

INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO Y METALÚRGICO

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

**INFORME TÉCNICO
GEOLOGÍA AMBIENTAL**

**ESTUDIO DE PRODUCTOS EMITIDOS POR EL VOLCÁN
MISTI DURANTE LOS ÚLTIMOS 10,000 AÑOS**

Por:

Marco RIVERA

Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico

Oficina de Volcanología - Arequipa



DICIEMBRE - 2009

LIMA - PERU

CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN.....	4
	I.1 Ubicación y contexto geológico	4
	I.2 Objetivos	6
	I.3 Metodología de trabajo.....	7
	I.4 Estudios anteriores	9
II.	SINTESIS ESTRATIGRÁFICA GENERAL	10
III.	ESTRATIGRAFIA DE DEPÓSITOS DEL MISTI < 10,000 AÑOS	12
	III.1 Depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas	12
	III.2 Depósitos de caída de lapilli pómez	14
IV.	ESTUDIO DE LOS PRINCIPALES DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS RECIENTES	18
	IV.1 Erupción de hace 2000 años A.P.	18
	IV.1.1 Caída de lapilli pómez	18
	IV.1.2 Flujos piroclásticos ricos en pómez de hace 2000 años A.P.	21
	IV.1.3 Depósitos de flujos de escombros (lahares)	23
	IV.2 Actividad del Misti en el siglo XV.....	26
V.	ACTIVIDAD ERUPTIVA OCURRIDA EN ÉPOCA HISTÓRICA	28
	V.1 Conclusiones sobre la actividad histórica	32
VI.	CARACTERÍSTICAS DE LA ACTIVIDAD EXPLOSIVA OCURRIDA <10,000 AÑOS EN BASE AL ESTUDIO DE LOS DEPÓSITOS	34
	VI. 1 Características de la actividad ocurrida entre 10,000 y 2000 años	34
	VI. 2 Características de la actividad ocurrida hace 2000 años	34
	VI. 3 Características de la actividad volcánica ocurrida hace menos de 2000 años	35
	CONCLUSIONES	37
	REFERENCIAS	39

Resumen

Se ha efectuado un estudio tefroestratigráfico de productos volcánicos emitidos durante los últimos 10,000 años por el volcán Misti. Según este estudio en áreas aledañas al volcán, principalmente al pie de los flancos SO, Sur y SE, se distinguen al menos ocho depósitos delgados de caída de lapilli pómez, y cenizas, y algunos depósitos de flujos piroclásticos. Los depósitos de caída de lapilli pómez miden entre 40 a 8 cm de espesor (a 6 km al suroeste del volcán), y son visibles hasta distancias menores a 40 km del volcán, en donde miden menos de 1 cm. Estos depósitos en áreas aledañas al volcán son masivos, y la mayoría contienen pómez amarillentas (algunas hidrotermalizadas) y fragmentos líticos lávicos oxidados e hidrotermalizados. Mientras que los depósitos de cenizas miden entre 15 y 8 cm de espesor. Estos depósitos son de colores grises y la mayoría se encuentran removidos. Por su parte, los flujos piroclásticos son visibles en el cono superior del volcán, y uno de ellos el más voluminoso (erupción de hace 2000 años) es visible en la mayoría de quebradas que drenan del flanco sur.

Resultados de este estudio muestran que uno de los depósitos mejor preservados y de amplia dispersión en el área de Arequipa lo constituye el depósito de caída de lapilli pómez de la erupción pliniana de hace 2000 años del volcán Misti. Este depósito mide hasta 40 cm de espesor, a 8 km al pie del flanco suroeste del volcán y su espesor decrece gradualmente hasta medir 8 cm en la ciudad de Arequipa (18 km al suroeste del cráter). Esta erupción también generó depósitos de flujos de pómez y cenizas que miden hasta 12 m de espesor (a 8 km al pie del flanco sur). Estos depósitos se hallan canalizados en las principales quebradas que drenan hacia la ciudad de Arequipa (San Lazaro, Huarangal, Agua Salada). Asociados a la erupción de hace 2000 años se distinguen depósitos de flujos de barro (lahares), que yacen sobre los depósitos de flujos de pómez y cenizas y miden hasta 3 m de espesor.

En áreas aledañas al volcán Misti también se distingue un depósito de cenizas fina de color gris, que tiene entre 1 y 2 cm de espesor en la ciudad de Arequipa. Este depósito perteneciente a la erupción del siglo XV, sobreyace al depósito de la erupción pliniana de hace 2000 años. El cartografiado geológico muestra que este depósito tuvo una dispersión variable, pero con mayor predominio hacia el oeste y suroeste del volcán.

Por otro lado, las crónicas históricas mencionan la ocurrencia de erupciones explosivas leves los últimos 500 años, sin embargo en el campo no fue posible reconocer depósitos ligados a tales erupciones, posiblemente por que los depósitos fueron muy delgados y fueron fácilmente erosionados por los vientos.

Debido a la presencia de depósitos de caídas de tefras de colores amarillentos (hidrotermalizados) y la presencia de fragmentos de líticos lávicos (hidrotermalizados y alterados) que tienen espesores delgados, se puede afirmar que la actividad ocurrida los últimos 10,000 años fue principalmente de tipo explosiva moderada: erupciones freatomagmáticas y vulcanianas. Solamente una de las erupciones más explosivas corresponde a la erupción pliniana de hace 2000 años. Desde el punto de vistas de peligros y riesgos en una eventual reactivación del volcán Misti se puede pensar que la actividad tendería a ser explosiva moderada, probablemente similar a las erupciones recientes y/o históricas (similar a las ocurridas los últimos 1000 años), y con posibilidades de afectar a la ciudad de Arequipa, debido a las caídas de cenizas y/o ocurrencia de lahares.

I. INTRODUCCIÓN

I.1 Ubicación y contexto geológico

El volcán Misti (16°17' S, 71°24' O, 5822 m.s.n.m.) es uno de los siete volcanes activos situado en la cadena volcánica Plio-Cuaternaria del sur peruano. Este volcán se encuentra localizado en la Cordillera Occidental de los Andes del sur peruano (Fig. 1), a 17 km del centro de la ciudad de Arequipa. Ciudad, en cuanto a población, es considerada como la segunda ciudad del Perú, con aproximadamente 1 millón de habitantes. Numerosos autores han estudiado la estratigrafía del volcán Misti que se ha iniciado hace ~833 ka (e.g. Suni, 1999; Navarro, 2000; Thouret et al., 2001; Legros, 2001).

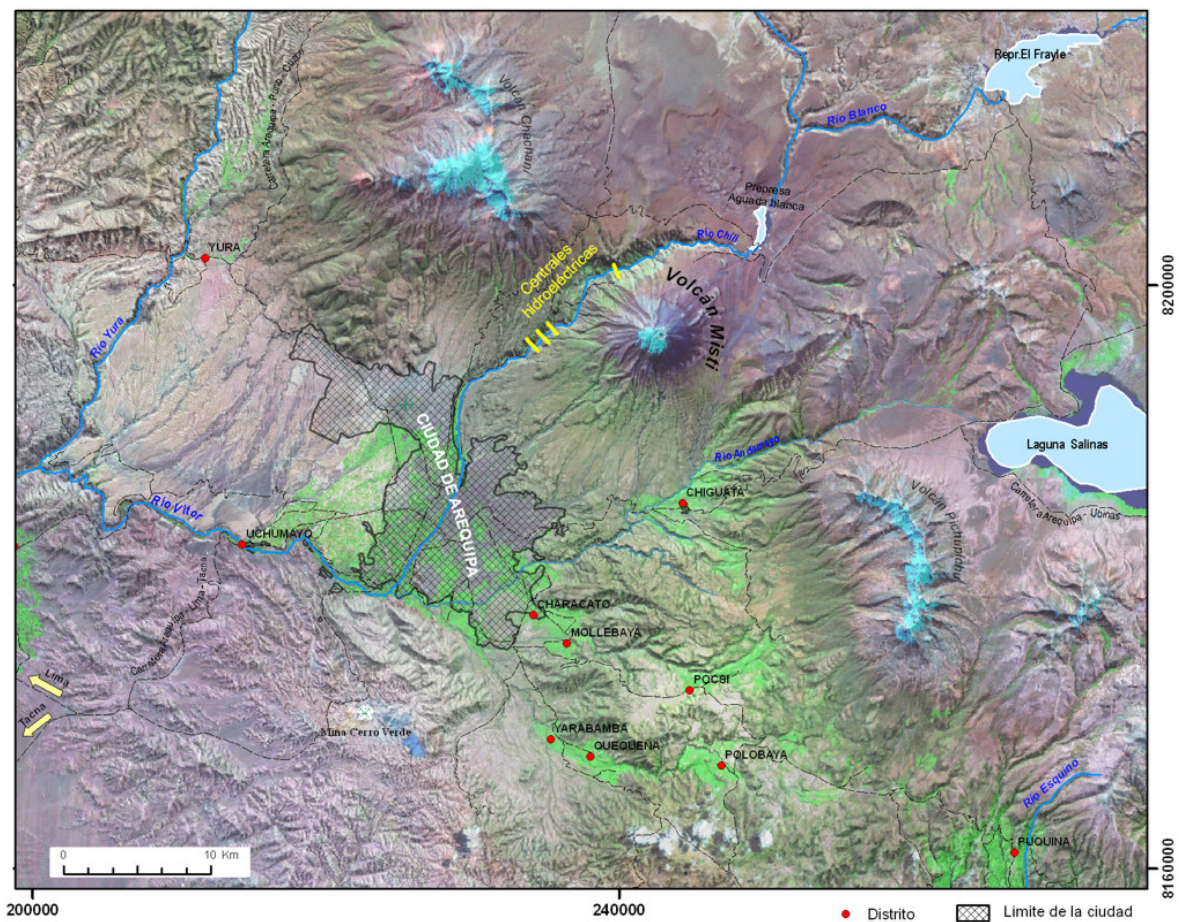


Fig. 1. Mapa de localización del volcán Misti y la ciudad de Arequipa.

Thouret *et al.* (2001) han dividido en cuatro etapas la evolución de este volcán: "Misti 1" (833 - 112 ka), "Misti 2" (112 - 40 ka), "Misti 3" (38 - 14 ka) y "Misti 4" (<11 ka). Los últimos 112 ka, el Misti a presentado variados tipos de dinamismos eruptivos: erupciones

explosivas (plinianas, sub-plinianas freatomagmáticas, vulcanianas), erupciones efusivas y episodios de construcción y destrucción de domos, así como fenómenos de inestabilidad de flanco que han generado al menos dos depósitos de avalancha de escombros (Thouret et al., 2001; Legros, 2001).

Localmente, el volcán Misti es uno de los volcanes jóvenes ubicado dentro de un grupo de volcanes antiguos del Plio-Pleistoceno, que comprende el complejo volcánico Chachani al Noroeste (> 1 Ma) y el extinto complejo volcánico Pichu-Pichu al Sureste (>2 Ma). El volcán Misti presenta una forma cónica, cuya parte media y alta posee pendientes mayores a 40° , mientras que la parte inferior poseen pendientes menores a 20° . Por otro lado, la parte inferior del edificio en su sector Sur y SE está surcado por quebradas y torrenteras con paredes verticales que tienen entre 20 a 120 m de profundidad (Quebradas San Lazaro, Huarangal, Agua Salada y Honda).

Dado la cercanía de la ciudad de Arequipa y teniendo en cuenta el comportamiento eruptivo presentado por el volcán Misti a lo largo de su historia eruptiva, consideramos que es importante estudiar las erupciones pasadas, para conocer mejor el alcance y distribución de los materiales que fueron emitidos por este volcán, con fines de prevención y mitigación de desastres. En este trabajo nosotros presentamos resultados del estudio estratigráfico y geológico de los depósitos emplazados los últimos 10,000 años, lo cual complementará el conocimiento que se tiene sobre el Misti hasta hoy en día, sobre características de los depósitos emitidos recientemente por este volcán.

Datos respecto a las características de erupciones presentadas por el Misti durante los últimos miles de años ($<10,000$ años) y los efectos e impactos asociados en áreas aledañas son datos primordiales que servirán en la evolución de peligros, ya que este volcán es activo y en un futuro puede reactivarse tal como lo hizo el volcán Ubinas, situado en el departamento de Moquegua (Rivera et al., 2007).

