunos componentes no están presentes en la listado de la tabla 2 debido a que sus concentraciones fueron muy bajas. Tal es el caso de los iones Cu, Pb, Cd, Hg y Cr. En el caso de la fuente MAR, presenta como catión dominante el sodio (Na^+) (Tabla 2).

Por otro lado, las fuentes CHN, CHS, ZEM, PFE, CCZ, TIN, presentan una mayor concentración de iones nitratos, posiblemente asociados al exceso de fertilizantes utilizados en los terrenos de cultivos localizados en áreas circundantes a las fuentes de aguas, produciendo la contaminación de estas.

		<i>Fecha</i>	<i>Temperatura</i>	<i>pH</i>
			°C	
1	CHV	Feb-06	36.1	6.27
2	CHS	Feb-06	18.0	6.59
3	CHN	Feb-06	16.0	6.65
4	ZEM	Feb-06	19.3	6.60
5	CCZ	Feb-06	18.1	6.68
6	PFE	Feb-06	17.4	6.34
7	TIN	Feb-06	20.1	6.43
8	OMI	Feb-06	17.3	6.60
9	YUM	Feb-06	16.1	6.37
10	P2S	Feb-06	17.3	6.60
11	BED	Feb-06	14.0	6.50
12	AGS	Feb-06	18.5	6.30
13	JES	Feb-06	22.8	5.71
14	QIS	Feb-06	32.0	7.11
15	UMA	Feb-06	34.0	7.00
16	TIG	Jul-07	32.4	6.81
17	MAR	Abr-06	32.1	7.00

Tabla 1.- Resultado físico-químico tomadas en campo.

		HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	NO ₃ ⁻	Ca	Mg	Na	K	Al	Sr	Li	Ba	Zn	As	Fe
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	Mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	CHV	393.3	19.5	73.3	0.1	86	59	136	7.3	0.0031	1.85	0.1	0.224	0.031	0.131	1.03
2	CHS	46.2	69.8	40.7	7.25	35	17.5	62	6.9	0.0021	0.29	0.06	0.066	0.038	0.007	0.008
3	CHN	47.5	78.2	45.3	6.8	39	19.8	64	6.7	0.02	0.32	0.06	0.056	0.017	0.012	0.011
4	ZEM	61.8	75.4	41.6	7.8	39	22.6	66	9.8	0.006	0.39	0.07	0.059	0.025	0.016	0.009
5	CCZ	60.6	75.4	95.5	8.2	44	18.4	72	9.2	0.045	0.44	0.08	0.072	0.012	0.03	0.005
6	PFE	30.9	60	75.3	2.95	34	12.8	44	5	0.101	0.34	0.05	0.097	0.018	0.009	0.018
7	TIN	103.4	129.8	178	4.7	61	42	105	14.5	0.015	0.61	0.16	0.113	0.013	0.022	0.005
8	OMI	41.6	48.9	110	0.53	42	17.9	37	6.7	0.016	0.36	0.08	0.054	0.011	0.008	0.01
9	YUM	38	83.7	91.4	0.25	37	14.8	55	8.2	0.029	0.43	0.19	0.047	0.017	0.027	0.007
10	P2S	39.2	139.6	94.3	0.74	39	17.5	86	11.7	0.09	0.58	0.29	0.055	0.029	0.039	0.042
11	BED	32.1	149.3	149	1.5	35	18	111	20	0.1	0.43	0.09	0.068	0.008	0.005	0.033
12	AGS	219.8	22.3	50.6	1.3	75	40	45	10.7	0.74	0.72	0.03	0.09	0.01	0.008	0.005
13	JES	136.6	743.9	152	0.21	115	51	404	43	0.051	2.49	1.52	0.05	0.022	0.172	0.006
14	QIS	165.2	181.4	53.1	1.5	39	31.1	156	27	0.014	0.53	0.22	0.179	0.006	0.006	0.011
15	UMA	212.7	505.3	1.2	0.1	47	24.1	359	21	0.092	0.42	1.71	0.942	0.012	0.005	0.33
16	TIG	5656	127	2	0.1	146	89.1	176	16	-	-	-	-	-	-	-
17	MAR	49.9	278.1	108.2	0.1	3.6	1.7	240	21	-	< 0.01	0.1	-	-	-	-

Tabla 2.- Resultado del análisis químico de las fuentes termales y frías alrededor del volcán Misti, muestreadas en febrero del 2006.

