

CRISIS ERUPTIVA DEL VOLCÁN UBINAS, PERIODO 2006-2008

Jersy MARIÑO¹, Pablo MASÍAS¹, Marco RIVERA¹, Yanet ANTAYHUA¹, Rosario PAXSI¹, Jean-Claude THOURET², Katherine GONZALES¹

- (1) Instituto Geológico Minero y Metalúrgico INGEMMET/ Perú, imarino@ingemmet.gob.pe – Tele-Fax (51-54) 426735; Tel.: (51-1) 618-9800 anexos 414, 158.
- (2) Université Blaise-Pascal, Laboratoire Magmas et Volcans, UMR 6524, 5 rue Kessler, 63038 Clermont-Ferrand, France.

RESUMEN

La crisis eruptiva del volcán Ubinas se inició el 27 de marzo del año 2006 (Mariño, et al., 2006). Durante el proceso eruptivo se han identificado dos regímenes eruptivos diferentes: a) régimen freático, que se extiende del 27 de marzo al 18 de abril del 2006, caracterizado por emisiones de cenizas y proyectiles balísticos con un alto porcentaje de componentes hidrotermalizados; b) régimen eruptivo magmático de tipo vulcaniano, que se inicia alrededor del 19 de abril del año 2006, fecha en que se avistó por primera vez un cuerpo de lava incandescente en el fondo del cráter, corroborado también por el alto contenido de componentes juveniles en las cenizas emitidas posteriores al 20 de abril. En este segundo régimen se ha identificado una etapa de mayor actividad eruptiva, entre el 19 de abril y 31 de agosto del 2006; y una etapa de menor actividad, entre el 01 de setiembre del 2006 y diciembre del año 2009. En la etapa de mayor actividad, la columna eruptiva alcanzó valores de altura máximos, entre los 1500 y 2500 m sobre la caldera del volcán Ubinas, sin embargo luego de algunas explosiones estas se elevaron incluso entre los 3000 a 4000 m de altura. En esta etapa se produjeron en promedio una explosión cada dos días. En la etapa de menor actividad, en promedio la pluma volcánica alcanzó entre 300 y 700 m de altura sobre la cumbre. Fueron interrumpidas por explosiones de baja energía, luego del cual se formaron columnas que se elevaron entre 500 y 1500 m de altura sobre la caldera y muy esporádicamente sobre los 2500 m. Las explosiones ocurrieron en promedio una vez cada 20 a 30 días. Durante la etapa de mayor actividad eruptiva, el Índice de Explosividad Volcánica (IEV) estimada fue 1.

Los productos emitidos por el volcán Ubinas son cenizas y proyectiles balísticos. Las cenizas afectaron hasta un radio de 12 km alrededor del volcán, sin embargo en las imágenes de satélite fueron avistadas hasta 100 a 120 km de distancia. Los proyectiles balísticos juveniles emitidos, poseen composición andesítica basáltica, contienen fenocristales de plagioclasas (algunas zonadas), piroxenos, óxidos y xenocristales de biotita (Rivera, et al., 2007). El alcance máximo registrado de los proyectiles balísticos es de 1.8 km, donde poseen hasta 1,5 cm de diámetro.

Durante los años 2005 y 2006, en la fuente UBT, los valores del anión SO_4^{2-} fluctuaron entre 400 y 1050 mg/L, pero a partir de enero del 2007 hasta todo el 2008, dichos valores se incrementaron ligeramente y fluctuaron entre 1000 y 1240 mg/L. En el caso del anión Cl^- , este se incrementó ligeramente entre enero y marzo del año 2006, sus valores se ubicaron entre 340 y 380 mg/L. Así mismo, se han observado las mayores variaciones en los valores

de los cationes Na, Ca y K, entre fines de marzo y los primeros días de agosto del año 2006. En esta misma fuente termal, los mayores valores de pH se registraron durante el mes de junio del año 2006 (entre 6.5 y 7) y la temperatura se incrementó nítidamente entre abril y agosto del mismo año (entre 30 y 42.5 °C).

El mayor impacto ambiental generado por la erupción, fue debido a la caída de cenizas, principalmente en las localidades de Querapi, Ubinas, Tonohaya, Sacoaya y Escacha. Estas provocaron problemas de salud en las personas, tales como dermatitis, conjuntivitis y afecciones estomacales; también originaron la pérdida de productos de pan llevar, tales como papas, maíz, trigo, cebada, habas y alfalfa, principalmente el año 2006, así como muerte de camélidos, ovinos, ganado vacuno y caprino, por la ingesta de pastos contaminados con ceniza.

I. INTRODUCCIÓN

El volcán Ubinas se encuentra localizado a 90 km al norte y 65 km al este de las ciudades de Moquegua y Arequipa respectivamente ($16^{\circ} 22' S$, $70^{\circ} 54' O$; 5,672 msnm., Figura 1). El cono volcánico se localiza en jurisdicción de la Región Moquegua y según datos de un censo realizado durante el inicio del proceso eruptivo 2006, cerca al volcán viven alrededor de 1,216 familias y 3,559 habitantes, en 19 centros poblados (Berolatti, 2006; Figura 1).

Trabajos realizados por Rivera (1998), Thouret et al. (2005) y Rivera et al. (2007), indican que el estratovolcán Ubinas se construyó en dos períodos: el primer período entre ~800,000 y 370,000 años, donde se formó el cono inferior denominado "UBINAS I", y el segundo período ocurrido desde 370,000 años hasta la actualidad, donde se formó el cono superior llamado "UBINAS II". Relatos históricos y datos geológicos muestran que el volcán Ubinas presentó al menos 24 crisis eruptivas desde el año 1550 hasta el 2006 (Rivera et al., 2007).

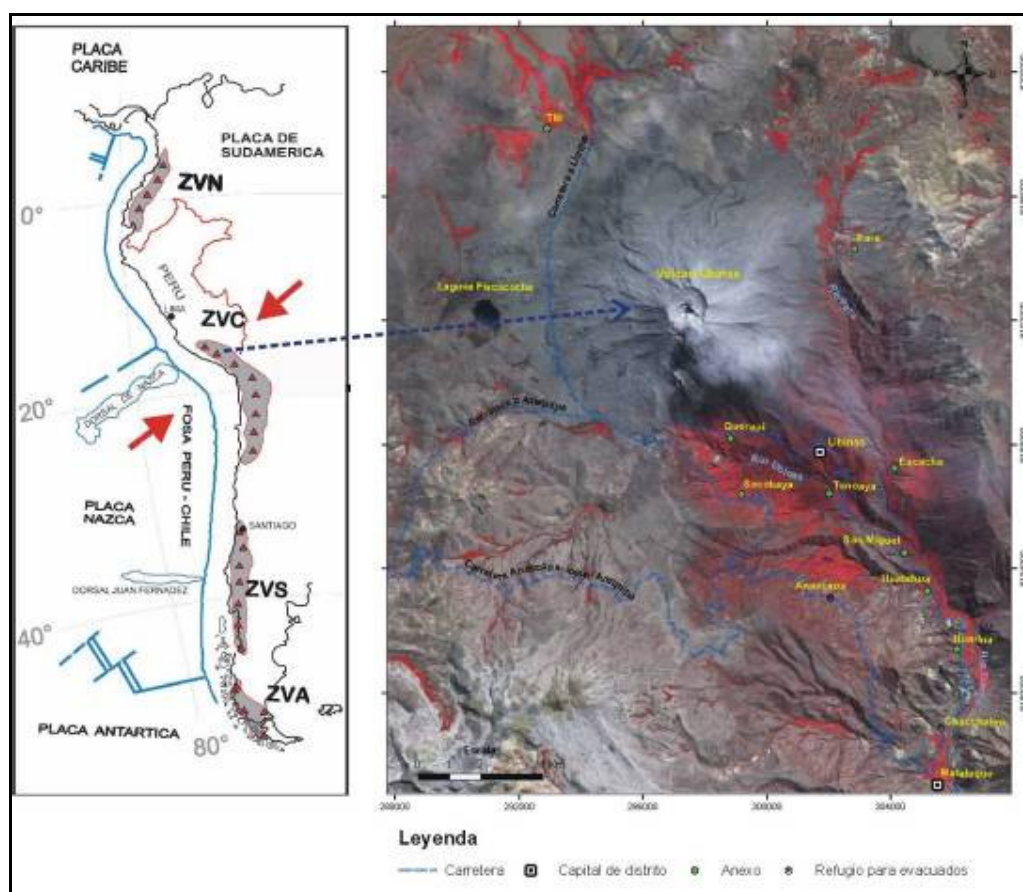


Figura 1. Distribución de las zonas volcánicas activas de Sudamérica (izquierda) e imagen de satélite que muestra al volcán Ubinas y las localidades aledañas.