I.2 Objetivos

Entre los objetivos propuestos para este estudio tenemos:

- Estudiar la estratigrafía de los depósitos emitidos los últimos 10,000 años con el fin de interpretar el tipo de comportamiento eruptivo que tuvo el volcán Misti durante este tiempo, y de esta manera contribuir en la prevención y mitigación de desastres frente a una eventual reactivación de este volcán.
- Estudiar las características de los depósitos (tipo, área de dispersión, frecuencia) para interpretar el tipo y estilo eruptivo que los ha producido.
- Establecer una tefroestratigráfica detallada de los eventos explosivos del volcán Misti en los últimos 10,000 años A.P.

I.3 Metodología de trabajo

La metodología seguida para la elaboración del presente trabajo se dividió en tres etapas:

I.3.1 Primera etapa: Trabajos de gabinete

Este trabajo consistió en:

- Recopilación de material bibliográfico relacionado a determinar características de los eventos eruptivos históricos, recientes y la geología del volcán.
- Procesamiento de imagen de satélite Landsat TM, del año 1997 del volcán Misti y alrededores, a escala 1:50 000, para determinar la distribución de los depósitos.
- Fotointerpretación geológica de fotografías aéreas a escala 1:42,000 pertenecientes al IGN y correspondientes al año 1955.
- Elaboración de un Modelo Numérico Digital del área del volcán Misti a partir del mapa topográfico a escala 1:25 000 elaborado por el PETH. El cual sirvió como plano base para sobreponer los datos de campo, como ploteo de isópacas, etc.

I.3.2 Segunda etapa: Trabajos de campo

Los trabajos de campo permitieron el cartografiado geológico y estudio estratigráfico de los diversos productos volcánicos emitidos por el volcán Misti los últimos 10,000 años

con el objeto de determinar la secuencia estratigráfica, la edad relativa, el comportamiento eruptivo y la distancia hasta donde se desplazaron los depósitos piroclásticos del volcán Misti. Se contó con dos salidas de campo, las cuales se dieron en forma alternada con los trabajos de gabinete.

1^{ra} salida de campo

- Se llevó a cabo en agosto del 2009. El trabajo de campo se inició con el reconocimiento geológico y cartografiado de depósitos que afloran en los flancos SE y sur del volcán.
- Se efectuaron levantamientos de columnas estratigráficas en las quebradas Pastores, Agua Salada y San Lazaro.
- Se efectuó el muestreo de los diversos depósitos de caídas de tefras para análisis químicos y análisis sedimentológicos.

2^{da} salida de campo

- Se efectuó entre el 14 al 22 de septiembre del 2009 en el cual se prosiguió con el cartografiado geológico y el muestreo de los diversos depósitos volcánicos que afloran al pie del flanco Sur del volcán Misti.
- Se prosiguió con el levantamiento de columnas estratigráficas de los depósitos recientes en las quebradas Honda y Guarangeros, y en el sector de Charcani.
- Cartografiado geológico y estudio estratigráfico de tefras correspondientes a erupciones históricas en el flanco norte del volcán (represa Aguada Blanca).

I.3.3 Tercera etapa: Trabajo de gabinete y redacción del informe

- Reinterpretación de la imagen de satélite Landsat TM 1997.
- Envío de muestras de rocas a los laboratorios de química y análisis de los resultados.
- Elaboración de gráficos.
- Elaboración de los mapas de isópacas de los depósitos de caída de hace 2000 años y del siglo XV del volcán Misti.
- Redacción del informe final.

I.4 Estudios anteriores

A lo largo de los últimos 20 años, se han efectuado diversos estudios estratigráficos, geológicos, volcanológicos y de evaluación de peligros del volcán Misti. Los primeros y más importantes trabajos fueron de Suni (1999), Navarro, (2000), Legros (2001) y Thouret et al. (2001). Thouret et al., (2001) establecen la estratigrafía, historia eruptiva, características geoquímicas de sus productos y se efectuaron una evaluación preliminar de los peligros volcánicos. Por otro lado, Legros (2001), incide en un análisis de la evolución volcanológica, y estudio mineralógico y geoquímico de tefras emplazadas principalmente en los últimos 40 mil años.

Asimismo, Delaite et al. (2005), presentó un estudio estratigráfico de tefras y lahares, enfatizando sobre estos últimos, ligados a la actividad del volcán Misti. Delaite et al. (2005) efectuaron el estudio de lahares y mediante dataciones C^{14} y determinaron edades de emplazamiento de lahares ocurridos hace 300, 500, 1000 y 2000 años A.P. Asimismo, Delaite et al. (2005) efectuaron un modelamiento sobre la distribución de lahares, en caso de futuras erupciones. Además efectuaron un análisis de los peligros volcánicos, estableciendo para el Misti tres escenarios eruptivos: bajo, moderado y alto.

Por otro lado Harper et al. (2006), realizan un estudio sedimentológico, estratigráfico y la distribución del depósito de lahar asociado a la erupción pliniana (la última erupción de gran magnitud del Misti) de hace 2 mil años, llegando a definir hasta tres unidades principales del depósito.

Finalmente, Mariño et al., (2007) realizaron el cartografiado geológico del Misti a escala 1/25000, donde diferencian los diversos depósitos emitidos por este volcán, y elaboraron un Mapa de Peligro Volcánico a escala 1/50000, la cual es actualmente empleado en los planes de Ordenamiento Territorial por las autoridades y la población de Arequipa.

Los diversos autores mencionados anteriormente han estudiado con poco detalle los productos emitidos los últimos 10,000 años por el volcán Misti. Nosotros consideramos importante este estudio, pues en una próxima reactivación este volcán como muchos otros volcanes activos tiene una tendencia a presentar una actividad similar a la presentada en las últimas erupciones.

II. SINTESIS ESTRATIGRÁFICA GENERAL

Según estudios geológicos efectuados por Thouret et al. (2001), y Legros (2001), el Misti se ha formado en cuatro grandes etapas evolutiva denominadas: “Misti 1” (entre 833 – 112 ka); “Misti 2” (entre 112 – 40 ka), “Misti 3” (38 – 11 ka) y “Misti 4” (< 11 ka hasta la actualidad), durante el cual a emitido variados tipos de depósitos como es visualizado en el mapa geológico presentado en este trabajo (Fig. 3). El estrato-cono volcánico se ha edificado sobre una serie de ignimbritas riolíticas y depósitos volcanoclásticos del Mioceno y Pleistoceno visibles en el cañón del río Chili. Las ignimbritas según Paquereau-Lebti et al. (2006) son de tres tipos: la primera denominada **“Río Chili”** (~300 m de espesor) datadas en 13.19 ± 0.09 Ma; la segunda **“La Joya”** datada en 4.89 ± 0.02 Ma, conocida como sillar de Arequipa (Jenks y Goldich, 1956); y la tercera denominada la ignimbrita **“Aeropuerto de Arequipa”**, conocida como salmón por su color rosáceo, y datada en 1.65 ± 0.04 Ma. Este último depósito fue asignado por Guevara, (1968) y Vargas (1970) como volcánico Sencca.

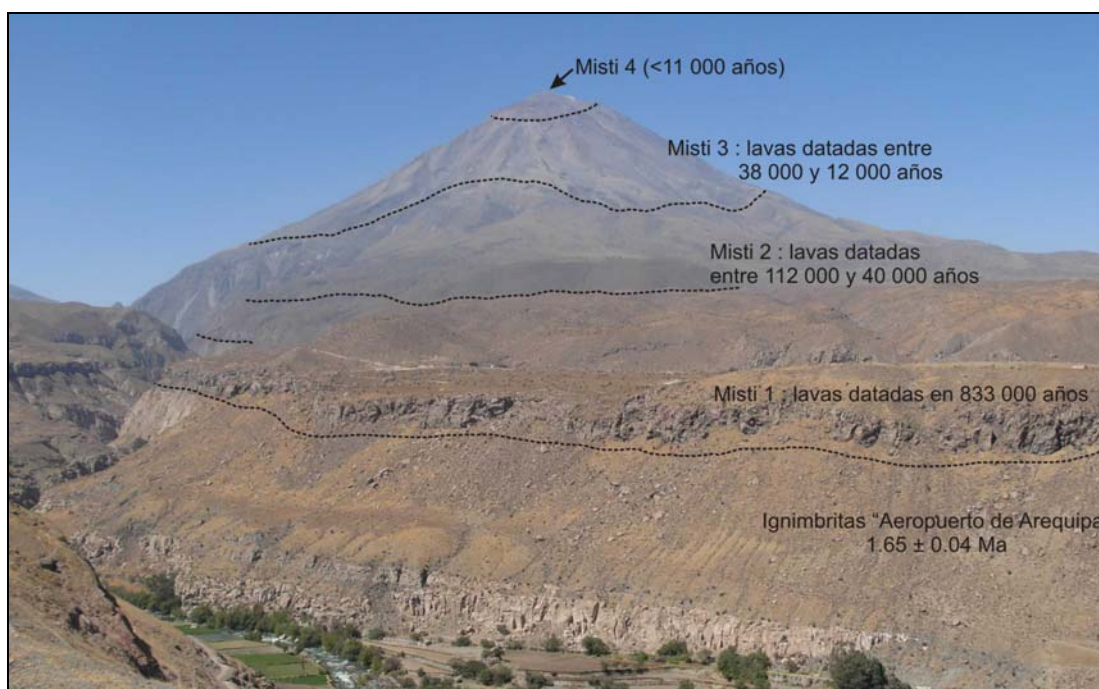
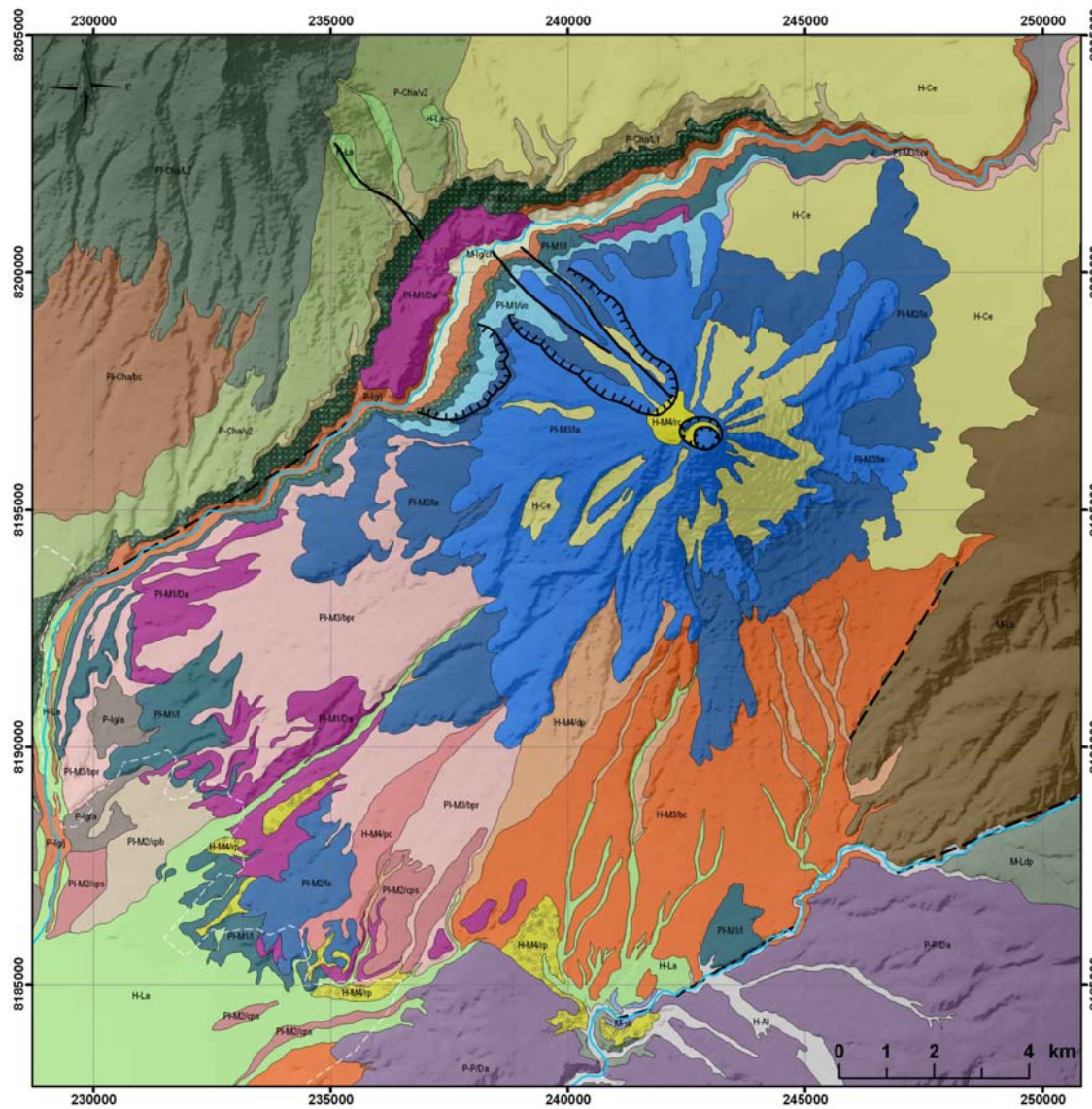


Fig. 2 Vista del flanco suroeste del volcán Misti y el valle del río Chili. En ambas márgenes del río Chili se distinguen ignimbritas riolíticas datadas en 1.6 Ma (Paquereaut-Lebti et al., 2006).