Los resultados de la composición química fueron ploteados en el diagrama ternario de Giggenbach (Giggenbach, 1988), sobre la base de contenidos relativos de Na⁺ - Ca²⁺ - Mg²⁺ y Cl⁻ -SO₄²⁻ - HCO₃⁻, donde se ha observado que las aguas, mayormente se agrupan dentro las aguas alcalinas, y en menor proporción, dentro de las aguas alcalinas terreas (Fig. 3). Generalmente, este tipo de aguas se caracterizan por presentar altas temperaturas y alto contenido de cationes y aniones disueltos, pero las fuentes termales estudiadas, no presentan temperaturas altas, ya que la máxima alcanza 36°C (Charcani V), lo que indicaría que estas fuentes, están sufriendo una mezcla con aguas superficiales, produciendo una dilución de sus componentes químicos.

Asimismo, el diagrama ternario de Cl⁻-SO₄²⁻-HCO₃⁻ (Fig. 4) ilustra que las fuentes termales se agrupan en tres tipos de aguas:

- Aguas cloruradas (Jesus, Humaluso, Sabandia, Chilina N&S, Zemanat y Quiscos).
- Aguas sulfatadas o calentadas por vapor (Bedoya, Yumina, Puente Fierro, Tingo, C. Cuzco y Ojo del Milagro).
- Aguas bicarbonatadas o periféricas (Agua Salada y Charcani V).

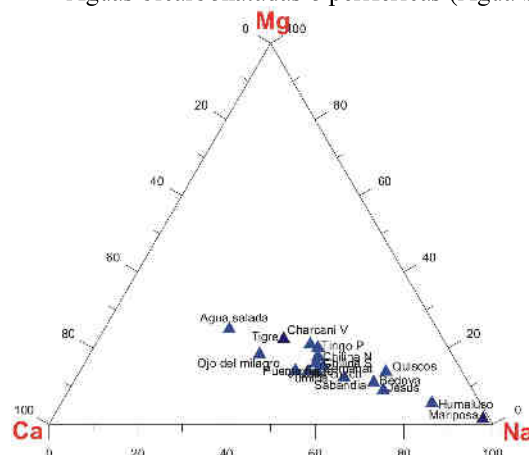


Fig. 3. Diagrama ternario Na-Ca-Mg.

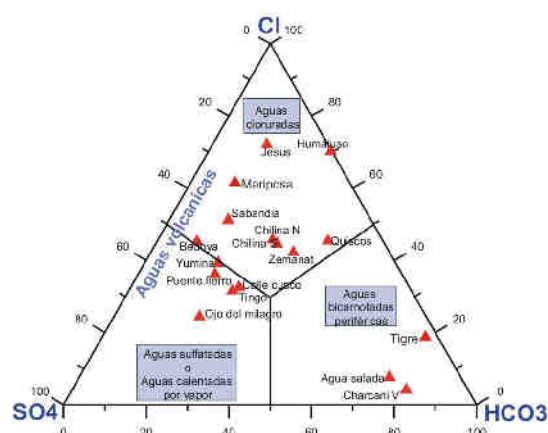


Fig. 4. Diagrama ternario Cl-SO₄-HCO₃

El diagrama de Piper Hill (Fig. 5) basado en los principales valores de mayor contenido de cationes y aniones en las aguas estudiadas, muestra que las aguas estudiadas se dividen en tres grupos:

- Aguas cloruro sulfatadas alcalinas.
- Aguas sulfato cloruradas alcalinas térreas.
- Aguas bicarbonatadas alcalinas.

El diagrama de Piper Hill, no hace más que apoyar la hipótesis planteada en base al diagrama ternario de Giggenbach.

Los tres tipos de aguas mostradas en los diagramas de Giggenbach y Piper Hill podrían provenir de una mezcla de tres tipos de reservorios: 1) Un reservorio clorurado profundo, 2) Un reservorio con componente de agua fresca, y 3) Un reservorio con componentes de fluidos volcánicos.

También podemos observar en las Figuras N° 3, 4 y 5, que las fuentes Jesús (JES) y Humaluso (UMA), se ubican dentro de las aguas cloruradas sulfatadas alcalinas, debido que dentro de su composición química (Tabla 2) presenta como iones dominantes al Cl^- , SO_4^{2-} y Na^+ , característico de aguas provenientes de reservorios clorurados profundos. Por lo cual, estas fuentes podría ser utilizadas como estaciones de monitoreo continua, que nos permitiría obtener información a nivel mas profundo.

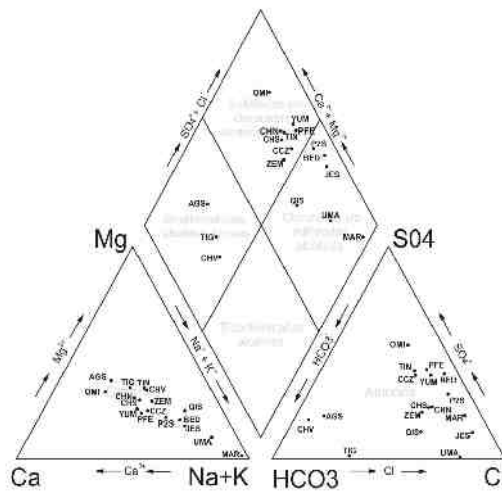


Fig. 5. Diagrama de Piper.