Los pobladores de Querapi reportaron caídas de ceniza en su localidad el día 27 de marzo del año 2006 (Mariño et al., 2006). Este hecho evidenció la carencia de un sistema de monitoreo continuo en el volcán Ubinas y la imperiosa necesidad de implementarla. El día 31 de marzo del año 2006, representantes del INGEMMET, IGP, UNSA, INDECI-Moquegua,

Municipalidad Distrital de Ubinas y del CRDC-Moquegua, realizamos una inspección de campo al volcán Ubinas. Este trabajo permitió corroborar que efectivamente el volcán Ubinas había entrado en una nueva fase eruptiva. Posteriormente, el INDECI oficializa mediante resolución (3768-2006-INDECI/11.0), la creación de la “Comisión de Ciencia y Tecnología Ad-Hoc ante el incremento de la actividad del volcán Ubinas”, que es integrada por el INGEMMET, IGP y IG-UNSA. Esta Comisión tiene dos objetivos centrales: a) Implementar el monitoreo continuo e interdisciplinario del volcán Ubinas, con la finalidad de conocer el estado y la evolución del proceso eruptivo; b) emitir comunicados colegiados, donde se informe a la sociedad sobre el estado del proceso eruptivo y se emitan recomendaciones a las autoridades y la población, a fin de gestionar adecuadamente la crisis eruptiva. Durante los años 2006, 2007 y 2008, la Comisión de Ciencia y Tecnología Ad-Hoc, ha emitido 22 comunicados colegiados, donde se reporta la evolución de la actividad eruptiva del volcán Ubinas, los efectos ambientales que este proceso genera, y se brindan recomendaciones a las autoridades y la población para una adecuada gestión de la crisis. Dichos comunicados se hallan también en la página web del INGEMMET (www.ingemmet.gob.pe).

II. NATURALEZA DE LOS PRODUCTOS EMITIDOS

Los productos emitidos por el volcán Ubinas entre marzo del año 2006 y diciembre del año 2008, son principalmente cenizas (Figura 2) y proyectiles balísticos, estos últimos denominados también bombas volcánicas (Figura 3).

Las mayores emisiones de cenizas están generalmente precedidas por explosiones volcánicas. Las cenizas emitidas tienen menos de 1.5 mm de diámetro, gran porcentaje de ellas poseen incluso menos de 0.5 mm. En la caldera el depósito de ceniza acumulada tiene alrededor de 12 cm de espesor, a 2.5 km del cráter posee en promedio 2.5 cm de espesor, a 4 km posee 1.3 cm y a 6 km posee 1 cm en promedio. Más al SE, en la zona de Anascapa su espesor es de 4 mm, y las últimas medidas han sido tomadas en el sector de Chacchagen, donde posee alrededor de 0.5 mm de espesor (Rivera et al., 2007). Caídas de ceniza han sido reportadas principalmente dentro de un radio de 12 km alrededor del volcán, sin embargo en las imágenes de satélite han sido avistadas hasta 120 km de distancia.

Los bloques, bombas o proyectiles balísticos han sido eyectados durante las explosiones volcánicas. Estas explosiones empezaron a producirse el día 12 de abril del 2006 (23:00 Hrs.). La magnitud de las explosiones fue incrementándose gradualmente, así las explosiones ocurridas hasta antes del 19 de abril del 2006, eyectaron proyectiles balísticos que alcanzaron menos de 400 m de distancia del cráter. La explosión ocurrida el día 20 de abril del 2006 (11 Hrs.) arrojó proyectiles balísticos que llegaron hasta 500 m de distancia. Posteriormente, explosiones ocurridas los días 07 de mayo (20:55 Hrs.), 22 de mayo (4:30 y 4:36 Hrs., Figura 3), 02 de junio (18:08 Hrs.), 18 de junio (5:54 Hrs.), 10 de julio (11:49 y 12:06 Hrs.), 17 de agosto (16:57 Hrs.) y 28 de octubre (1:43 Hrs.), eyectaron bombas volcánicas hasta una distancia entre 1400 y 2000 m del cráter (Mariño, et al., 2006; Rivera, et al., 2007).

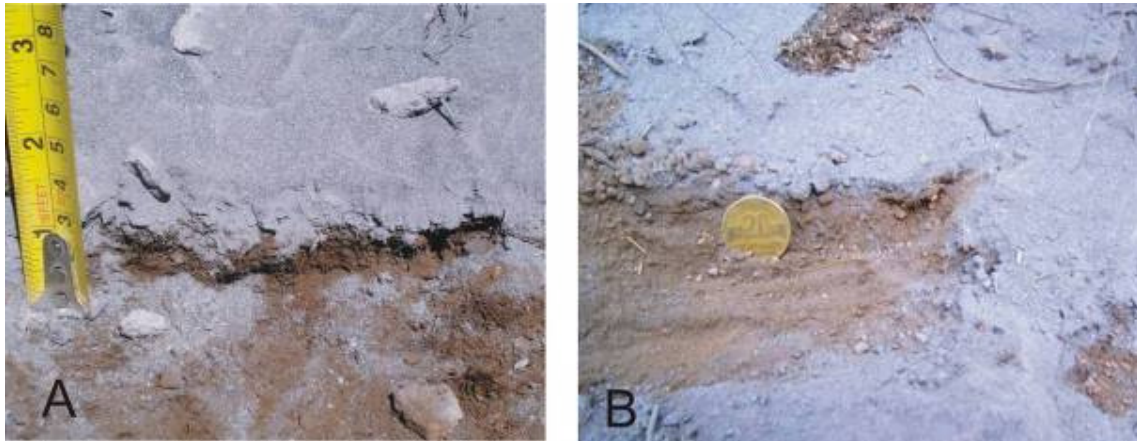


Figura 2. Depósitos de caída de ceniza: A) posee 1.5 cm de espesor aproximadamente a 3.5 km al SE del cráter del volcán Ubinas; B) 0.4 cm a 9 km al SE del cráter.



Figura 3. proyectil balístico de 30 cm de largo, eyectado a más de 1800 m de distancia, durante la explosión del día 22 de mayo del año 2006.

El estudio petrográfico realizado sobre algunos proyectiles balísticos (fragmentos de lava juvenil), arrojó que macroscópicamente estas son de color gris oscuro, vítreos, algunos escoráceos y otros densos. Microscópicamente, estas rocas presentan texturas porfíricas y traquíticas, contienen fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno, olivino, biotita y óxidos. Por estas características las lavas estudiadas son de composición andesítica (Rivera et al., 2007).

III. MAPA DE PELIGROS DEL VOLCÁN UBINAS

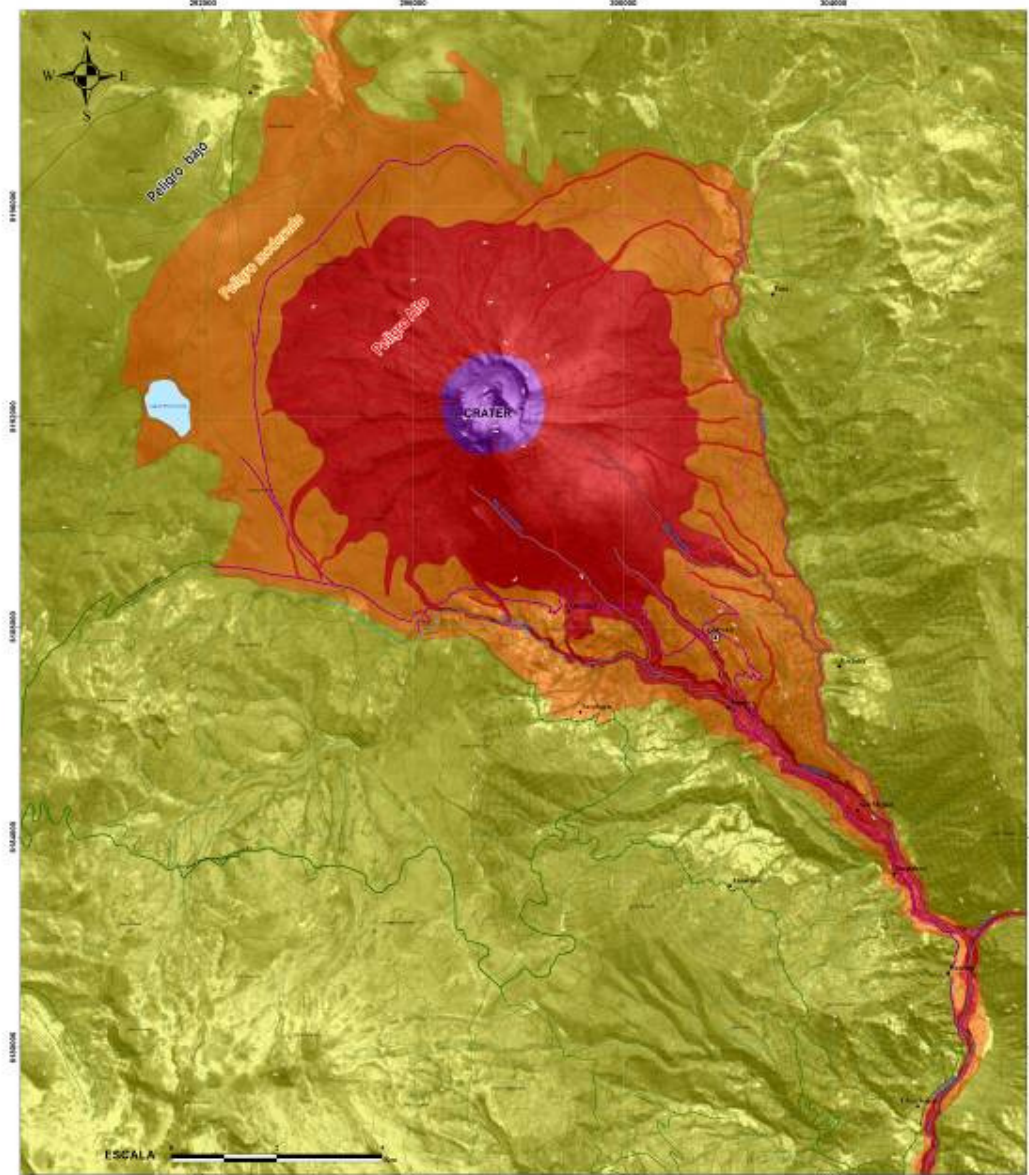
El INGEMMET, conjuntamente con volcanólogos del Instituto de Investigación Para el Desarrollo de Francia (IRD) y la Universidad Blas Pascal de Francia (UBP), elaboró un nuevo mapa de peligros del volcán Ubinas (Figura 4), a fin de que sea utilizado por las autoridades y la población en la gestión de la crisis eruptiva. Los datos para la construcción del mapa de

peligros, están basados en los mapas temáticos de peligros volcánicos y en la información geológica volcanológica disponible, elaborados por Rivera (1998); Thouret et al. (2005); Simkim & Siebert (1994).