EDAD	UNID	DEPOSITOS	
HOLOCENO	Misti 4	H-AI	Depósitos aluviales
		H-La	Lahares
		H-Ce	Depósitos de ceniza gris del siglo XV
		H-M4/dp	Depósitos de coladas de pómez y ceniza de 2 ka
		H-M4/rc	Depósitos de caída de ceniza de <100 ka
		H-M4/rp	Depósitos de caída de pómez y ceniza de menos de 11 ka
PLOCENO	Misti 3	H-M3/bc	Secuencia de coladas de bloques y ceniza emplazado entre 13 y 11 ka
		PI-M3/bpr	Secuencia de coladas de bloques y ceniza, pómez y ceniza y caídas piroclásticas de <40ka
		PI-M3/a	Coladas de lava andesítica del cono superior
	Misti 2	PI-M2/cpb	Depósitos de colada de pómez y ceniza y coladas de bloques y ceniza
		PI-M2/cps	Depósito de coladas de pómez y ceniza, y coladas de escoria
		PI-M2/a	Coladas de lava andesítica del cono inferior
Misti 1	PI-M1/Da	Avalancha de escombros	
	PI-M1/vo	Secuencia volcanoclastica	
	PI-M1/l	Coladas de lava andesítica del estratocono antiguo	
Chachani	PI-Cha/bc	Coladas de bloques y ceniza	
	PI-Cha/L2	Coladas de lava andesítica	
	P-Cha/L1	coladas antiguas de lava andesítica	
	P-Cha/v2	Secuencia volcanoclastica y depósitos de caída de tefras	
		Depósitos volcanoclasticos	
Fm. Capillone	P-P/Da	Avalancha de escombros del volcán Pichu Puchu	
	P-Ig/a	Ignimbrita "Aeropuerto" (2,42 a 1,64 Ma)	
	P-Ig/j	Ignimbrita "La Joya" (4,88 Ma)	
	M-Ig/ch	Ignimbrita "Rio Chili" (13,19 Ma)	
	M-La	Lavas andesíticas	
	M-Ldp	Lavas y depósitos de coladas piroclásticas alteradas	
	M-si	Secuencias de limolitas y arcillas blancas estratificadas	

	Falla		Falla inferida
	Cráter		Escarpa
	Ciudad de Arequipa		

Fig. 3 Mapa geológico del volcán Misti (après Thouret *et al.*, 2001).

III. ESTRATIGRAFÍA DE DEPÓSITOS DEL MISTI < 10,000 AÑOS

Los estudios estratigráficos realizados en el año 2009 dentro del Proyecto GA-36, muestran que los productos emitidos por el volcán Misti durante los últimos 10,000 años consisten en algunos depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas, y principalmente depósitos de caída de tefras (lapilli pómez y cenizas). Asimismo en este periodo se depositaron lahares, ligados a determinados eventos eruptivos aún poco conocidos.

Las secuencias volcánicas recientes se distinguen en las diversas laderas y quebradas que drenan del volcán Misti. Específicamente, los afloramientos donde se pueden diferenciar secuencias bastante completas de erupciones recientes se localizan al pie del flanco NO (Pampa Bateones, a 3100 msnm.), también en la trocha carrozable que conduce a las torres de alta tensión del cerro Pacheco, en la carretera Arequipa – Escuela de Policías (a 3100 msnm), y en algunas quebradas que drenan del flanco sur del Misti, entre ellas las quebradas Pastores u Honda.

Según Thouret et al., (2001), entre 13,000 et aproximadamente 10,000 años el Misti ha producido el emplazamiento de domos de lava, los cuales produjeron depósitos de bloques y cenizas. Después de este tipo de actividad, el Misti pasó a presentar una actividad netamente de tipo explosiva. A continuación se realiza una descripción de los depósitos según la secuencia estratigráfica, y tipos de afloramientos encontrados.

III.1 Depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas

Dentro de un radio de 10 km al Oeste, Suroeste y Sur del piedemonte del volcán Misti, específicamente en la Pampa Bateones, Cerro Pulpito y pampa de Tambillo, quebradas Huarangal, Pastores (Fig. 4), Honda y Grande (flanco sur del volcán Misti) se distinguen al menos tres depósitos de flujos de bloques y cenizas que registran la construcción y destrucción repetida de domos de lavas ocurrida hacia el final de la última glaciación (Thouret et al., 1997; Seltzer, 1990). Estos flujos piroclásticos contienen bloques de lavas densos subangulares que miden entre 0.1 y 0.8 m de diámetro, contenidos dentro de una matriz de cenizas. Estos flujos piroclásticos son masivos, no soldados y tienen entre 2 y 8 m de espesor. Los flujos son de color gris oscuro.

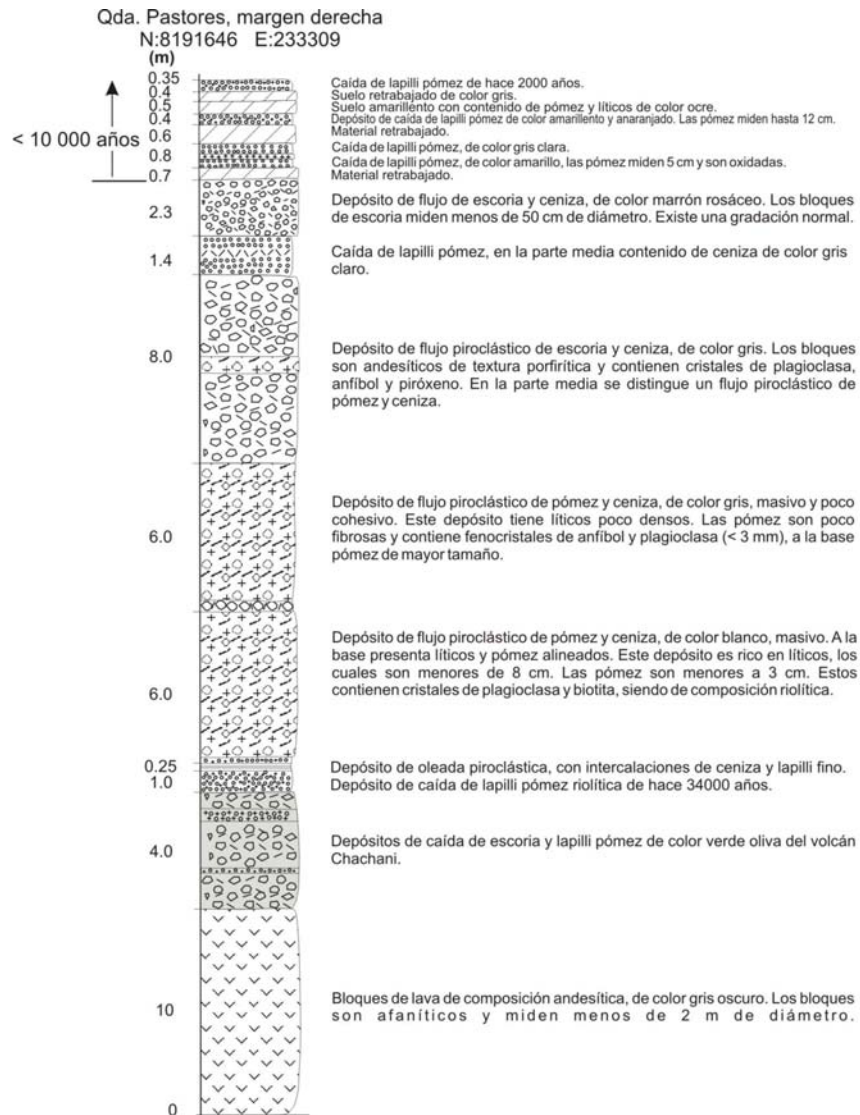


Fig. 4 Columna estratigráfica de la Quebrada Pastores (8 km al pie del flanco suroeste del Misti), donde se distinguen secuencias de menos de 40,000 años, y en la parte superior secuencias de menos de 10,000 años.

III.2 Depósitos de caída de lapilli pómez

En diversas áreas aledañas al volcán Misti se distinguen secuencias de caídas de pómez dispuestas en capas que miden entre 15 y 45 cm de espesor. Nosotros hemos efectuado un levantamiento de columnas estratigráficas en diversos sectores donde afloran depósitos recientes del volcán Misti, y hemos establecido una secuencia estratigráfica en base a la estratigrafía ya establecida en el Misti (e.g. Thouret et al., 2001; Legros, 2001). Lastimosamente los depósitos recientes son poco voluminosos y la mayoría de ellos no tienen una amplia distribución, por la cual no ha sido posible distinguirlos alrededor del volcán Misti, lo que dificulta la correlación estratigráfica.

A continuación vamos hacer una descripción de secciones típicas distinguidas en pocos sectores como: sector los tres arbolitos, y la carretera Arequipa-Escuela de Policías (Charcani II), donde es posible distinguir secuencias completas aún preservadas.

En el sector de tres arbolitos (8 km al pie del flanco Oeste del Misti) (Fig. 5) distinguimos al menos 8 depósitos de caídas de lapilli pómez que miden entre 15 et 45 cm de espesor. Estos depósitos están intercalados con delgados niveles de cenizas de color gris oscuro. En este sector, en la base de la secuencia se distinguen depósitos de caída de pómez de colores gris claro, pero hacia el tope se distinguen depósitos de caída de pómez de color amarillento. Estos últimos pueden evidenciar una actividad hidrotermal. Los depósitos en su mayoría presentan una gradación normal de las pómez. Los fragmentos líticos corresponden a lavas de tamaños centimétricos y no presentan gradación alguna. Los fragmentos de lava más alterados o hidrotermalizados están presentes en los niveles amarillentos. En general, las pómez miden hasta 4 cm de diámetro, mientras que los fragmentos líticos miden menos de 3 cm de diámetro. El poco diámetro de las pómez, y el delgado espesor de los depósitos sugieren que los eventos fueron de mediana magnitud (<3 IEV), ligados a erupciones sub-plinianas, freatomagmáticas (niveles amarillentos). Mientras que los depósitos de cenizas pueden corresponder a eventos vulcanianos. La falta de suelos entre las capas de tetras, sugiere que las erupciones se han sucedido de manera muy rápida y/o seguida en el tiempo.

