

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN**  
**FACULTAD DE GEOLOGIA GEOFISICA Y MINAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**



**VOLCÁN MISTI: SEDIMENTOLOGÍA, GEOQUÍMICA Y  
CORRELACIÓN TEFRO-ESTRATIGRAFICA DEL DEPÓSITO  
DE CAÍDA DE PÓMEZ “AUTOPISTA” ~ 14000 AÑOS**

**Tesis presentada por la Bachiller  
LOURDES DELIA CACYA DUEÑAS  
Para optar el título profesional de  
INGENIERO GEOLOGO**

**AREQUIPA – PERU  
2006**

A la memoria de mi Padre JUAN CACYA  
HERRERA, por que nunca dejaré de admirar  
su sabiduría, inteligencia y humildad.

## INDICE

### RESUMEN

### **CAPITULO I: INTRODUCCIÓN**

1. CONCEPTOS BASICOS .....	4
1.1 TIPOS DE VOLCANES .....	4
1.2 TIPOS DE ERUPCIONES VOLCANICAS .....	5
2. UBICACIÓN .....	7
3. OBJETIVOS DEL TRABAJO .....	7
4. MÉTODOLÓGÍA DEL TRABAJO .....	8
4.1 TRABAJO DE CAMPO .....	9
4.2 ANÁLISIS DE LABORATORIO .....	9
4.3 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS .....	10
5. TRABAJOS ANTERIORES .....	10
6. AGRADECIMIENTOS .....	11

### **CAPITULO II: MARCO GEOLÓGICO ESTRATIGRÁFICO DEL VOLCÁN MISTI**

1. CONTEXTO ESTRUCTURAL .....	13
1.1 LOS VOLCANES ACTIVOS DEL SUR DEL PERÚ .....	14
2. MARCO GEOLÓGICO ESTRATIGRÁFICO .....	15
2.1 PREMISTI .....	16
2.2 MISTI 1 .....	17
2.3 MISTI 2 .....	17
2.4 MISTI 3 .....	17
2.5 MISTI 4 .....	17

### **CAPITULO III: SEDIMENTOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA DEL DEPÓSITO “AUTOPISTA”**

1. DESCRIPCIÓN ESTRATIGRAFICA .....	21
2. EDAD Y CORRELACION ESTRATIGRAFICA .....	22
2.1 DEPÓSITO DE CAÍDA “FIBROSO I” .....	23
2.2 DEPÓSITO DE “CAÍDA SACAROIDE” .....	23
2.3 DEPOSITO DE CAIDA “FIBROSO II” .....	23
2.4 DEPOSITO DE CAIDA “BLANCO RICO EN LÍTICOS” .....	24
2.5 DEPOSITO DE CAIDA “AUTOPISTA” .....	24
2.6 DEPOSITO DE CAIDA BANDEADO .....	24
2.7 DEPOSITO DE CENIZA DEL SIGLO XV .....	24
2.8 CENIZA DEL HUAYNAPUTINA .....	25
3. ANALISIS GRANULOMETRICO DEL DEPOSITO .....	31
3.1 METODOS .....	31
3.2 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS .....	31
4. ANALISIS DE COMPONENTES LITOLÓGICOS .....	39
4.1 COMPONENTES EN EL SECTOR PROXIMAL .....	41
4.2 COMPONENTES EN LA FACIE MEDIAL .....	47
4.3 RESUMEN DEL ANALISIS DE COMPONENTES LITOLÓGICOS .....	52
5. PETROGRAFIA .....	54