El mapa de peligros del volcán Ubinas (Mariño y Rivera, 2008; Rivera et al., 2007; Figura 4), fue elaborado para un escenario eruptivo moderado, de tipo Vulcaniano o Saint Vincent ocurrido en el año 1979. Se optó por este tipo de mapa, debido a la actividad mostrada por el volcán Ubinas en los últimos 500 años, que fue baja a moderada. También la composición química del magma actual, es similar al de los últimos 500 años, por lo que no se esperaba una erupción explosiva de gran magnitud.

El mapa de peligros muestra diversas áreas según el grado de peligrosidad. Los límites fueron trazados considerando el alcance máximo de los productos emitidos, además de un pequeño margen de seguridad. Se diferenciaron tres zonas de peligro (Figura 4): a) Zona de alto peligro, de color rojo, puede ser severamente afectada por caídas o lluvias de cenizas y escoria de varios centímetros a decímetros de espesor, por nubes incandescentes o flujos piroclásticos de escoria y/o ceniza, por gases volcánicos de alta concentración, flujos de lodo o huaycos, avalanchas de escombros y eventualmente flujos de lava. En cualquier tipo de erupción esta área será la más afectada, inclusive las de baja magnitud, como las ocurridas en el periodo de 1550 hasta 1969 (IEV 1-3). También se muestra una zona de color lila, es la zona de la caldera del volcán. b) Zona de moderado peligro, de color anaranjado, puede ser moderadamente afectada por nubes incandescentes o flujos piroclásticos de escoria y/o ceniza, flujos de lodo o huaycos, avalanchas de escombros y por moderadas caídas de cenizas y escoria de algunos milímetros a centímetros de espesor. c) Zona de bajo peligro, de color amarillo, y puede ser afectada básicamente por caídas de cenizas en función de la dirección del viento.

MAPA DE PELIGROS DEL VOLCAN UBINAS



OBJETIVO

Este mapa muestra áreas con peligrosidad alta, moderada y baja, alrededor del volcán Ubinas. Basados en dicha zonificación recomendamos la publicación definitiva de centros poblados asentados dentro de las zonas de peligro alto (rojo) y peligro moderado (naranja). Así mismo, recomendamos se evite la construcción de obras importantes de infraestructura (carreteras, reservorios de agua, canales de irrigación, etc.) dentro de dichas áreas.

BASES PARA SU ELABORACION

Este mapa fue elaborado en base a la información Geológica-volcanológica disponible del volcán Ubinas; así mismo consideramos los elementos vulnerables y zonas peligrosas en caso de una erupción cuyo mecanismo es moderado (erupción vulcaniana y/o saizé Vincent), durante el cual se podría generar una columna eruptiva entre 5 y 15 km de altura.

- Zona que será afectada directamente por o alas incandescentes (flujos piroclásticos), gases volcánicos, hachos (lahares), avalancha de escoria, flujos de lava, y fuertes caídas de cenizas.
- Zona que será moderadamente afectada por nubes incandescentes (flujos piroclásticos), hachos (lahares), caídas de cenizas y eventuales flujos de lava.
- Zona que podría ser afectada por caídas de cenizas en función a la dirección del viento.
- Caldera del volcán

- Carreteras vulnerables
- Carreteras transitables
- Caminos transitables
- Caminos vulnerables
- Caminos vulnerables
- Poblados
- Capital de distrito
- Pertenio



Figura 18

Figura 4. Mapa de peligros del volcán Ubinas, elaborado para un escenario eruptivo moderado, tipo vulcaniano y/o Saint Vincent.

IV. MONITOREO DE LA CRISIS ERUPTIVA

El INGEMMET inicia el monitoreo geoquímico de fuentes de agua asociados el volcán Ubinas en septiembre del año 2005. Cuando se inició la crisis eruptiva el monitoreo geoquímico se intensificó, también se empezó a implementar el monitoreo de la fenomenología (visual) y monitoreo de la deformación del edificio volcánico.

4.1. Monitoreo geoquímico

El monitoreo geoquímico permite observar variaciones en parámetros fisicoquímicos en las fuentes de agua que tengan influencia del sistema hidrotermal de un volcán. En estas fuentes se pueden identificar variaciones de su temperatura (°C), potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (TDS) y composición química de las sales disueltas en el agua (aniones y metales disueltos). La identificación de estas variaciones, así como de otros parámetros de monitoreo, pueden contribuir en el establecimiento de pronósticos en el proceso eruptivo, en este caso del volcán Ubinas.

Los puntos de monitoreo geoquímico del volcán Ubinas fueron 13, los que se ubican dentro de un radio de 25 km del volcán (Tabla 1). Durante el 2005 se monitorearon en 2 puntos, durante el 2006 en 12 puntos y en los años 2007 y 2008 en 9 puntos (Figura 5).

Tabla 1. Ubicación de las fuentes de aguas termales y frías donde se realizó el monitoreo geoquímico del volcán Ubinas.

N°	FUENTES	CÓDIGO	LATITUD (UTM)	LONGITUD (UTM)	ALTURA (m.s.n.m.)
1	Ubinas Termal	UBT	301.539	8 188.123	3 329
2	Ubinas Fría	UBF	301.549	8 188.125	3 329
3	Matalaque	MAT	305.545	8 177.217	2 495
4	Huarina	HUA	306.202	8 180.203	2 530
5	Lucco	LUC	313.588	8197.183	3 070
6	Logen	LOG	286.120	8 201.236	4 475
7	Laguna Piscococha	PIS	291.592	8192.501	4 380
8	Salinas Hito	SAH	271.202	8191.300	4 336
9	Chiflón	CHF	301.017	8187.700	3 437
10	Mariposa	MAR	269.629	8187.475	4 102
11	Ispaypuquio	ISP	296.448	8 187.975	4 225
12	Ñuño	VOL	286.370	8 182.182	4 497
13	Chimpamoya	CHI	298.680	8 188.205	3 855

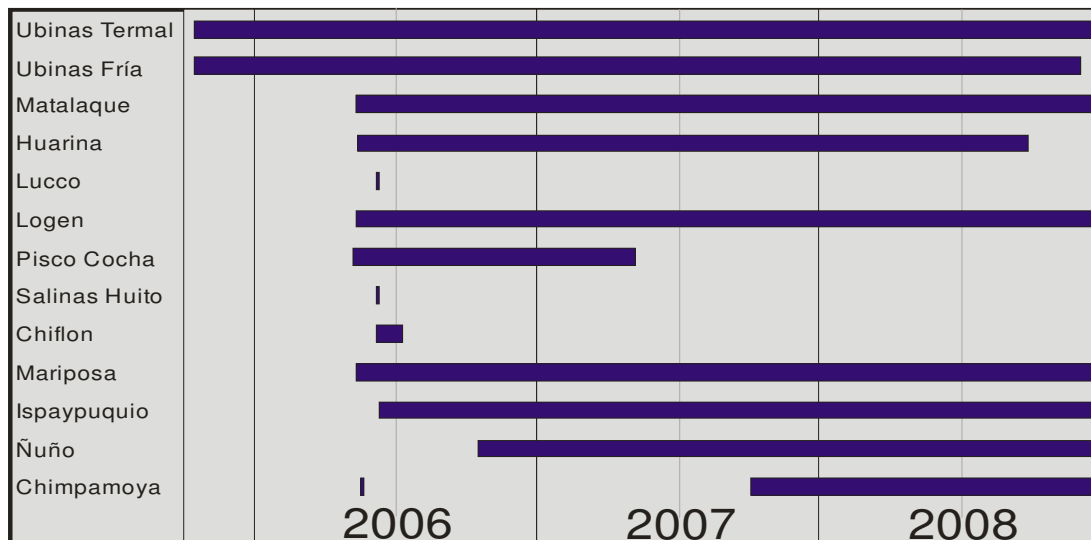


Figura 5. Periodos de monitoreo de las fuentes de aguas termales y frías, ubicadas alrededor del volcán Ubinas.

a) Monitoreo geoquímico en la fuente Ubinas Termal (UBT)

El muestreo geoquímico y la medición de los parámetros fisicoquímicos se realizaron mensualmente y se intensificó en marzo de 2006 debido a la erupción del volcán Ubinas. Por su cercanía al cráter del volcán (5.7 km al SE), la fuente UBT se constituyó como la fuente más adecuada para el monitoreo geoquímico. En esta fuente se instalaron también registradores de temperatura.