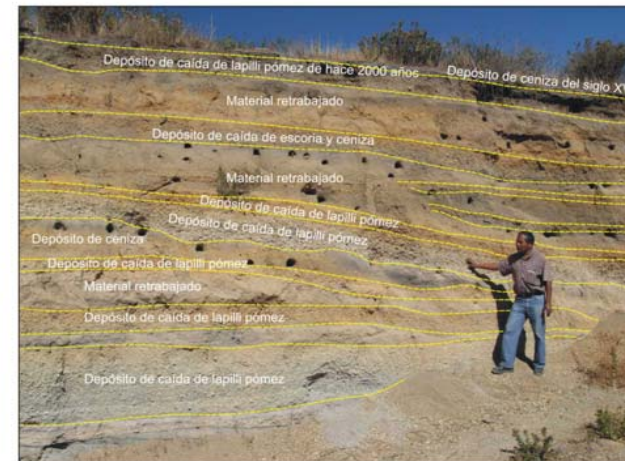
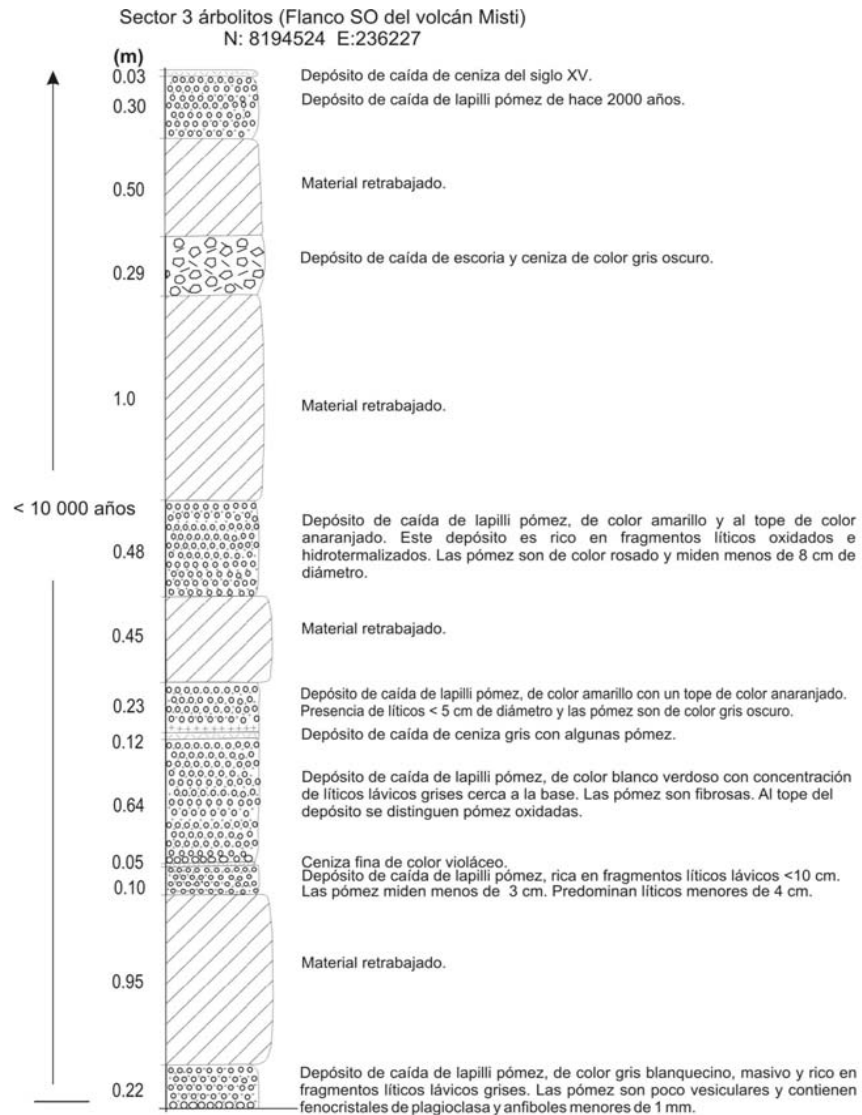


Fig. 5 Columna estratigráfica en el sector tres árbolitos (8 km al pie del flanco oeste del Misti), donde se distinguen secuencias recientes del volcán Misti.

En la carretera Arequipa - Escuela de Policías (10 km al Noroeste del volcán Misti), cerca al sector de Charcani (Fig. 6) distinguimos al menos tres depósitos delgados de caídas de lapilli pómez que miden entre 15 et 40 cm de espesor, dispuestos de manera horizontal. Estos depósitos fueron emplazados en los últimos 10,000 años. Estos depósitos están intercalados con niveles delgados de cenizas de colores grises. Algunos de estos últimos depósitos se encuentran retrabajados por la acción del viento. En este sector los depósitos de caída de lapilli pómez se caracterizan por presentar pómez de colores amarillentos que pueden evidenciar una actividad hidrotermal. En estos depósitos, las pómez miden hasta 4 cm y presentan una gradación inversa. Mientras que los fragmentos líticos, la mayoría son alterados e hidrotermalizados y miden menos de 3 cm. La falta de suelos sugiere que las erupciones se han sucedido de manera seguida en el tiempo. Es necesario resaltar que en la base de la secuencia se distingue un depósito de lapilli pómez blanquecino de 0,6 cm de espesor que corresponde al depósito denominado “La Autopista” que fue emplazado entre 21 y 11 ka por el Misti (Thouret et al., 2001; Cacya, 2006).

Los delgados depósitos de lapilli pómez de colores amarillentos pueden corresponder a erupciones freatomagmáticas, considerando que los depósitos contienen gran cantidad de fragmentos hidrotermalizados, y pocos fragmentos juveniles.

Es necesario precisar que en la parte de la superior de la secuencia se distinguen dos depósitos bien preservados, estos corresponden a un nivel de lapilli pómez de la erupción de hace 2000 años, y la otra, corresponden a un nivel de cenizas de color gris oscuro de menos de 4 cm de espesor. Este último corresponde a la erupción del siglo XV del Misti.

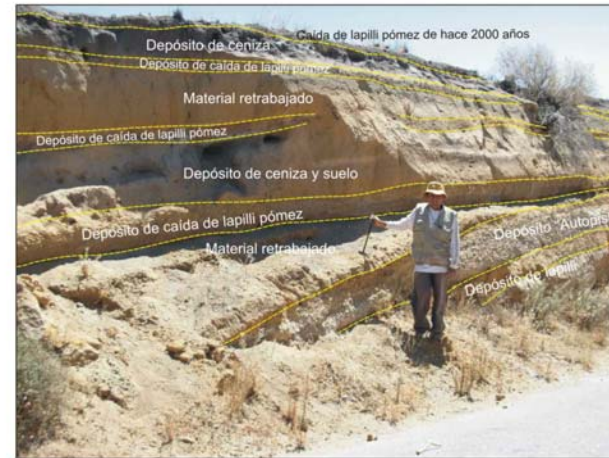
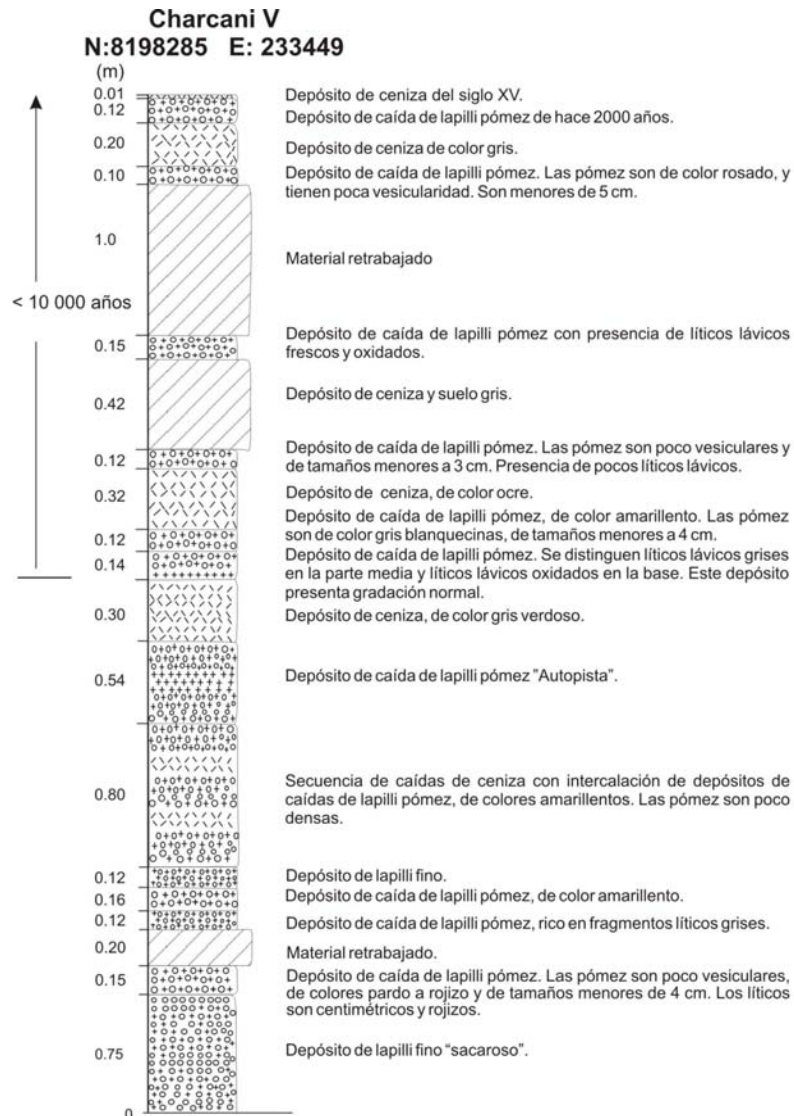


Fig. 6 Columna estratigráfica en la carretera Arequipa - Escuela de Policías (10 km al nor-oeste del volcán Misti), donde se distinguen secuencias recientes del Misti.

IV. ESTUDIO DE LOS PRINCIPALES DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS RECIENTES

Dado que en la mayoría de afloramientos visitados en el campo, así como en casco urbano de la ciudad de Arequipa, son visibles dos depósitos volcánicos recientes del volcán Misti. La más antigua corresponde a la última erupción pliniana ocurrida hace 2000 años A.P. y la más reciente corresponde a una erupción vulcaniana ocurrida en el siglo XV (Chavez, 1992; Legros, 2001; Thouret et al., 2001). Esto nos ha permitido realizar un estudio más en detalle sobre estas erupciones, consideradas muy importantes por su área de cobertura que es hacia el Suroeste del Misti, donde se localiza la ciudad de Arequipa.

IV.1 ERUPCIÓN DE HACE 2000 AÑOS A.P.

La última gran erupción presentada por el Misti, ocurrida hace 2000 años A.P. (Thouret et al., 2001) emplazo tres tipos de depósitos: al inicio de la erupción emplazo un depósito de caída de lapilli pómez que yacen en la parte inferior; seguido de un depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza, que yace en la parte media de la secuencia y un depósito de lahar que yace sobre los depósitos anteriormente descritos. A continuación se describe cada uno de estos depósitos.

IV.1.1 Caída de lapilli pómez

El depósito de caída de pómez fue dispersado en un lóbulo cuyo eje máximo de dispersión fue dirigida hacia el Suroeste, en dirección a la ciudad de Arequipa, hasta una distancia ≥ 25 km. Este depósito se encuentra cubriendo gran parte de los piedemontes, particularmente al O, S, SO y SE del Misti.

Este depósito presenta dos niveles bien diferenciados. (1) un nivel inferior que contiene 80% de pómez y 20% de fragmentos líticos, algunos están alterados e hidrotermalizados. Su base comienza con fragmentos de pómez y líticos relativamente pequeños, cuyos tamaños van incrementando progresivamente hasta el medio del depósito, para luego disminuir; (2) el nivel superior se caracteriza por contener gran cantidad de fragmentos líticos oxidados. Este nivel contiene 55% de pómez, 20% de líticos densos y 25% de líticos oxidados. El depósito tiene una gradación inversa de pómez y fragmentos líticos de

la base hasta la parte media del depósito, y una gradación normal al tope. El espesor del depósito es variable, tiene 30 cm de espesor a 13 km de Suroeste del cráter.

Una característica peculiar del depósito que permite distinguirlo es el bandeamiento de las pómez. Este bandeamiento es caracterizado por la presencia franjas de colores gris claro, y gris oscuro, reflejando una posible mezcla mecánica de magmas.

Dada las características de los depósitos, se infiere que el evento eruptivo se inició con una fuerte explosión, tal vez producto de la mezcla mecánica de magmas, que permitió una gran fragmentación de los productos. Progresivamente la actividad fue decreciendo, pero la alimentación de materiales desde la boca eruptiva siguió y paso a una fase de moderada. Luego la actividad incrementó y erosionó parte del sistema hidrotermal, traducido por un aumento de fragmentos oxidados coexistentes con las pómez y fragmentos líticos juveniles.

a) Análisis del espesor del depósito de caída de lapilli pómez de hace 2000 años A.P.

La medida del espesor máximo del depósito de caída pliniana se utiliza para construir un mapa de isópacas, la cual es indicador significativo de: a) la superficie del depósito; b) el eje mayor de dispersión y c) el volumen del depósito. En el marco del presente trabajo se ha elaborado un Mapa de Isópacas, para lo cual se han medido aproximadamente 20 secciones estratigráficas en los alrededores del volcán Misti. La variación del espesor del depósito de caída de lapilli pómez es mostrada en dicho mapa (Fig. 7).