5.1 DESCRIPCION MACROSCÓPICA	.....	54
5.2 DECRIPCION MICROSCOPICA	.....	55
6. GEOQUIMICA	.....	57
6.1 CLASIFICACION DE DE LA SERIE	.....	58
6.2 LOS ELEMENTOS TRAZA	.....	61
6.3 DISCUSION: EVOLUCION PETROGENETICA	.....	64
 <b>CAPITULO IV DINAMICA ERUPTIVA</b>		
1. DISTRIBUCIÓN	.....	66
1.1 MAPA DE ISOPACAS	.....	67
1.2 MAPA DE ISOPLETAS	.....	68
2. VOLUMEN DEL DEPÓSITO	.....	73
2.1 METODO DEL TRAPEZAIDE	.....	75
2.2 MÉTODO DE ADELGAZAMIENTO EXPONENCIAL	.....	76
3. DISPERSIÓN	.....	77
4. ALTURA DE LA COLUMNA ERUPTIVA	.....	79
2.1 MODELO DE WALKER Y CROSDALE	.....	80
2.2 MODELO DE CAREY Y SPARKS	.....	80
5. EXPLOSIVIDAD	.....	81
 CONCLUSIONES		
	.....	83
 RECOMENDACIONES		
	.....	84
 BIBLIOGRAFIA		
	.....	85
 ANEXO I : ANALISIS GRANULOMETRICO COMPLEMENTARIO		
ANEXO II : BASE DE DATOS DEL ANALISIS GRANULOMETRICO		
ANEXO III : BASE DE DATOS DE LOS AFLORAMIENTOS		





## RESUMEN

El estratovolcán Misti, está constituido por 4 edificios principales, denominados Misti 1, 2, 3 y 4, los que se formaron entre 833 y 112 mil años, 112 y 40 mil años, 40 y 11 mil años, y los últimos 11 mil años respectivamente. Durante los últimos 50 mil años, el volcán Misti ha tenido una actividad predominantemente explosiva y extrusiva.

Al sur, suroeste, oeste y noroeste del volcán Misti, se han identificado y correlacionado catorce depósitos de caída de lapilli pómez, emplazados en los últimos 31 mil años. De ellos siete son los depósitos más importantes (en distribución y volumen) y corresponden a erupciones plinianas o sub-plinianas. Dichos depósitos son: “Fibroso I”, conformado por pómez blanco, rico en biotita, vesículas alargadas y generalmente con líticos de mayor tamaño en la base del depósito; “Sacaroide” (datado en 20960 años), donde los pómez tienen menos de 1 cm de diámetro, son ricos en biotita, posee alta concentración de cristales en la base del depósito y el sorteo del tamaño de grano es alto; “Fibroso II”, las pómez son amarillo grisáceo, de 1 a 4 cm de diámetro, y rico en biotita y anfíbol; “Blanco”, las pómez son blancas, contienen plagioclasas, anfíboles y piroxenos, predominan los de 1 a 3 cm de diámetro; “Autopista” con pómez blanco, constituidos por plagioclasas, anfíboles, piroxenos y biotita; “Sándwich”, depósito de color amarillo ocre, conformado por pómez escurecido y una capa delgada de ceniza gris en su parte media; “Bandeado”, corresponde a la erupción producida hace 2000 años, está conformada por pómez de color gris oscuro, con bandas gris blanquecinas.

El lóbulo de dispersión del depósito de lapilli pómez “Autopista” (emplazado entre 20000 y 11000 años), está orientado hacia el oeste y su eje mayor posee dirección E-O. En el sotavento (dirección oeste), las isópacas de 40 y 20 cm pasan a 20 y 25 km del cráter respectivamente. La isopleta de pómez de 3 cm, pasa a 21 km del cráter y la isopleta de líticos de 1 cm a 22 km (ambos en el sotavento).

El depósito “Autopista”, está conformado por tres niveles principales. El nivel inferior representa el 40% del depósito, posee gradación inversa, las pómez representan el 97 % y los líticos solo el 3%. El nivel medio es una capa de color gris oscuro, representa la décima parte del espesor total del depósito, y se caracteriza por su alta concentración de líticos, el mismo que alcanza hasta el 26 %. El nivel superior contiene hasta un 23 % de líticos. En total el depósito está conformado por 85 % de pómez y 15 % de líticos (14 % son líticos accesorios y 1 % líticos accidentales).

Se estima que la columna eruptiva de la erupción que emplazó el depósito “Autopista”, tuvo una altura entre 22 y 25 km. El área cubierta por la isópaca de 20 cm (menor espesor identificado) cubre alrededor de 314 km<sup>2</sup>, y el volumen mínimo estimado para el depósito es de 0.16 km<sup>3</sup>. De estos datos, deducimos que la erupción fue pliniana, y alcanzó un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) 4.