- Parámetros fisicoquímicos de la fuente UBT

En la Figura 6 se presentan los resultados de las mediciones de la temperatura (medido periódicamente y cada 15 minutos), pH y conductividad eléctrica, registradas en la fuente UBT. Se observa que las variaciones de temperatura se presentaron entre marzo y abril de 2006 con valores entre 32.1 °C (29 de marzo) y 42.1 °C el 16 de abril, lo cual está 12 grados por encima de su valor promedio que es 30.12 °C. Así mismo, los valores de pH fluctuaron entre 6.1 y 7.0.

Entre febrero y junio del año 2007, octubre del 2007 y abril del 2008, la temperatura de la fuente Ubinas Termal (UBT) también presentó ligeras variaciones en sus valores, de 29.24 °C a 29.97 °C (Figura 6). Una disminución importante en los valores de temperatura fueron registrados entre agosto y noviembre de 2007, los mismos que podrían estar relacionados a la ocurrencia de los sismos de Pisco del 15 de agosto (Mw=7.9) y de Tocopilla del 14 de noviembre (Ms=7.7; Masías et al., 2008). Durante los años 2007 y 2008, los valores de pH se mantuvieron relativamente estables (6.1 y 6.5); mientras que la conductividad (CE) registró variaciones entre 2800 µs/cm a 3300 µs/cm, entre enero y octubre del 2008.

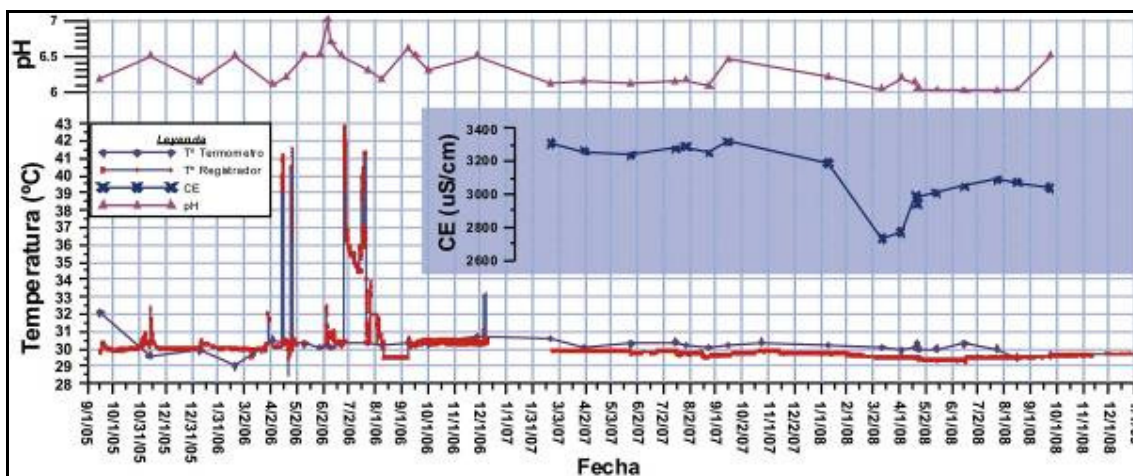


Figura 6. Parámetros fisicoquímicos registrados en la fuente UBT entre los años 2005 y 2008.

- Análisis químico y discusión de resultados

La mayor cantidad de información se obtuvo de los aniones, tanto de los sulfatos (SO_4^{2-}) y cloruros (Cl^-), los que a su vez presentaron mayores variaciones (Figura 7). Durante el año 2005, al iniciar el muestreo en septiembre, fue posible observar variaciones en ambos aniones, las que se prolongaron hasta mediados de noviembre con valores de SO_4^{2-} de 435 a 1051 mg/L y de Cl^- de 305 a 329 mg/L. En el año 2006 las variaciones se centraron entre enero y junio, disminuyendo las variaciones de SO_4^{2-} y aumentando las de Cl^- , con valores para SO_4^{2-} de 845 a 1051 mg/L y Cl^- de 169 a 358 mg/L. Durante el 2007 continúan las variaciones, principalmente en los SO_4^{2-} con valores de 1043 a 1184 mg/L y Cl^- de 306 a 333 mg/L. Estas variaciones continuaron el año 2008, en el caso de los SO_4^{2-} , estos muestran un comportamiento diferente al 2005 y 2006, las variaciones fueron para SO_4^{2-} de 1011 a 1238 mg/L y Cl^- de 305 a 333 mg/L.

En el caso de los cationes mayoritarios en esta fuente son el Na, Ca, Mg y K (Figura 8). Durante el año 2005 se obtuvieron muy pocos resultados, pero se evidencia que existían variaciones principalmente del Na (el más abundante) entre los 310 y 330 mg/L. Durante el año 2006, la cantidad de resultados fue mucho mayor, se pudo observar muchas variaciones en los 4 aniones más abundantes, sobre todo entre los meses de marzo a agosto, con valores que van para el Na de 270 a 330 mg/L, para el Ca de 220 a 300 mg/L, K de 28 a 81 mg/L y Mg de 87 a 99 mg/L. Durante el año 2007 la cantidad de resultados en la mayoría de casos fue solo uno, pero este se mostró en todos los casos dentro de la concentración media, sugiriendo que no ocurrieron cambios significativos. Durante el 2008 la cantidad de resultados también fue escasa pero de igual manera muestra un comportamiento más estable que el 2005 y 2006.

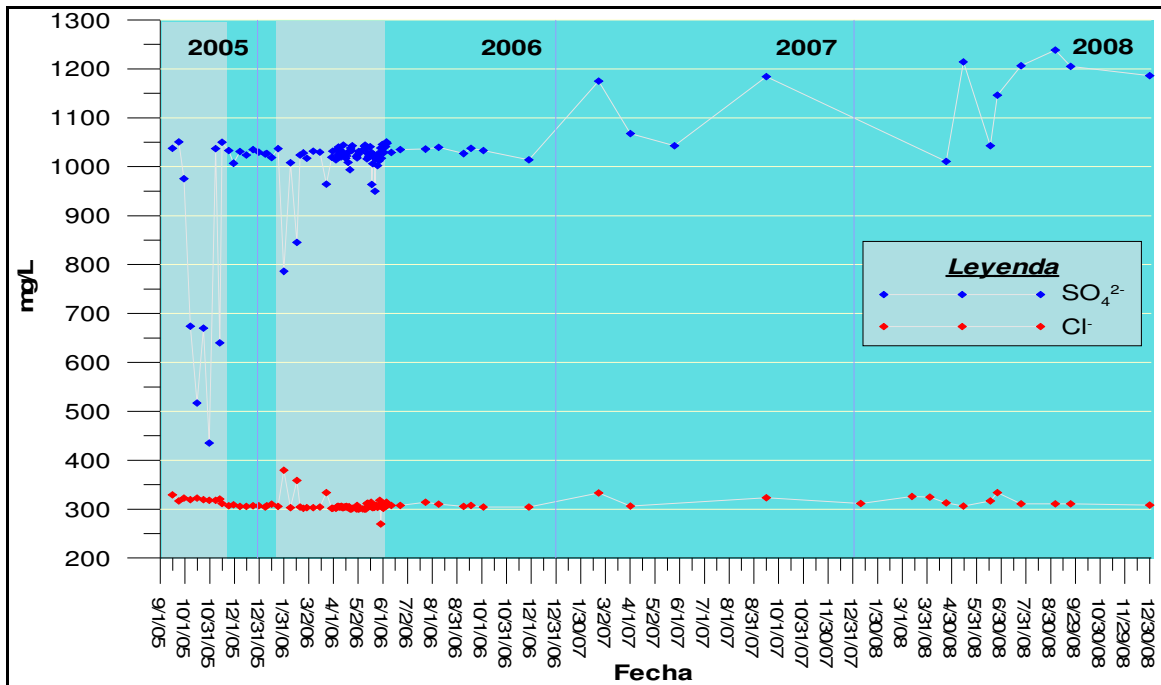


Figura 7. Gráfica de las concentraciones de aniones mayoritarios en la fuente UBT.