En áreas proximales, es decir en áreas que varían entre 1 y 10 km de distancia respecto al cráter, el espesor es variable. En esta área, la isópaca de 60 cm se encuentra a 4,5 km al SO del cráter y la isópaca de 20 cm de espesor a 10 km al SO del cráter. En sentido contrario (sotavento), a los 3 km al NE del cráter, se observa un adelgazamiento de la isópaca a 30 cm. En áreas mediales, es decir en áreas que varían entre 11 y 20 km de distancia respecto al cráter, el espesor es variable. En esta área, la isópaca de 10 cm se encuentra a 14 km al SW del volcán y 20 cm cerca de la ciudad de Arequipa. La isopaca de 10 cm pasa por la ciudad de Arequipa. Las isópacas en áreas distales (mayores a 20 km) tienen menos de 10 cm y se prolongan al SW del volcán.

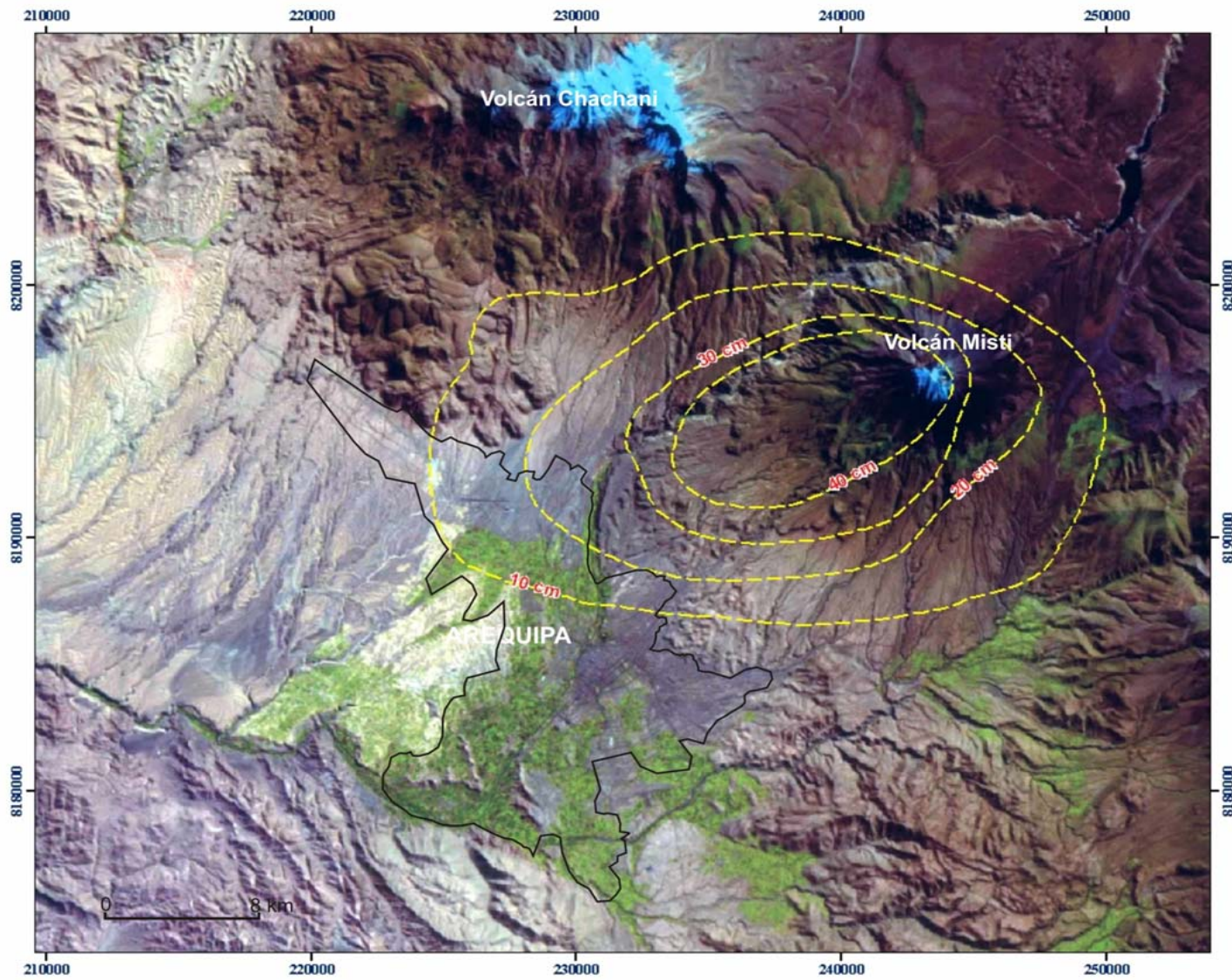


Fig. 7. Imagen de satélite Landsat donde se distinguen las isopacas de la caída pliniana de hace 2000 años del volcán Misti.

Las isópacas definen una dispersión principal del depósito de caída pliniana que tiene forma casi elíptica cuyo eje máximo de dispersión está orientado hacia el SO, en dirección a la ciudad de Arequipa.

IV.1.2 Flujos piroclásticos ricos en pómez de hace 2000 años A.P.

Sobre el depósito de caída de lapilli pómez de hace 2000 años A.P. sobreyacen al menos cuatro niveles de depósitos de flujos de pómez y cenizas cohesivos. Estos depósitos miden entre 2 et 8 m de espesor (Figs 8 y 9). Estos depósitos de flujos de pómez y cenizas están constituidos por ~40% de pómez, ~30% de fragmentos líticos, contenidas en un 30% de matriz de cenizas y lapillo (concentración promedia). Estos flujos se encuentran canalizados en cinco valles radiales que drenan del flanco Sur y SE del Misti, encontrándose incluso en las proximidades de la ciudad de Arequipa (flancos SO, S y SE del volcán Misti). Además se distinguen flujos de pómez y cenizas en el cañon del río Chili, en inmediaciones de la Escuela de Policías.



Fig. 8 En la quebrada Agua Salada, se observan relieves residuales “islas” que corresponden a flujos de pómez y cenizas canalizados y lahares de hace 2000 años. Estos flujos se depositaron en un cauce pre-existente.

Dichos flujos piroclásticos descritos anteriormente se produjeron probablemente por un colapso gravitacional de la columna eruptiva ocurrido poco después o hacía el final de la caída de lapilli pómez.

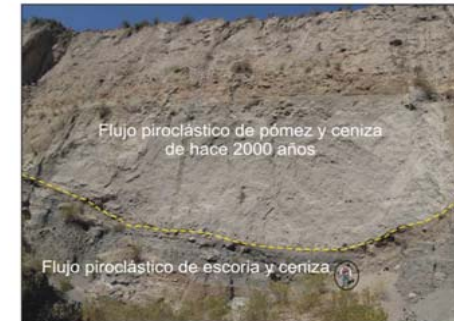
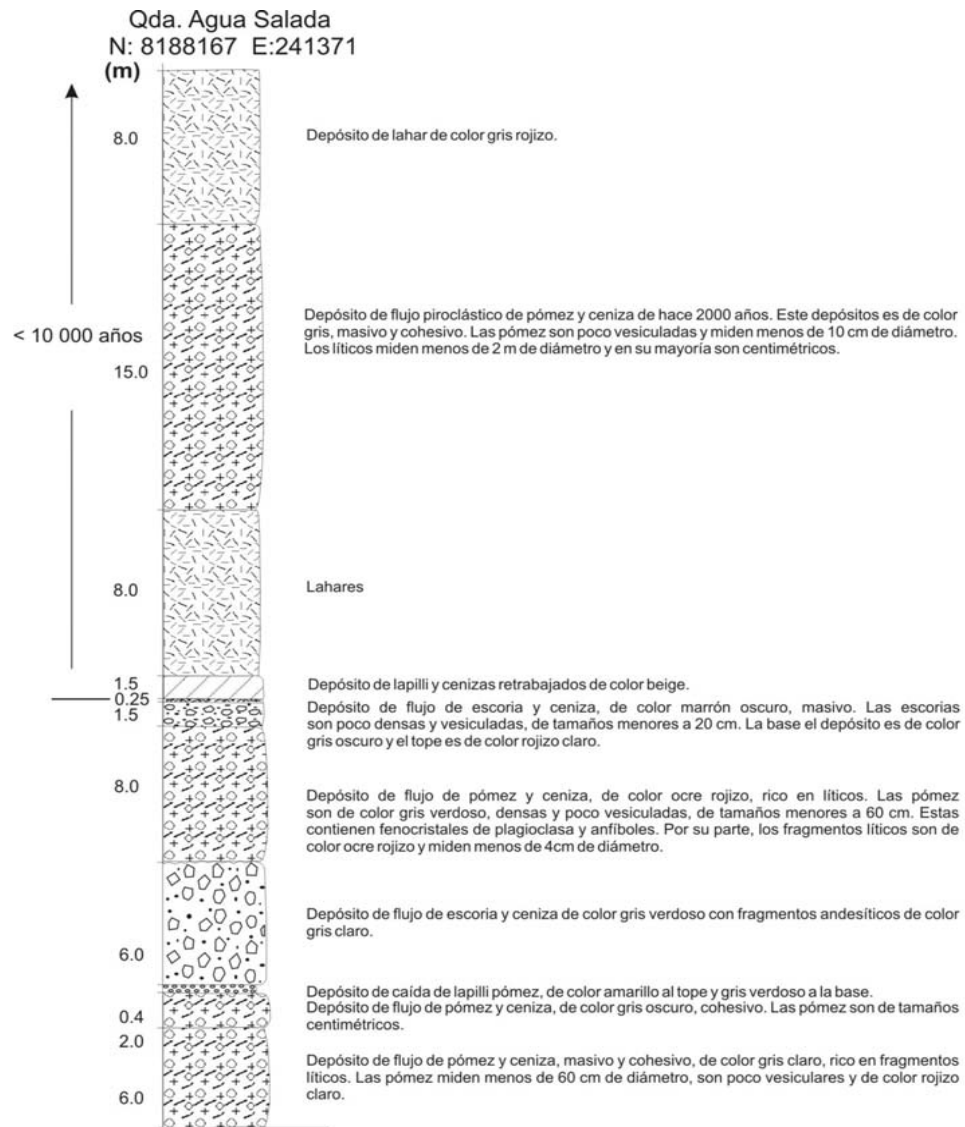


Fig. 9 Columna estratigráfica en la Quebrada Agua Salada (8 km al sur del volcán Misti), donde se distinguen secuencias recientes del Misti

IV.1.3 Depósitos de flujos de escombros (lahares)

Como productos asociados a la erupción de hace 2000 años A.P., se distinguen al menos cuatro niveles de flujos de escombros o lahares separados por pequeños lentes de pómez. Estos depósitos son observados en las quebradas San Lazaro (9 km del cráter), Agua Salada (10 km al sur del cráter), Huaranguero (Fig. 11), Honda y en el sector de Cari Cari. Los depósitos de lahares en su mayoría contienen abundantes pómez (~20-30%) de tamaños centimétricos, así como fragmentos líticos lávicos de tamaños centimétricos (50-60%). Estas características litológicas sugieren que los flujos de pómez fueron transformados rápidamente en lahares justo después de la erupción.

Los lahares generados durante esta actividad son peculiares, pues presentan pómez bandeadas que les hacen fácilmente identificables. Los lahares tienen espesores variables, a 9 km al sur en la quebrada San Lazaro miden en total 12 m, pero estas a más de 12 km (en áreas aledañas a la ciudad de Arequipa) miden menos de 4 m de espesor.