Por otro parte, se ha utilizado el diagrama ternario de Na-K-Mg1/2 (Giggenbach, 1988) (Fig. 6), que permite ver con mejor claridad el origen de las aguas. Según la evaluación de los datos analíticos del contenido de Na, K y Mg, observamos que todas las aguas estudiadas caen dentro de las aguas superficiales, muy lejos de la línea de equilibrio y del campo de equilibrio parcial, seguido de la línea de disolución de la roca. También hemos notado, que la baja temperatura y alta concentración de Mg, hace que todas las aguas se localicen cerca al ángulo de Mg. Este hecho sugiere que las temperaturas a profundidad son $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, indicando posiblemente que las aguas estudiadas están sufriendo una mezcla entre un acuífero termal y un acuífero superficial frío (Fig. 6).

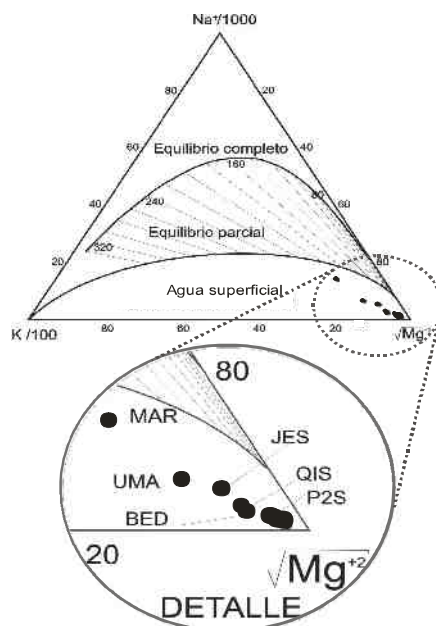


Fig. 6. diagrama ternario Na-K-Mg^{1/2} de Giggenbach(1988)

CONCLUSIONES

Las aguas termales y frías que afloran alrededor del volcán Misti se agrupan dentro de las aguas cloruradas, cloruro-sulfatadas y bicarbonatadas, que podrían provenir de una mezcla de tres tipos de reservorios: 1) Un reservorio clorurado profundo, 2) Un reservorio con componente de agua fresca, y 3) Un reservorio con componentes de fluidos volcánicos.

Considerando la clasificación de las aguas sobre la base de la composición química las fuentes que podrían ser utilizadas como estaciones de monitoreo continua son: Jesús y Humaluso. La fuente de Charcani V, tiene varias interacciones con fases fluidas de origen magmático. Estas interacciones se evidencian con varios parámetros como térmico, pH y composición química. Por tal razón se continuará con el monitoreo de la fuente para vigilar el sistema hidrotermal dentro del edificio volcánico que contribuirá en la vigilancia de la actividad del volcán Misti.

REFERENCIAS

- Cacya L. 2006. Volcán Misti: Sedimentología, geoquímica y correlación Tefro-estratigráfica del depósito de caída de pómez "autopista" ~ 14000 años, Tesis para optar el título de Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, p. 86.
- Cruz V., Finizola A., Macedo O., Sortino F. 2004. Disruptions in the hydrothermal water geochemistry inside Misti volcano in coincidence with the earthquake of June 23rd, 2001, 8.4 in magnitude in southern Peru.
- Cruz V., Masías P. 2007a. Geochemical Survey of Hot and Cold Waters Around the Misti Volcano, Poster, Conferencia internacional conmemorativa volcán Chichón 25 años después, Mexico.
- Cruz V., Masías P. 2007b. Anomalías térmicas en fuentes de aguas termales en relación con el terremoto del 15 de agosto (Pisco), Póster, 8vo. Congreso Nacional y Iero. Internacional de Geografía Carlos Nicholson, Arequipa.
- Giggenbach, W. F. 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochim Cosmochim Acta* 52: p. 2749-2765.
- Paquereau-Lebti P., Thouret J.-C., Wörner G., Fornari M., Macedo O., 2006. Neogene and Quaternary ignimbrites in the area of Arequipa, southern Peru: stratigraphical and petrological correlations. *J. Volcanol Geotherm Res*, p. 154, 251-275.
- Thouret, J.-C., Finizola, A., Fornari, M., Legeley-Padovani, A., Suni, J., and Frechen, M. 2001. Geology of the Misti volcano near the city of Arequipa, Peru, p. 1595 – 1604.