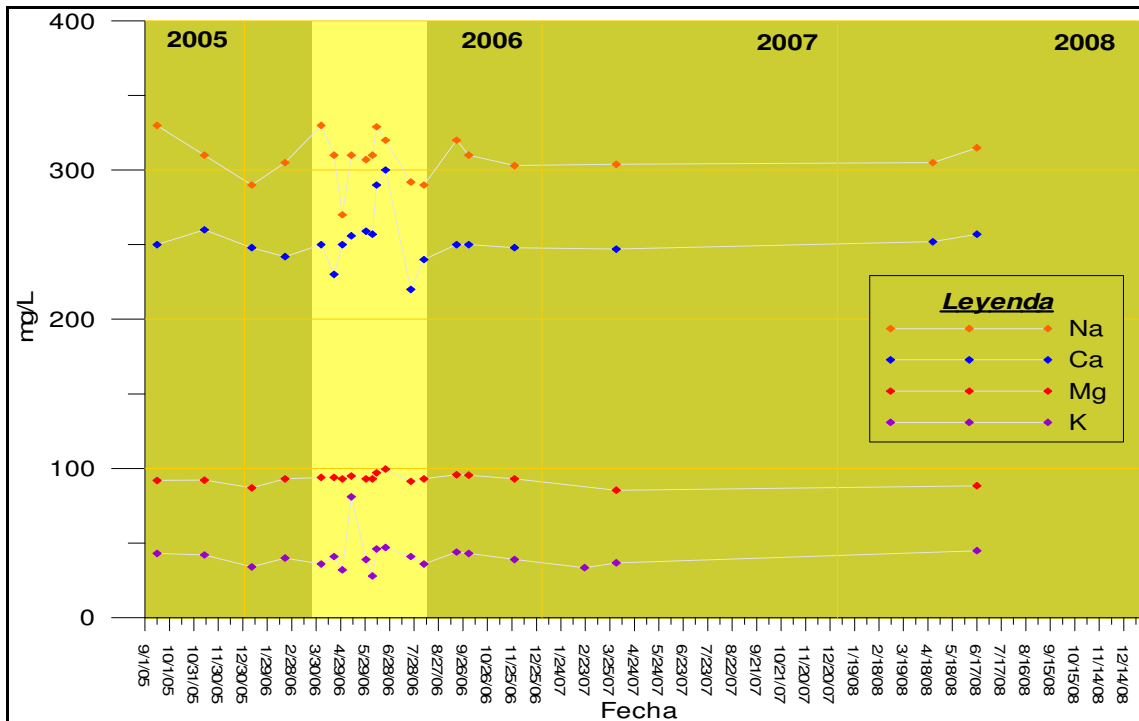


Figura 8. Gráfica de las concentraciones de cationes mayoritarios en la fuente UBT, años 2005 a 2008.

4.2. Monitoreo de la fenomenología (visual)

El monitoreo de la fenomenología diaria del volcán Ubinas, se inició el 17 de septiembre de año 2005, con la observación de la altura de las fumarolas, y estuvo a cargo de un poblador de la localidad de Ubinas. Luego de iniciada la crisis eruptiva, el INGEMMET en colaboración con la Municipalidad Distrital de Ubinas, implementó un monitoreo continuo desde abril del 2006. Para ello, el INGEMMET instaló un campamento base ubicado a 4 km en dirección SSO del cráter del volcán, desde donde el observador realizó el registro visual diario, considerando los siguientes parámetros: fecha y hora de inicio de las emisiones, altura, color, densidad, forma y dirección de desplazamiento de la columna eruptiva o pluma volcánica, una breve descripción de las explosiones, además de un registro fotográfico de los eventos más importantes.

La información fue transmitida por el observador diariamente a la Oficina de Volcanología del INGEMMET en Arequipa, a través de un teléfono satelital. Una vez recopilada la información y actualizada la base de datos, se procedió a divulgarla en la página web del INGEMMET (<http://www.ingemmet.gob.pe/webubinas/01-vigilancia.htm>).

En la Figura 9 se muestran los resultados del monitoreo de la fenomenología diaria, correspondiente a los años 2005, 2006 y 2008. Puede observarse que la mayor actividad volcánica, reflejada en el número de explosiones y la altura de la columna eruptiva, se registró entre abril y agosto del año 2006. También se observa que a partir de setiembre del 2006 la actividad disminuye y se mantiene en niveles bajos durante los años 2007 y 2008, con ligeros incrementos durante cortos periodos de tiempo.

La dirección de desplazamiento de la pluma volcánica ha sido bastante variada entre los años 2006 y 2008 (Figura 10). Durante el año 2006 la pluma fue desplazada por el viento predominantemente en dirección sureste, norte y este. Durante el año 2007 se desplazó principalmente en dirección sureste, este, noreste, norte y oeste. Durante el año 2008 no se observan direcciones predominantes, se produjeron desplazamientos en direcciones diversas, resaltan ligeramente hacia el noreste, este, sureste, oeste, suroeste y sur. Por el análisis general, se concluye que entre los años 2006 y 2008, la pluma volcánica fue desplazada preferentemente hacia el sureste, este y norte. La mayoría de centros poblados se encuentran al sureste del volcán, por tanto fueron afectados constantemente por las caídas de cenizas.

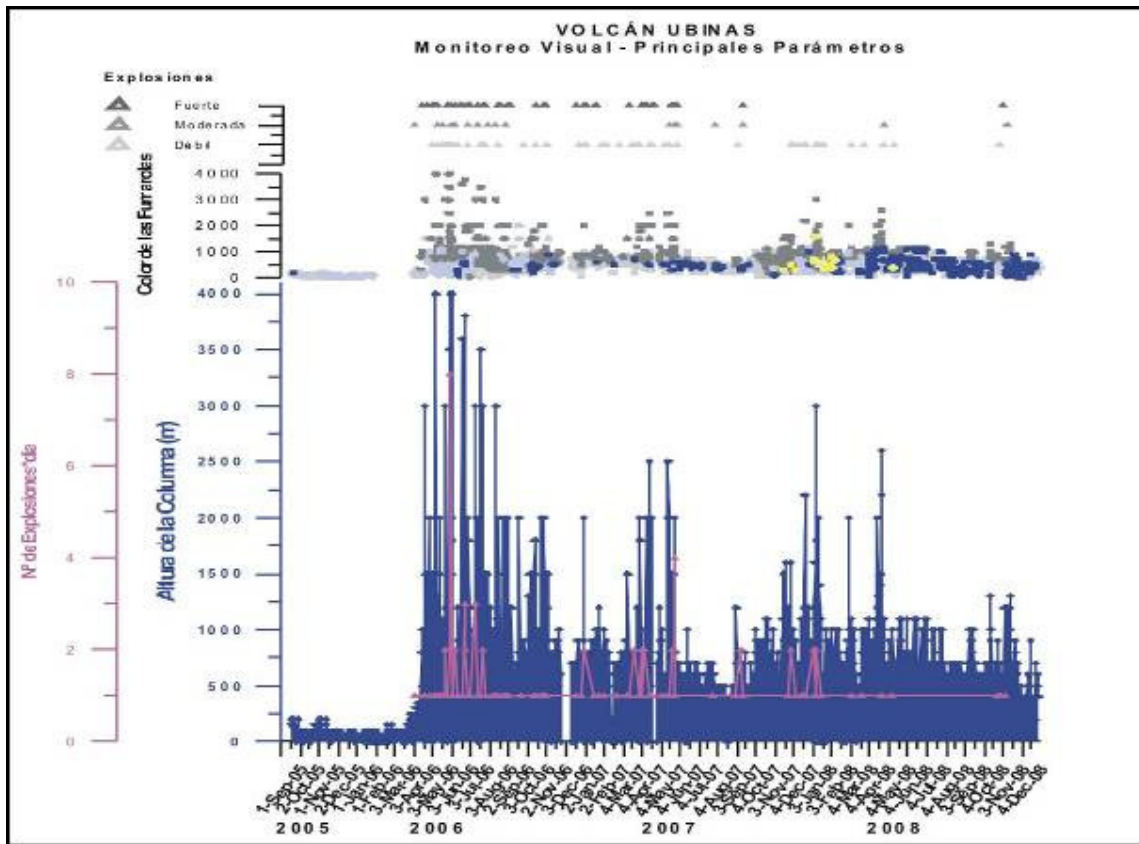


Figura 9. Altura y coloración de la pluma volcánica, así como número de explosiones, correspondientes a los años 2005, 2006, 2007 y 2008.

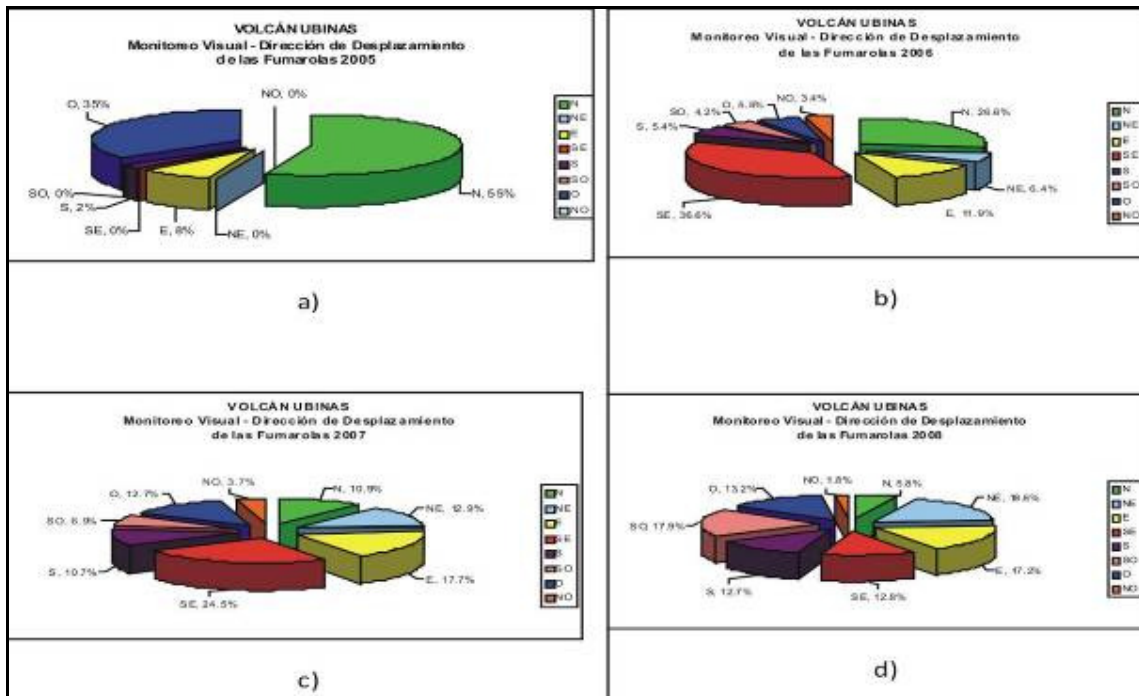


Figura 10. Porcentaje de desplazamiento de la pluma volcánica, entre los años 2005 y 2008.