Qda. San Lázaro
N: 8190226 E: 235445

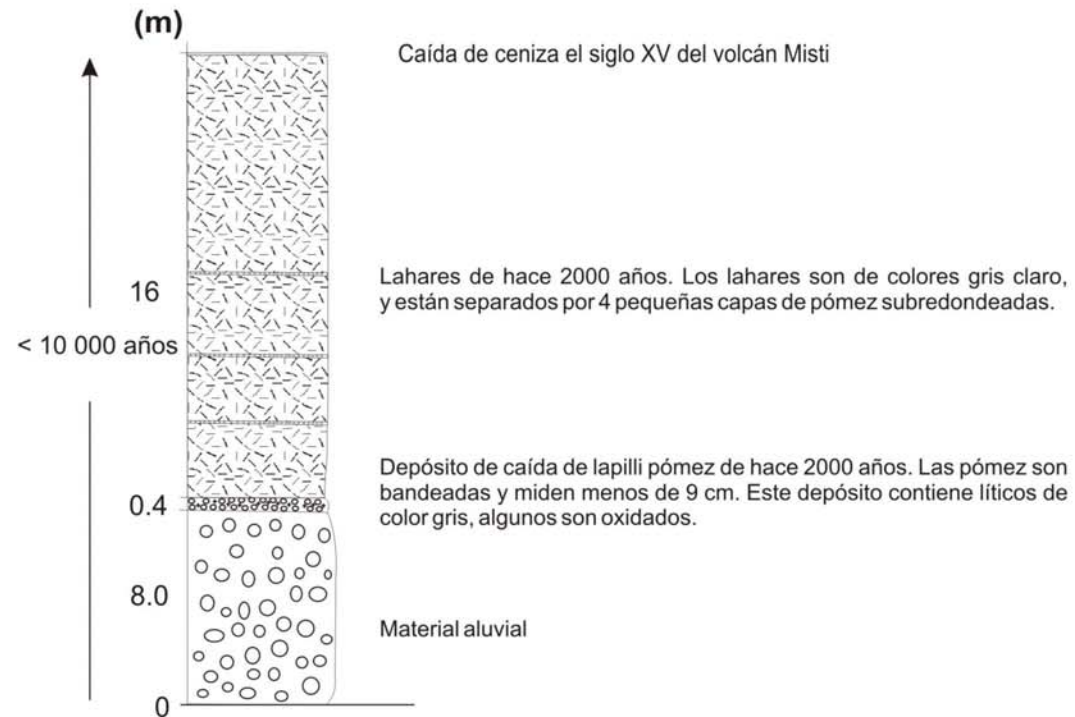


Fig. 10 Lahares asociados a la erupción de hace 2000 años A.P. visibles en la Quebrada San Lazaro, a 8.5 km al Sur del cráter del Misti. En esta zona el depósito presenta cuatro unidades.

Quebrada Huarangueros
 Coordenadas N: 8187789 E:238247

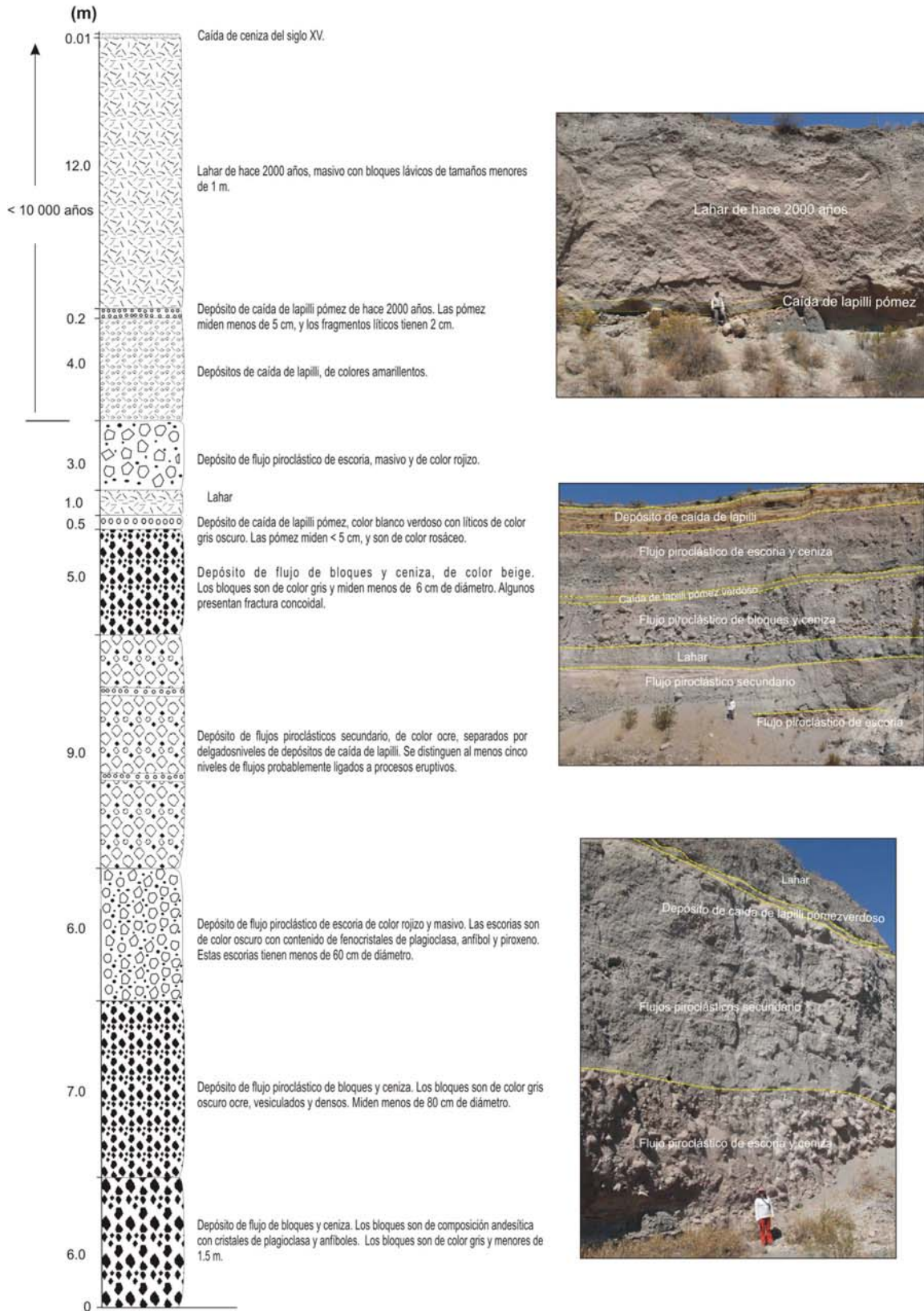


Fig. 11 Sección estratigráfica de la Quebrada Huarangueros donde se distinguen secuencias recientes del volcán Misti. Las fotos corresponden a los niveles de la columna.

IV.2 Actividad del Misti en el siglo XV

Con respecto a las erupciones históricas ocurridas antes del siglo XV, existen pocos relatos y/o escritos por historiadores que describen el tipo de actividad volcánica y el tipo de material que emitió durante ese tiempo el volcán Misti.

Por otro lado, en la mayoría de afloramientos visibles en el campo, siempre sobre el depósito de hace 2000 años yace un depósito delgado de ceniza gris fina que pertenece a la erupción del siglo XV del volcán Misti. Este depósito a la vez infrayace a la ceniza blanca del volcán Huaynaputina de la erupción del año 1600, de composición dacítica.

Se han medido aproximadamente 40 secciones de ceniza gris del siglo XV en diversos sectores adyacentes al Misti, en donde estas tienen espesores variables. En áreas cercanas al volcán esta capa de ceniza mide entre 6 y 7 cm de espesor (Fig. 12). Pero este espesor decrece a medida que nos alejamos del volcán, encontrando hasta 1 cm en el Aeropuerto Rodríguez Ballón de la ciudad de Arequipa (a 18 km al NW del volcán). Las isópacas definen dos tipos de dispersión en formas de lóbulos o elipses: la principal tiene un eje de dirección W-NW y otra secundaria tiene un eje de dirección hacia el SW. En sentido contrario a la dirección del viento (sotavento), a los 6 km al NE del cráter, se observa la isópaca de 1 cm.

La distribución variable que presentan las cenizas alrededor del Misti (según el mapa de isópacas) sugiere que durante este evento eruptivo del siglo XV el Misti estuvo activo durante varios meses o años, lo cual produjo constantemente emisiones de cenizas que fueron dispersados en diversas direcciones, pero con una predominancia hacia el suroeste.

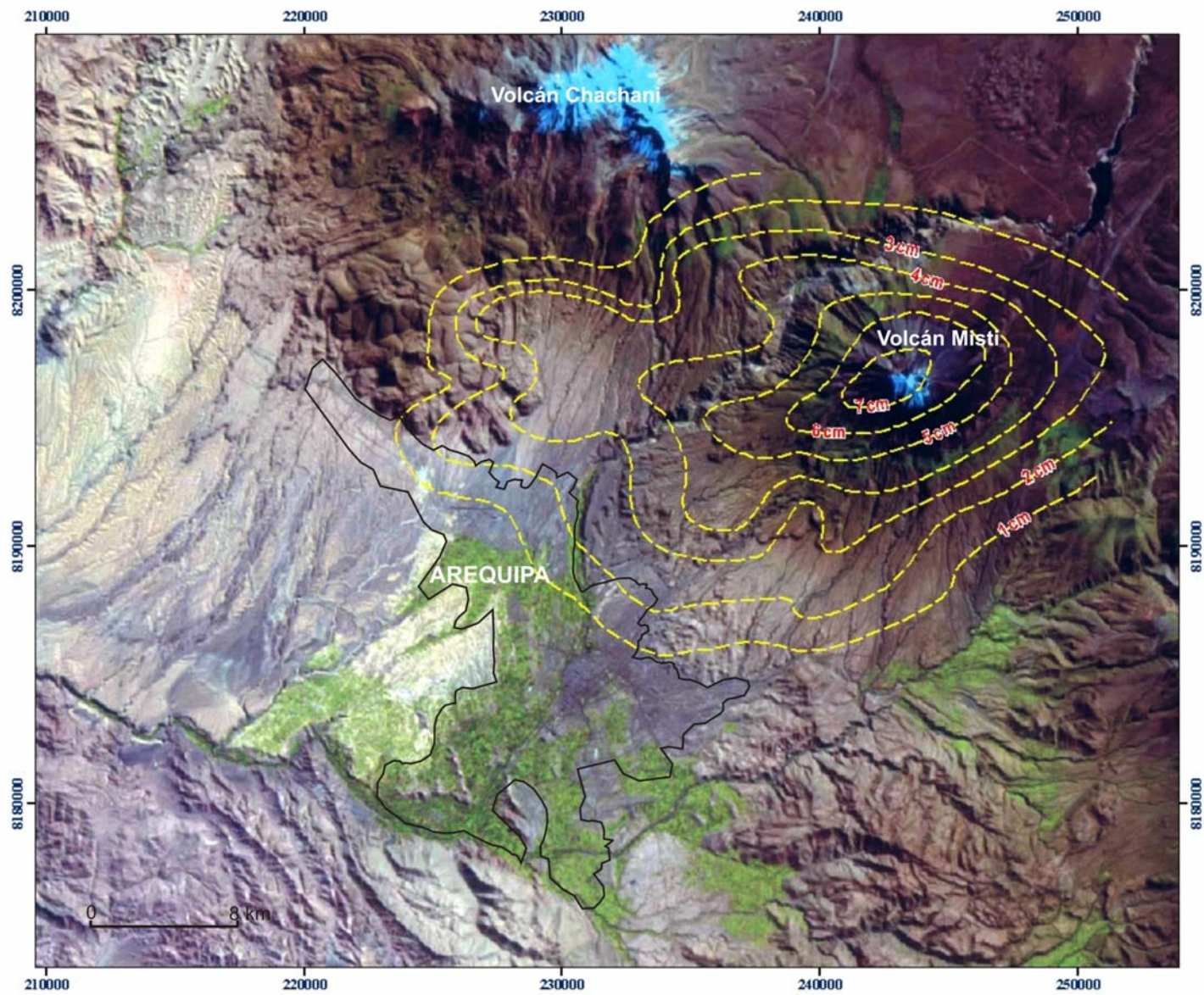


Fig. 12 Imagen de satélite Landsat donde se trazaron las isópacas de la caída de ceniza del siglo XV del volcán Misti.

V. ACTIVIDAD ERUPTIVA OCURRIDA EN ÉPOCA HISTÓRICA

Se ha efectuado la recopilación de datos sobre la actividad eruptiva pasada e histórica del volcán el Misti. Existen varios manuscritos y archivos a partir del siglo XV hasta el siglo XX en donde relatan la actividad del volcán Misti. Esta recopilación también fue obtenida de los catalogos “Volcanoes of the world” (Simkim y Siebert, 1994) y “The active volcanoes of Perú” quienes consideran 11 erupciones desde 1454 hasta 1870, entre otros.

A continuación se hace un resumen de la recopilación de datos efectuados para cada siglo (XV hasta XX) para luego efectuar las conclusiones.

SIGLO XV

Según Murúa (1925), la primera actividad eruptiva del Misti fue registrada durante el siglo XV, la cual ocurrió en el tiempo incaico del Inca Pachacutec en donde indica que hubo una erupción precedida de un terremoto. Murúa escribe lo siguiente: *“Un terrible terremoto en un volcán grande que esta a tres leguas de la ciudad de Arequipa que lanzó de si tanto fuego y con tan grande llamaradas que parecía ser de día claro cubriéndose luego el volcán de una nube oscurísima por espacio de dos días en los cuales no se vio más fuego”*.