4.3. Monitoreo de la deformación del edificio volcánico

De acuerdo con estudios geológicos realizados por Rivera (1998) y Thouret et al. (2005), en el volcán Ubinas se evidenció que el flanco sur es la zona más inestable del volcán, debido a su fuerte pendiente y la proximidad del cráter a este flanco. En caso ocurra una erupción importante del volcán, es muy probable que este flanco colapse, como ocurrió hace 3670 años \pm 60 A.P. (Rivera, 1998), afectando así, a las localidades asentadas a lo largo del valle de Ubinas. A fin de monitorear la deformación que podría ocurrir en el flanco sur, como consecuencia de la erupción volcánica, el INGEMMET efectuó el monitoreo de deformación utilizando la técnica EDM. Para ello se usó una Estación Total marca WILD y el Distanciómetro Laser DISTOMAT WILD DI 2002 (Mariño et al., 2006). Así mismo, se aplicó el método de Interferometría de Radar (INSAR).

a) Monitoreo de deformación con el método Interferometría de Radar (INSAR)

El monitoreo de deformación del volcán Ubinas mediante el método de Interferometría de Radar (INSAR) fue realizado por el INGEMMET en cooperación con CONIDA. Con este propósito se adquirieron imágenes radar del satélite ENVISAT, del 4 de diciembre del 2004 y del 13 de mayo del 2006. Estas imágenes cubrieron el área donde se encuentran los volcanes Ubinas y Ticsani. Según González et al. (2006), el análisis del interferograma (Figura 11), no muestra procesos de deformación del edificio del volcán Ubinas, aún cuando en el período que involucra el procesamiento de imágenes, se observó en el fondo del cráter del volcán Ubinas un cuerpo de lava el día 19 de abril del 2006 (Mariño, et al., 2006). A diferencia del resultado obtenido en el volcán Ubinas, en la zona cercana al volcán Ticsani, si se observó deformación de aproximadamente 10.31 cm (González, 2006), sobre un área de 9 x 14 km, orientada en dirección NO-SE. Esta deformación posiblemente esté asociada a actividad tectónica de la zona, producto del sismo ocurrido el 01 de octubre del 2005 ($M_b=5.4$), cuyo epicentro fue localizado a 3 km de la localidad de Calacoa (Rivera et al., 2006).

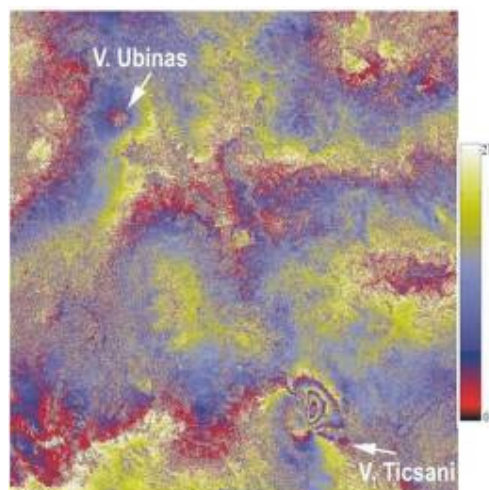


Figura 11. Interferograma obtenido para los volcanes Ubinas y Ticsani. La disposición de las franjas de color rojo y azul evidencia la existencia de deformación en la zona del volcán Ticsani. En el volcán Ubinas no se observa deformación (González et al., 2006).

V. EVOLUCIÓN DEL PROCESO ERUPTIVO 2006, 2007 Y 2008

La evolución del proceso eruptivo se ha elaborado en base a los tipos de productos emitidos por el volcán, evolución geoquímica y mineralógica de los productos emitidos, altura y alcance de las cenizas y proyectiles balísticos, número de explosiones y frecuencia de estas. Complementariamente se han tenido en cuenta las variaciones de los parámetros de vigilancia sísmica y geoquímica.

La fase eruptiva del volcán Ubinas se inicia el día 27 de marzo o pocos días antes de dicha fecha (Mariño, et al., 2006). Es imposible determinar la fecha exacta, ya que no se tenían instalados equipos de monitoreo en el volcán Ubinas y por otro lado, la densa neblina que cubría el volcán entre febrero y marzo impedían ver lo que estaba sucediendo. Se han identificado dos regímenes eruptivos diferentes, el primero de tipo freático y el segundo de tipo mágnico con características vulcanianas.

5.1. Régimen eruptivo freático, 27 de marzo al 18 de abril del 2006

Este régimen se inicia el día 27 de marzo del 2006 y se extiende hasta el 18 de abril de dicho año. Desde fines del mes de marzo hasta el 12 de abril la actividad fue baja a moderada, las emisiones de cenizas fueron constantes, alcanzando alturas de 400 a 500 m por encima de la caldera. La primera explosión, sentida por los pobladores, se produjo el día 12 de abril, día que marca el inicio de este tipo de eventos. Entre los días 13 y 16 de abril, se reportaron ligeros incrementos de las emisiones de cenizas, la columna de gases y cenizas alcanzaron hasta 1000 m de altura.

Las cenizas emitidas durante las primeras semanas (entre el 27 de marzo y 18 de abril), colectadas dentro de la caldera y en los alrededores del volcán, contienen un alto porcentaje de componentes hidrotermalizados. Por otro lado, los bloques o proyectiles balísticos eyectados durante las explosiones ocurridas antes del 20 de abril, corresponden a lavas alteradas e hidrotermalizadas (Rivera et al., 2007). Estos primeros productos forman parte del conducto y/o el sistema hidrotermal del volcán, arrancados y eyectados durante las explosiones. Por las características de las cenizas y bloques emitidos por el volcán Ubinas, carentes de componentes juveniles, se infiere que la primera etapa del proceso eruptivo, entre el 27 de marzo y a lo sumo el 18 de abril, presentó actividad de tipo freática, es decir interacción de agua meteórica con el sistema hidrotermal del volcán.

5.2. Régimen eruptivo mágnico de tipo vulcaniano, 19 de abril del año 2006 a diciembre del 2008

El día 19 de abril del año 2006, se avistó por primera vez un cuerpo de lava incandescente de aproximadamente 60 m de diámetro en el fondo del cráter del volcán Ubinas (Mariño et al., 2006). Este hecho evidencia el inicio de un régimen eruptivo mágnico, el cual fue también corroborado por el estudio de las cenizas emitidas posteriores al 20 de abril, que contienen un alto porcentaje de componentes juveniles (Rivera, et al., 2007).

Las periódicas y recurrentes explosiones, emisiones de cenizas y proyectiles balísticos, así como la composición andesítica del magma actual, sugieren un comportamiento eruptivo con características vulcanianas. En este régimen, podemos distinguir una primera etapa, considerada la de mayor actividad eruptiva, que va del 19 de abril al 31 de agosto del año

2006; y una segunda etapa, caracterizada por una muy baja actividad eruptiva, que va de setiembre del año 2006 a diciembre del año 2008.

a) Etapa de mayor actividad eruptiva, entre el 19 de abril y 31 de agosto del año 2006

Los días 20, 21 y 22 de abril, marcan el inicio de una etapa de mayor actividad eruptiva del volcán Ubinas. En esos tres días se produjeron 16 explosiones, varias de ellas audibles hasta un radio de 7 km del volcán. Así mismo, dichos días se produjo un incremento considerable de emisiones de cenizas, la columna eruptiva alcanzó por primera vez entre 2800 y 3000 m de altura sobre la caldera del volcán. Por otro lado el 27 de abril se registra una explosión en el Ubinas, y los pobladores del valle de Ubinas reportan por primera vez emisiones de bloques incandescentes que corresponden a bloques balísticos emitidos por el volcán. En resumen, entre el 20 y 30 de abril se registraron hasta 17 explosiones. Durante el mes de mayo se registraron 23 explosiones, en junio 13, en julio 11 y en agosto 10 explosiones.

Esta etapa está caracterizada por periodos de moderada actividad, que duran entre 2 y 3 semanas aproximadamente, separados por periodos de baja actividad que duran generalmente entre 10 y 14 días. Durante los periodos de mayor actividad, la columna eruptiva alcanzó valores de altura máximos, entre los 1500 y 2500 m sobre la caldera del volcán Ubinas, sin embargo luego de algunas explosiones estas se elevaron incluso entre los 3000 a 4000 m de altura. En esta etapa se han registrado cerca de 73 explosiones, en aproximadamente 130 días, lo cual arroja en promedio 1 explosión cada dos días (Figuras 12 y 13). En función de la altura de la pluma volcánica, alcance de cenizas y duración de las emisiones de cenizas, en esta etapa de mayor actividad eruptiva, el Índice de Explosividad Volcánica (IEV) estimada fue 1.

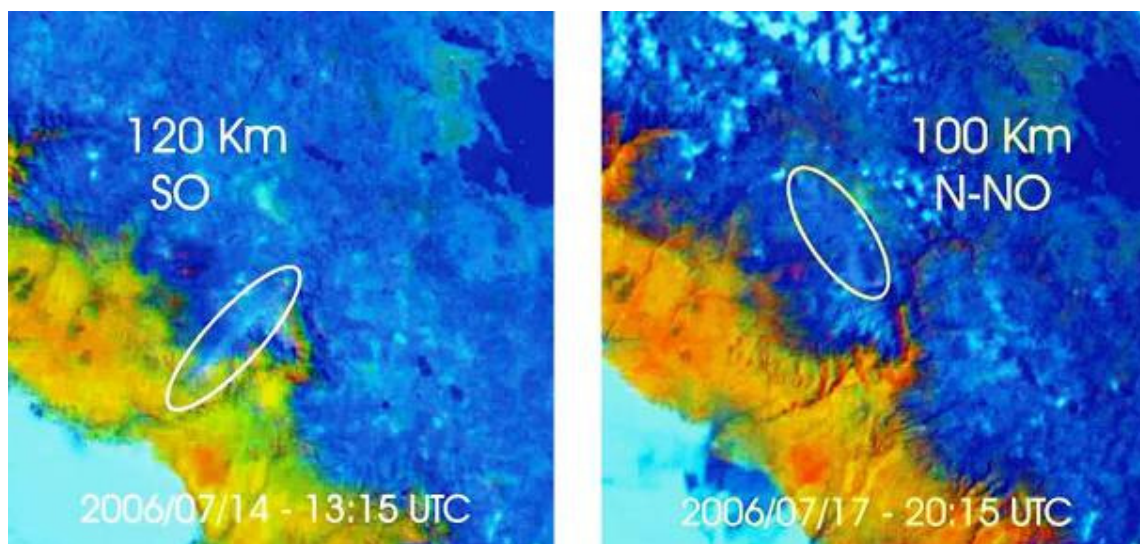


Figura 12. Imágenes desatelite GOES que muestran la dispersión de cenizas los días 14 y 17 de junio del año 2006. La pluma volcánica pudo ser vista entre 100 y 120 km del cráter del volcán..



Figura 13. Columna eruptiva de gases y cenizas del día 01 de junio del 2006. Las cenizas alcanzaron más de 1000 m de altura, fueron dispersadas en dirección SE y cayeron sobre los pueblos del valle de Ubinas.



Figura 14. Columna eruptiva de más de 2000 m de altura, formada poco después de la explosión del día 16 de abril del 2007. Vista tomada desde el flanco SE del volcán Ubinas.

b) Etapa de baja actividad eruptiva, entre setiembre del año 2006 y diciembre del 2008

Desde setiembre del año 2006 a diciembre del 2008, disminuyó considerablemente la actividad eruptiva del volcán Ubinas, respecto al periodo comprendido entre el 19 de abril al 31 de agosto del 2006. Esta nueva etapa de baja actividad está caracterizada por largos periodos de tranquilidad, que pueden durar semanas e incluso meses, y cortos periodos de ligero incremento de actividad, que pueden durar entre 1 y 3 semanas (Figuras 14 y 15), a excepción de uno que duró casi 2 meses (11 de marzo al 27 de mayo del 2007, Figura 14). En resumen, en esta etapa las emisiones de gases y cenizas emitidas fueron de poco volumen, en promedio la pluma volcánica alcanza entre 300 y 700 m de altura sobre la cumbre. Fueron interrumpidas por explosiones de baja energía, luego del cual se forman columnas que se elevan entre 500 y 1500 m de altura sobre la caldera. Estas explosiones fueron muy esporádicas, ocurrieron en promedio una vez cada 20 a 30 días.

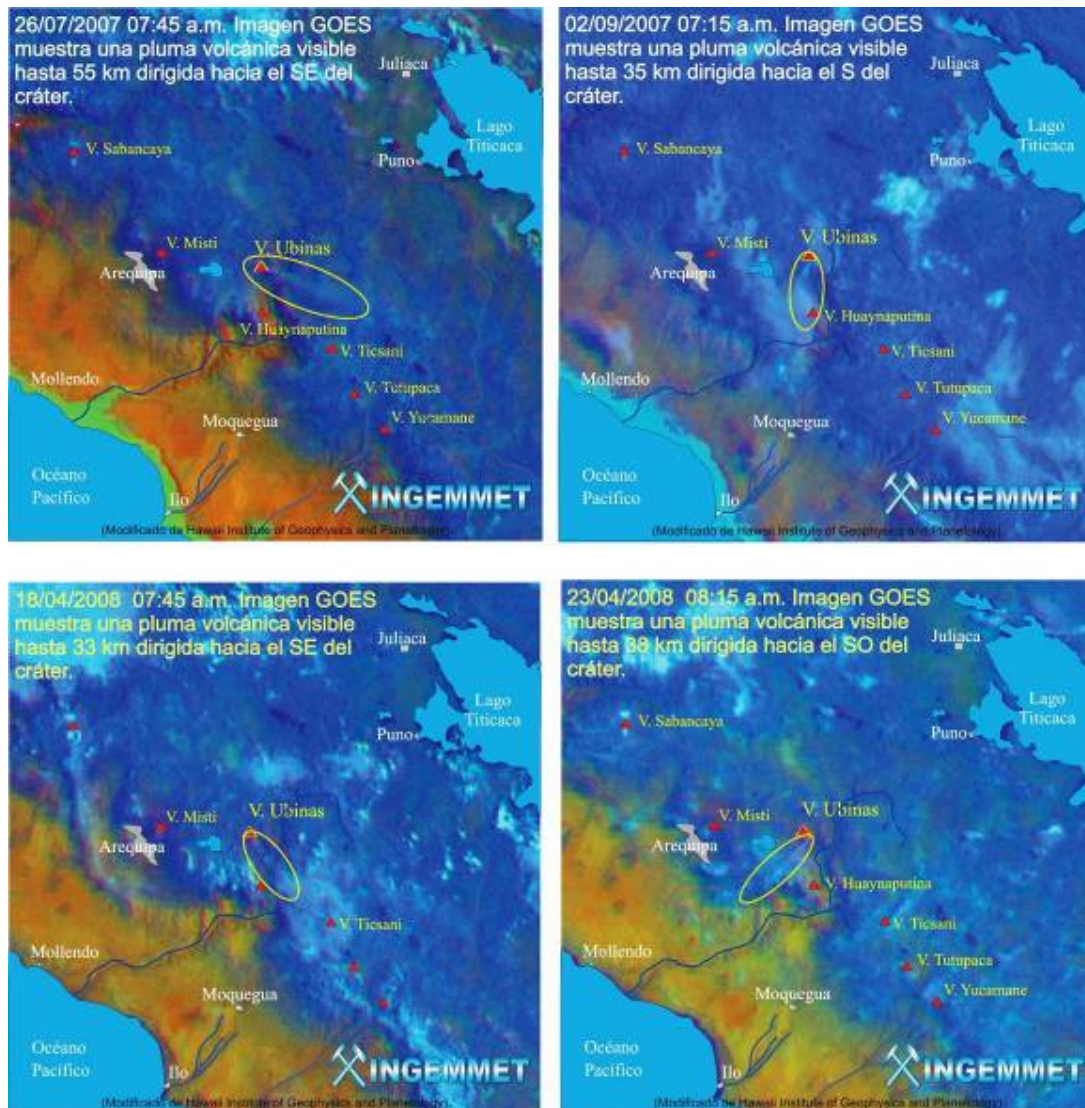


Figura 15. Imágenes de satélite GOES que muestran la dispersión de cenizas luego de las explosiones registradas los días 26 de julio y 2 de setiembre del 2007, así como los días 18 y 23 de abril del 2008.

VI. IMPACTO DE LA ERUPCIÓN EN EL MEDIO AMBIENTE

Los productos emitidos por el volcán Ubinas son principalmente gases volcánicos, cenizas y bombas volcánicas. Los gases se diluyeron tan pronto entraron en contacto con la atmósfera y sus efectos han sido mínimos en el medio ambiente. Las bombas volcánicas o proyectiles balísticos, han alcanzado distancias menores a 2 km, motivo por el cual no han provocado mayor daño a la población, infraestructura y áreas de cultivo.