Murúa más adelante en su relato dice: *“Después se sucedió otro terremoto con grandísimos temblores despidiendo toda esa noche grandes llamaradas de fuego con terribles ruidos y gran hediondez de azufre acompañada de mucha cantidad de piedras y cenizas y portentosos truenos por espacio de cinco días lloviendo ceniza de hasta de 150 leguas de distancia salvo el poblamiento del distrito llamado San Lázaro debido a que los indios se encontraban haciendo mitimaes en el Cuzco y regresaron a poblarlo”*.

SIGLO XVI

Al respecto el escritor León Pinelo dice: *“Que el volcán Misti hizo amago de ceniza en 1577 que reventaron en tiempos de los Reyes Incas antes de la venida de los españoles a este reino”*.

Según el texto “Los terremotos de Arequipa” (Barriga, 1951) dice: *“El 22 de enero de 1582, como a las 11 y media del día, sin ruido ni rumor alguno anterior, se estremeció la tierra con tanta violencia, que parecía se trastornaba el globo”*. El párroco de Cayma Dr. J. Flores en la publicación de Ballón, (1900) dice al respecto: *“El 22 de enero de 1582 como a las 11:30 del día acaeció el tremendo terremoto que arruinó la ciudad de Arequipa y no quedaron más templos que los de San Francisco y la Merced. Tal fue el estrago que produjo, que los guanacos, vicuñas, venados y zorros bajaron despavoridos a la ciudad y andaban confundidos con las gentes. Las acequias se derramaron sobre todo el agua que contenían, mojaron y destrozaron todo el suelo y centro de las calles. Sobrevinieron las tinieblas y juzgaron que el volcán hubiese vomitado algún río que las ahogase. Sólo se hallaron sepultados 30 personas muertas, muchas otras heridas”*.

Según estos relatos parecen corresponder a sismos fuertes que afectaron la ciudad de Arequipa en aquella época. Pero Ballón (1990) confirma que corresponde a una erupción del Misti como se vera más adelante.

SIGLO XVII

El padre Bernabé Cobo (1890) nos refiere en el año 1612: *“Que son mucho los volcanes y que han reventado algunas veces como hay memoria de la ciudad de Arequipa”*.

Ballón (1900) indica que: *“En el año 1677 después de la última tragedia ocurrida (en 1582) se vió salir del volcán Misti gran cantidad de humo, lo que alarmó extremadamente a la población de Arequipa. El corregidor don Juan de María y Ayala envió a que subieran al volcán y examinasen si lo que salía era humo o nube realizándose dos intentos truncados por lo difícil del camino”*. Ballón (1900) indica que no hubo mayores problemas en la ciudad de Arequipa con relación a esta actividad del volcán y relata: *“al continuar saliendo humo se envió otra expedición encabezada por el cura de la compañía Fernando Bravo y otros, informando además de que habían sentido mucho ruido dentro del volcán”*.

El cura Travada y Cordova (1958) en su obra “El suelo de Arequipa convertido en cielo” escribe: *“El Misti siguió votando mucho humo por el día y la noche, enviaron a 4 hombres a la cumbre para averiguar si se trataba de humo, al llegar al lugar concordaron que efectivamente se trataba de humo, no pudieron llegar a la cima por la cantidad de cenizas que arrojaba; días*

después subió Juan Muños con un indio, regresando a la ciudad con muestras de cenizas con olor a azufre, lo cual altero nuevamente a la población de Arequipa”.

“El primero de Mayo de 1677 salió otro grupo de Chiguata, entre ellos el corregidor Juan Solís y los hermanos Sebastián y Domingo de Rojas más cuatro indios. Casi al llegar a la cumbre cayeron cerca ellos trozos de piedras desgajados. Ya en la cima, vieron por el fondo por todas partes fuego, muchas aberturas pequeñas por donde salía el humo y por otras aberturas se veía como llamas de fuego y que al levantarse el humo en vistosos penachos, era con tan densa crasedad que el aire no los podía disolver hasta que tomaban mucha altura”.

Más delante escribe “se hallaron vestigios de una casilla de piedras con algunos palos de leña y estos pueden ser los restos de sacrificios que allí hacían los indios de tiempo de la gentilidad, refiere el Padre Acosta, que hallaron en este volcán los tesoros que escondían los incas”.

El Padre Barriga (1952) en su obra “Memorias para la historia de Arequipa” indica: *“El volcán de Arequipa se encuentra casi todo el año cubierto de nieve y en sus faldas se encuentran las cenizas y escombros de sus incendios y erupciones en tiempo del gentilismo. Ahora solo se notan algunas veces vapores a humos que se dejan palpar desde la ciudad. Tenemos noticia que el 28 de marzo de 1677 fue acompañada estos vapores de globos inusitados, y eran más que nubarrones. Sobresaltados los vecinos, meditaban defenderse con la fuga, y el corregidor D. Juan Mesía de Ayala mandó cuatro hombres al reconocimiento de su cima. No tomaron noticia de la subida, ni se valieron de los indios prácticos, por lo que no pudieron verificarla. Crecía también el susto con la demora y pasado el mes de abril se echó mano del P. Fr. Alvaro Menéndez, religioso dominico, cura de Chiguata, pueblo más inmediato al volcán. Solicitó a Juan Solís, a Domingo Rojas y los indios más aparentes, con quienes emprendió la subida. Para mayor satisfacción fue el cura de la ciudad D. Fernando Bravo de Beamud, con el cura de Andahua Don Pedro Portugal y el de Cabanaconde D. Sebastián Hernaní, quienes levaron un altar y en el medio celebraron el santo sacrificio de la misa. Parecía precisa esta víctima al saber por el P. José de Acosta que los indios habían tenido la costumbre de llevar allí sus ofrendas arrebatados de su idolatría. El 2 de mayo no hallaron más que el boquerón de las antiguas erupciones y en el cráter descubriendo con la vista, un mogote de cuya circunferencia se exhalaba el humo”.*

SIGLO XVIII

Según Ballón (1900), en este siglo se produjeron movimientos sísmicos y una reactivación del volcán con incremento de la actividad fumarólica. Ballón escribe: *“Al terremoto de Santa Ursula han seguido otros dos, por los años de 1715 y 1784. Cien años después del terremoto de Santa Ursula volvió a humear el volcán lo que produjo gran alarma. Se organizaron expediciones siendo la primera compuesta de don Francisco Suero, alcalde; Don Francisco Vélez, secretario de dicho alcalde, y otros más. Esta expedición salió el 9 de octubre de 1787. Al llegar la expedición, no convencen sus afirmaciones”*.

Zamácola y Jáuregui (1823) en su libro “Historia general de la ciudad de Arequipa y sus siete provincias” y Ballón (1900), relatan algunos temblores y eventos curiosos ocurridos el 13 de Mayo de 1784: *“Hubo un temblor a las 8:39 de la mañana, el continuo movimiento de la tierra no descansa, por la noche a las 12:30 se oyó un trueno como si se hubiese disparado un cañonazo por el aire o como si hubiese caído algunas cosas se asegura que en este instante descendió por el lado del volcán un globo ígneo que muchos vieron sus centellas alumbraron y se quedó invisible por la parte de la sierra. Se continua creyendo en la estrecha relación de sismos y actividad volcánica ya que la sentir un sismo los pobladores dirigían rápidamente sus miradas al volcán es así que al producirse un sismo en dicho año lograron observar un globo de fuego que descendía hacia la sierra y que alumbró esa parte del volcán”*.

Según Barriga (1951) indica que el volcán Misti empieza a humear alarmantemente y dice: *“Cuando era intendente de Arequipa don Antonio Álvarez y Jiménez el día 28 de julio de 1787 un grande humo aliginoso y denso, que poniendo en consternación toda la ciudad, ha dado motivo a que el estado eclesiástico empezase a ser públicas Preces, y Rogativas, citando a las gentes de ambos sexos para la Procesión de Sangre”*.

“En esta oportunidad se cumplieron las ordenes de la intendencia de realizar el levantamiento topográfico del volcán. Llegando a la cumbre Francisco Suero, Francisco Vélez, Francisco Ojeda y doce indios cargados de yareta. Esta expedición salió de Chiguata el día 8 de octubre de 1787 y llegó a la cumbre el día 10 relatando lo siguiente entre otras cosas: En esta eminencia de risquería que domina toda la cumbre y parte principal de la citada boca observamos por espacio de seis horas que en el centro de ella salía impelido un gran trozo de vapor del grueso de mas o menos de

nueve cuádras unas veces en forma de pirámide, y otras en la nube, siempre prolongada, y continuando, sin embargo de forma hacia arriba en su dilatación diversas figuras y promontorios globosos, según el impulso de la expulsión de la gravedad y dirección del aire, que elevándose en gran altura se reunía, y condensaba hasta formar cuerpos separados; los cuales corrían por la atmósfera, a donde los llevaba el viento a manera de nubes, de aquella especie de solidez y color que estas aparentan”.

Mas adelante indica: *“En esta especulación vimos que la columna de vapor no obstante ser de tan grande corpulencia, no llenaba toda la oquedad de la expresada boca, y que salían unas veces por un lado, y otras por otro tomando diversas direcciones, pero sin divertirse, ni separarse hasta la mayor altura a que se elevaba...”.*

“Primeramente advertimos, que no se percibía hedor alguno a azufre, ni cosa semejante antes por el contrario la fetidez era muy grande como de cuerpos podridos. Tenia si algún antimonio por que era a manera de ácido fermentado a semejanza de la herrumbre, o del carnillo que da el cobre mahoso, o a modo del fetor de las tintorerías, cuando están hirviendo los tintes de diversas especies y calidades que de todo punto causa una inexplicable hediondez” (Chavez, 1992).

SIGLO XIX

Ballón (1900) manifiesta: *“El 31 de Enero de 1878 una expedición seminarista compuesta del doctor don Anibal Palma, Vice-Rector entonces del Seminario y otros, que los acompañaron y subieron a la cima del Misti vieron salir humo o vapor blanco del cráter y de varias fisuras que hay cerca del portillo”.* Más adelante dice: *“Al terremoto del 13 de mayo de 1784 han seguido otros tres por los años 1812-1821-1868”.*

Simkin y Siebert (1994) indican posibles actividades en agosto, marzo de 1830 y septiembre de 1869. Con respecto a la actividad de 1869, Ballón (1900) refiere que la actividad fue más bien en 1868.

Según Ballón (1900): *“Cuando se colocó la actual cruz (23 de febrero de 1900) las personas que subieron y celebraron una misa y vieron salir grandes columnas de humo o vapor blanco”.*

SIGLO XX

En 1948 y 1949, e igualmente en los meses de abril a junio de 1984-1985 se observó una leve actividad fumarólica emitida del domo de lava existente dentro del cráter del Misti. Según comentarios de algunos andinistas el humo que exhala es frecuente aunque no constante. Suni (1999) en el estudio geológico efectuado sobre el Misti también menciona que en los años 1997 y 1998 la actividad fumarólica es visible. Estas fumarolas están constituidas de vapor de agua y gases sulfurosos.

V.1. Conclusiones sobre la actividad histórica

Las primeras erupciones históricas fueron registradas a partir de 1438 y posteriormente en 1471 D.C. durante el mandato del Inca Pachacutec (Murúa, 1925), probablemente estas erupciones son de tipo freáticas o freatomagmáticas, o intensas emisiones de gases y cenizas las cuales fueron descritas como: “*grandes llamaradas de fuego y una nube oscurísima*”. Al parecer esta actividad ha depositado una capa de ceniza de color negro que se encuentra debajo de la ceniza gris clara del volcán Huaynaputina (erupción del año 1600).

Las publicaciones históricas redactadas desde el siglo XVI hasta el siglo XX refieren la emisión de gases y quizás cenizas? del volcán Misti durante un intervalo de tiempo muy reducido y sin mayores indicaciones de alarma para los pobladores. Estas referencias hacen pensar en pequeñas crisis fumarólicas normales en un volcán activo.

Cabe resaltar que según los relatos históricos presentados anteriormente existieron confusiones entre un terremoto y la actividad volcánica. Al parecer los autores quienes escribieron los artículos, pensaban que existía una estrecha relación entre un movimiento relacionado a la actividad volcánica y tectónica (sísmica), o que una actividad generaba la otra, por lo cual no se tiene datos precisos sobre la actividad del Misti.