La mayor afectación al medio ambiente ha sido producido por el emplazamiento de cenizas. Estas partículas poseen menos de 2 mm de diámetro y está conformados por materiales hidrotermalizados, sílice y cristales fragmentados de plagioclasas, anfíboles, piroxenos y óxidos de Fe-Ti. Se han producido importantes lluvias de cenizas dentro de un radio de 12 km, que han afectado el medio ambiente, los principales efectos han sido:

- a) Presencia de partículas finas de ceniza en suspensión en el aire, que provocó baja visibilidad, que duraron algunos minutos e incluso varias horas. También, las cenizas generaron problemas de salud en las personas, principalmente en los habitantes de Querapi, Ubinas, Tonohaya, Sacoaya y Escacha. Los centros de salud de las localidades afectadas, reportaron un considerable incremento de males respiratorios, dermatitis y afecciones estomacales en las personas, provocadas por la ceniza. Así mismo, la erupción generó trastornos psicológicos, principalmente en los niños.
- b) Contaminación de áreas de cultivo, hacia el SE y S del volcán Ubinas. Las finas capas de ceniza provocaron se marchiten las plantas y se pierda la cosecha de papas, maíz, trigo, cebada, alfalfa, y otros productos de pan llevar. Las zonas más afectadas estuvieron restringidas dentro de un radio de 5 a 7 km del cráter, cerca de las localidades de Querapi, Ubinas, Tonohaya, Sacoaya y Escacha.
- c) Contaminación de arbustos y pastos naturales, principalmente el icho, que es alimento de los camélidos, ovinos, ganado vacuno y caprino, pastoreados en los bofedales por encima de los 3600 msnm (Figura 16).
- d) Muerte de animales por ingesta de alimentos contaminados con la ceniza. Esto provocó la muerte de un buen número de camélidos, ovinos, ganado vacuno y caprino.
- e) Generación de lluvias ácidas, básicamente en las temporadas de lluvias, entre los meses de enero y marzo. Se origina por la mezcla de gases volcánicos impregnados en la ceniza y las gotas de lluvia. Las lluvias ácidas originan la contaminación de fuentes de agua, tales como manantiales, quebradas, acequias. La ingesta de agua contaminada provocó males estomacales en las personas y animales.
- f) Emplazamiento de flujos de lodo (lahares), principalmente entre diciembre y marzo, que es la temporada de lluvias. Los flujos de lodo se originan por una mezcla de agua y ceniza. Cabe resaltar la ocurrencia de importantes flujos de lodo a lo largo de la Qda. Infiernillo, Qda. El Volcán y río Ubinas, los días 17 de enero del 2007 (Figura 17), y durante el año 2008, que destruyeron áreas de cultivo asentadas en las riveras del río Ubinas, así como provocaron la interrupción durante algunas horas y días, de las vías carrozables Ubinas-Arequipa y Tonohaya-Ubinas.



Figura 16. Plantaciones de alfalfa, principal alimento de bovinos y ovinos en el valle de Ubinas, fueron cubiertos por ceniza volcánica. La ceniza provocó se marchiten las plantas y se produzca un desabastecimiento de alimentos para los animales (abril, del 2006).



Figura 17. Flujo de lodo (lahar) en el río Ubinas, generado el 17 de enero del 2007, producto de la mezcla de ceniza y agua. Posee entre 0.2 a 1 m de espesor, recorrió más de 10 km del cráter. Estos flujos de lodo afectaron áreas de cultivo en las riveras del río, así como interrumpieron vías de transporte.

XI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El proceso eruptivo se inició el 17 de marzo del año 2006. Entre el 27 de marzo y 18 de abril, tuvo un régimen eruptivo freático, caracterizado por emisiones de cenizas y proyectiles balísticos con un alto porcentaje de componentes hidrotermalizados. A partir del 19 de abril, se inicia un régimen eruptivo magmático de tipo vulcaniano, caracterizado por emisiones de cenizas y periódicas explosiones que eyectan proyectiles balísticos de composición andesítica basáltica.
- La etapa de mayor actividad eruptiva se produjo entre el 19 de abril y 31 de agosto del 2006, luego del cual el proceso eruptivo disminuyó sustancialmente. En la etapa de mayor actividad, se han registrado cerca de 73 explosiones, en aproximadamente 130 días, lo cual arroja en promedio 1 explosión cada dos días.
- En función de la altura de la pluma volcánica, alcance de cenizas y duración de las emisiones de cenizas, en la etapa de mayor actividad eruptiva, el Índice de Explosividad Volcánica (IEV) estimada fue 1.
- El mayor impacto ambiental, ha sido originado por el emplazamiento de cenizas, que afectaron principalmente hasta un radio de 12 km alrededor del volcán. Las cenizas generaron: a) contaminación de áreas de cultivo, que provocaron se marchiten las plantas y se pierda la cosecha de papas, maíz, trigo, cebada, alfalfa, y otros productos de pan llevar, principalmente el año 2006, en las localidades de Querapi,

Ubinas, Tonohaya, Sacoaya y Escacha; b) contaminación de arbustos y pastos naturales, principalmente el icho, que originó la muerte de camélidos, ovinos, ganado vacuno y caprino, por la ingesta de los pastos contaminados con la ceniza; c) lluvias ácidas, básicamente en las temporadas de lluvias, entre los meses de enero y marzo, que eventualmente originaron la contaminación de fuentes de agua; d) problemas de salud en las personas, principalmente en los habitantes de Querapi, Ubinas, Tonohaya, Sacoaya y Escacha, los centros de salud de dichas localidades reportaron incremento de males respiratorios, dermatitis y afecciones estomacales en las personas. Finalmente, se generaron flujos de lodo (lahares), normalmente entre diciembre y marzo de los años 2007 y 2008. El más importante de ellos ocurrió el 17 de enero del 2007, el lahar descendió por el río Ubinas y afectó áreas de cultivo e interrumpió por varios días las vías carrozables Ubinas-Arequipa y Tonohaya-Ubinas.

- Durante los años 2005 y 2006, en la fuente UBT, los valores del anión SO_4^{2-} fluctuaron entre 400 y 1050 mg/L, pero a partir de enero del 2007 hasta todo el 2008, dichos valores se incrementaron ligeramente y fluctuaron entre 1000 y 1240 mg/L. En el caso del anión Cl^- , este se incrementó ligeramente entre enero y marzo del año 2006, sus valores se ubicaron entre 340 y 380 mg/L, y coincide con el periodo previo al inicio de la crisis eruptiva. Así mismo, se han observado las mayores variaciones en los valores de los cationes Na, Ca y K, entre fines de marzo y los primeros días de agosto del año 2006, que coincide con el periodo de mayor actividad eruptiva, que se registró entre el 19 de abril y 31 de agosto del 2006.
- En la fuente UBT, los mayores valores de pH se obtuvieron durante el mes de junio del año 2006, cuando fluctuaron entre 6.5 y 7. En el caso de la temperatura, este se incrementó nítidamente entre abril y agosto del año 2006, periodo en que variaron entre 30 y 42.5 °C. Los mayores valores del pH y la temperatura registrados, coinciden con el periodo de mayor actividad eruptiva.
- En el año 2006 las variacionesEs necesario conocer la profundidad y dimensiones de la cámara magmática del volcán Ubinas, para lo cual se recomienda implementar estudios geofísicos, tales como tomografía sísmica y gravimetría.
- Se recomienda continuar con el monitoreo geoquímico, geodésico y de la fenomenología diaria del volcán Ubinas. Así mismo, implementar sistemas de telemetría a fin de contar con información en tiempo real de los distintos métodos de monitoreo.

REFERENCIAS

BEROLATTI, R. (2006) - Plan de contingencia ante el incremento de la actividad del volcán Ubinas. Comité Regional de Defensa Civil de Moquegua, 80 p.

MARIÑO, J., RIVERA, M., CRUZ, V., CACYA, L., THOURET, J-C. (2006) - Informe de trabajos efectuados por el INGEMMET durante la crisis volcánica del volcán Ubinas, periodo marzo a julio del 2006. Informe Técnico inédito. Lima: INGEMMET, 77 p.

MARIÑO, J., RIVERA M. (2008) - Mapa de peligros del volcán Ubinas: avances en la socialización de la información geocientífica. *Revista Estrategia Internacional Para la Reducción de Desastres, Naciones Unidas*, Nro. 14, 4 p.

MASÍAS, P., ANTAYHUA, Y., CRUZ, V., MARIÑO, J., RIVERA, M. (2008) - Variations in temperature into "Ubinas Termal" hot spring related to the eruptive activity of the Ubinas Volcano, during 2007-2008. En: 10th IAVCEI, Gas Workshop, México, 2008.

RIVERA M. (1998) - "El volcán Ubinas (sur del Perú): geología, historia eruptiva y evaluación de las amenazas volcánicas actuales". Tesis Geólogo, UNMSM. 132 p.

RIVERA, M., TAVERA, H., AGUILAR, V., MEDINA, J., LÁZARES, F., MARIÑO, J., CRUZ, V., CACYA, L., MINAYA, A. (2006) – Crisis sísmica de Calacoa, Moquegua, Octubre 2005. Lima: Publicación Especial Multi-institucional, 95 p.

RIVERA, M., MARIÑO, J., CACYA, L., THOURET, J.C., CRUZ V., LÓPEZ M. (2007) - Volcán Ubinas: Actividad eruptiva 2005-2007 y características de productos emitidos. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, Vol. 102, 5-23.

SIMKIN T., SIEBERT. (1994) –Volcanoes of the World – A Regional Directory, Gazetteer and chronology of volcanism during the last 10,000 year. Smithsonian Institution, Global Volcanism Program, Washington DC.

THOURET J.C., RIVERA M., WORNER G., GERBE M.C., FINIZOLA A., FORNARI M., GONZALES K. (2005) - Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Peru. *Bull Volcanol*; 67: 557 – 589.