Actividades registradas en 1677, 1784 y 1787 por el Misti, y descritas por Ballón (1900), Travada y Cordova (1958), Barriga (1952), Zamácola y Jáuregui (1823), Chavez (1992) indican una continua emisión de gases, con mucho ruido dentro del volcán, haciendo una comparación al ruido que efectúa el disparo de un cañon, y esporádicamente algunos

temblores. Estas actividades descritas sugieren una actividad explosiva moderada (tipo vulcaniana o freatomagmática?).

La última actividad ocurrida en el siglo XX fue específicamente en el 1985, y de acuerdo a los relatos de la población que presenciaron esta actividad, cuentan que en esta época el Misti incrementó su actividad fumarólica. En general, las actividades ocurridas en el último siglo se caracterizan por ser leves (emisiones de gases), tal como la crisis de 1985.

VI. CARACTERÍSTICAS DE LA ACTIVIDAD EXPLOSIVA OCURRIDA <10,000 AÑOS EN BASE AL ESTUDIO DE LOS DEPÓSITOS

VI. 1 Características de la actividad ocurrida entre 10,000 y 2000 años

Según la estratigrafía descrita a comienzo de este artículo, entre los depósitos emitidos los últimos 10,000 años por el Misti se distinguen principalmente depósitos de caída de pómez. Estos depósitos son delgados (<50 cm de espesor a 8 km del volcán) y en su mayoría son de colores blanquecinos, y algunos de colores amarillentos. Debido a la presencia de depósitos de caídas de tefras con espesores delgados que contiene pómez de menos de 4 cm, se puede afirmar que la actividad ocurrida los últimos 10,000 años fue principalmente de tipo explosiva moderada: erupciones plinianas, sub-plinianas, freatomagmáticas y vulcanianas. Los depósitos amarillentos que contienen pómez de colores amarillentos (hidrotermalizados) y la presencia de fragmentos de líticos lávicos (hidrotermalizados y alterados) pueden corresponder a erupciones freatomagmáticas.

Desde el punto de vistas de peligros y riesgos en una eventual reactivación del volcán Misti se puede pensar que la próxima actividad del Misti tendería a ser explosiva moderada (vulcaniana, freatomagmática?), probablemente similar a las erupciones recientes y/o históricas (similar a las ocurridas los últimos 1000 años), y con posibilidades de afectar a la ciudad de Arequipa, debido a las caídas de cenizas y/o ocurrencia de lahares.

VI. 2 Características de la actividad ocurrida hace 2000 años

Resultados del estudio estratigráfico y del cartografiado geológico muestran que uno de los depósitos mejor preservado y de mayor dispersión en el área de Arequipa lo constituye el depósito de caída de lapilli pómez de la erupción pliniana de hace 2000 años del volcán Misti. Este depósito mide hasta 40 cm de espesor, a 8 km al pie del flanco suroeste del volcán y su espesor decrece gradualmente hasta medir 10 cm en la ciudad de Arequipa (17 km al Suroeste del cráter). Esta erupción también generó depósitos de flujos de pómez y cenizas que miden hasta 12 m de espesor (a 8 km al pie del flanco sur). Estos depósitos se hallan canalizados en las principales quebradas que drenan hacia la ciudad de Arequipa (San Lázaro, Huarangal, Agua Salada). Asociados a la erupción de hace 2000 años se distinguen depósitos de flujos de barro (lahares), que yacen sobre los depósitos de flujos de pómez y cenizas y miden hasta 3 m de espesor.

Según las isopacas de la caída de pómez, el volumen calculado es de 0.1 km^3 . Mientras que los flujos ricos en pómez no soldados tienen un volumen aproximado de 0.7 km^3 .

Dada las características de los depósitos, se infiere que el evento eruptivo se inició con una fuerte explosión, tal vez producto de una mezcla mecánica de magmas, asociada también a la vesiculación del magma por volátiles disueltos en el magma, que permitió su fragmentación. Esta erupción generó una columna eruptiva mayor de 13 km de altura (Suni, 1999) que al cabo de varias horas esta columna eruptiva colapsó y como consecuencia generó flujos piroclásticos de pómez y cenizas anteriormente descritos. Asociados a esta actividad se produjeron lahares que descendieron por las quebradas que drenan del volcán Misti, con dirección al área de Arequipa.

VI. 3 Características de la actividad volcánica ocurrida hace menos de 2000 años

En áreas aledañas al Misti, sobre el depósito de lapilli pómez de hace 2000 años se distinguen al menos dos depósitos de caídas de tefras de colores amarillentos (hidrotermalizados) y la presencia de fragmentos de líticos lávicos (hidrotermalizados y alterados) que tienen espesores delgados ($<10 \text{ cm}$). Esto puede sugerir que la actividad ocurrida los últimos 2,000 años fue principalmente de tipo explosiva moderada: erupciones freatomagmáticas y vulcanianas.

Por otro lado, en áreas aledañas al volcán Misti se distingue un depósito de cenizas fina de color gris oscura, que tiene entre 1 y 2 cm de espesor en la ciudad de Arequipa. Este depósito perteneciente a la erupción del siglo XV, sobreyace al depósito de la erupción pliniana de hace 2000 años y sobre los depósitos de lapillo amarillentos descritos anteriormente. El cartografiado geológico muestra que este depósito tuvo una dispersión variable, pero con mayor predominancia hacia el Oeste y Suroeste del volcán. Por otro lado, las crónicas históricas mencionan la ocurrencia de erupciones explosivas leves los últimos 500 años (erupciones vulcanianas y fuertes emisiones de gases), sin embargo en el campo no fue posible reconocer depósitos ligados a tales erupciones, posiblemente por que los depósitos fueron muy delgados y fueron fácilmente erosionados por los vientos.

Desde el punto de vistas de peligros y riesgos en una eventual reactivación del volcán Misti se puede pensar que la actividad tendería a ser explosiva moderada, probablemente similar

a las erupciones recientes y/o históricas (similar a las ocurridas los últimos 1000 años), y con posibilidades de afectar seriamente a la ciudad de Arequipa, debido a las caídas de cenizas y/o ocurrencia de lahares.

CONCLUSIONES

- En áreas aledañas al volcán Misti se distinguen al menos ocho depósitos delgados de caída de lapilli pómez y cenizas grises, emplazados en los últimos 10,000 años. Estos depósitos en su mayoría fueron emitidos durante erupciones de tipo explosivas fuertes a leves: plinianas, sub-plinianas, freatomagmáticas y vulcanianas. Los depósitos de caída de lapilli pómez miden entre 8 a 35 cm de espesor, y alcanzan distancias menores a 30 km donde los depósitos se hacen irreconocibles. El espesor de los depósitos, así como el diámetro de las tefras decrecen en área distales, en donde la mayoría se hacen irreconocibles. Estos depósitos son masivos y la mayoría de ellos contienen poméz amarillentos y fragmentos líticos lávicos oxidados e hidrotermalizados.
- La erupción explosiva de tipo pliniana de hace 2000 años del volcán Misti, es la más importante en magnitud, y generó depósitos de caídas de tefras, flujos piroclásticos y lahares (flujos de barro). Según nuestro estudio la dispersión de la caída de tefras fue hacia el Suroeste, encontrándose actualmente en inmediaciones del casco urbano de Arequipa (~17 km al SO del volcán) donde mide 10 cm de espesor. Sin embargo, los flujos piroclásticos y lahares predominan en el sector Sur y SE (Quebradas San Lazaro, Huarangueros, Agua Salada, Cari Cari), y NO del volcán (cañon del río Chili) donde fueron canalizados. Asociados a estos depósitos y en los niveles superiores se distinguen lahares (flujos de barro) que miden hasta 3 m de espesor. Estos depósitos fueron emplazados principalmente al pie del flanco Sur y SE, inmediatamente después de la erupción.
- Con respecto a la erupción del volcán Misti en el siglo XV, en el campo distinguimos una capa delgada de ceniza fina de color gris que alcanza ~1 cm de espesor en la ciudad de Arequipa. Sin embargo los mayores espesores lo encontramos en la represa Aguada Blanca (a 4 km al pie del flanco NE del volcán Misti), donde mide 6 cm de espesor, así como al pie de los flancos SO y Oeste del Misti. Por lo cual se alega que la dirección predominante que siguieron las cenizas al ocurrir la erupción del Siglo XV fue hacia el SW y Oeste. La erupción se produjo en un gran intervalo de tiempo (varios meses o algunos años?) durante el cual las cenizas fueron dispersadas en diferentes direcciones, con predominancia al Suroeste.

- Según los estudios efectuados, podemos ver que los depósitos de caídas piroclásticas producidas los últimos 10,000 años tuvieron un eje de dispersión que prevalece al Suroeste, donde se localiza actualmente la ciudad de Arequipa. Esto probablemente se deba a la influencia de los vientos en épocas pasadas que prevalecieron hacia ese sector.
- Respecto a la actividad histórica, aunque algunas crónicas mencionan erupciones explosivas leves ocurridas antes del siglo XV (últimos 500 años), en el campo solamente se reconoció un depósito ligada a dichas erupciones.
- Debido a la presencia principalmente de caídas de tefras de colores amarillentos (hidrotermalizados y alterados) y la presencia de fragmentos de líticos lávicos, con espesores delgados, se puede afirmar que la actividad ocurrida los últimos 10,000 años fue principalmente de tipo explosiva moderada a leves: erupciones sub-plinianas, freatomagmáticas y vulcanianas. Desde el punto de vistas de peligros y riesgos en una eventual reactivación del Misti se puede pensar que la actividad tiende a ser explosiva, moderada a leve, probablemente similar a las erupciones recientes y/o históricas, y con posibilidades de afectar seriamente la ciudad de Arequipa, con un impacto inmediato: contaminar fuentes de aguas de consumo humano.

REFERENCIAS

- Barriga, V.M., 1951. Los terremotos en Arequipa (1582-1868): Arequipa, La Colmena, 426 p.
- Cacya L. 2006. Volcán Misti: sedimentología, geoquímica y correlación tefro-estratigráfica del depósito de caída de pómez “Autopista” 20000 – 11000 años, Tesis de Ingeniero, UNSA, 86p.
- Chavez J. 1992. La erupción del volcán Misti, pasado, presente, futuro. Impresiones Zenit, 158 p.
- Delaite, G., Thouret, J.-C., Sheridan, M.F., Stinton, A., Labazuy, P., Souriot, T., van Westen, C., 2005. Assessment of volcanic hazards of El Misti and in the city of Arequipa, Peru, based on GIS and simulations, with emphasis on lahars: Zeitschrift fur Geomorphology N.F., suppl.- vol. 140, 209-231.
- Guevara, 1968. Geología del cuadrángulo de Characato. Bol. 23, 53 pp.
- Legros, F. 2001. Tephra stratigraphy of Misti volcano, Peru. Journal of South American Earth Science, 14; 15-29 p.
- Navarro, P., 2000. Cartografía geológica, historia eruptiva y valuacion de las amenazas volcánicas del estro-volcán Misti, Tesis Ing. Geólogo 125 p. Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.
- Mariño, J., Rivera, M., Cacya, L., Thouret, J.C., Macedo, L., Salas, G., Tilling, R.I., Sheridan, M., Siebe, C., Zuñiga, S., 2007. Mapa de Peligros del Volcán Misti: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Lima, Perú.
- 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. Geoth. Research, 154, 251-275.
- Thouret J.-C., Finizola, A., Fornari, M., Suni, J., Legeley-Padovani, A., Frechen, M. (2001). Geology of El Misti volcano nearby the city of Arequipa, Peru. Geol. Soc. Amer. Bull. 113 (12): 1593 – 1610.
- Rivera P., Mariño, J., Cacya, L., Thouret, J.-C., Cruz, V., Lopez, M., 2007. Volcan Ubinas: actividad eruptiva 2005-2007 y características de productos emitidos. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú 102, 5-23.
- Seltzer, G.O. 1990. Recent glacial history and paleoclimate of the Peruvian-Bolivian Andes: Quaternary Science Reviews 9, 137-152.
- Simkin, T., Siebert, L., 1994. Volcanoes of the World – A Regional Directory, Gazetteer and chronology of volcanism during the last 10,000 year. Global Volcanism Program, Smithsonian Institution, Washington DC, 348 pp.
- Suni, J., 1999. Estudio geológico y vulcanológico del volcán Misti y sus alrededores. Tesis Ingeniero geólogo, Universidad Nacional San Agustín, Facultad de Geología, Arequipa, 179 p.
- Zamacola y Jáuregui, (1804). En Barriga WM. 1954. Los Terremotos de Arequipa, 332 p.