Las pómez del depósito “Autopista” poseen composición andesítica (63% de SiO<sub>2</sub>) calco-alcalina. El orden de cristalización de los minerales (piroxenos, plagioclasas, óxidos, anfíboles y biotita) y los porcentajes en elementos compatibles (Sr, Sc, V, Co, Cr, Ni) e hidromagmáfilos (Rb, Th) que muestran variaciones fuertes, son características que evidencian un proceso de cristalización fraccionada.

## CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

Durante el Pleistoceno (entre 833000 y 50000 años) el volcán Misti ha presentado actividad efusiva; y desde hace 34 000 años se han registrado como mínimo catorce eventos explosivos de mediana magnitud que emplazaron depósitos de caída; el último evento fue de baja magnitud con columna eruptiva entre 10 y 20 km de altura y ocurrió en el siglo XV.

Actualmente el volcán Misti presenta una constante manifestación fumarólica lo que indica la existencia de un sistema hidrotermal en su interior.

Este estudio forma parte del proyecto Peligro volcánico y Neotectónica en el Sur del Perú que desarrolla el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico en convenio con la Universidad Nacional de San Agustín donde se busca conocer la historia eruptiva de los últimos 31000 años en base a la correlación estratigráfica de las tefras. Así mismo se investiga a cerca de las características físicas del depósito y parámetros de la columna eruptiva que emplazó un depósito de caída denominada Autopista.

### 1. CONCEPTOS BASICOS

Un volcán constituye el único intermedio que pone en comunicación directa la superficie terrestre con los niveles profundos de la corteza terrestre.

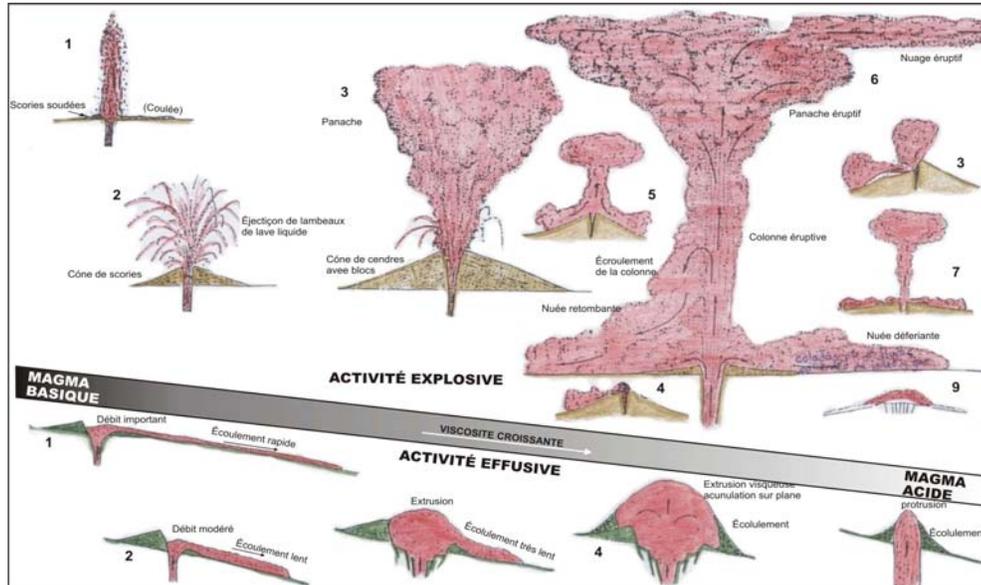
#### 1.1 TIPOS DE VOLCANES

**a) Estratovolcán:** Es una gran estructura cónica (alrededor de 2500 m de altura) de apariencia casi simétrica compuesta de la alternancia de coladas de lava y depósitos piroclásticos que son emitidos a partir de una chimenea principal como es el caso del volcán Misti.

**b) Volcán Monogénético:** Es una estructura cónica pequeña (100 – 500 m) que erupciona solo una vez, por ejemplo los volcanes del valle de Andagua.

## 1.2 TIPOS DE ERUPCIONES VOLCANICAS

Las erupciones en base a su dinamismo pueden ser efusivas, extrusivas o explosivas de acuerdo a la composición química del magma ascendente.



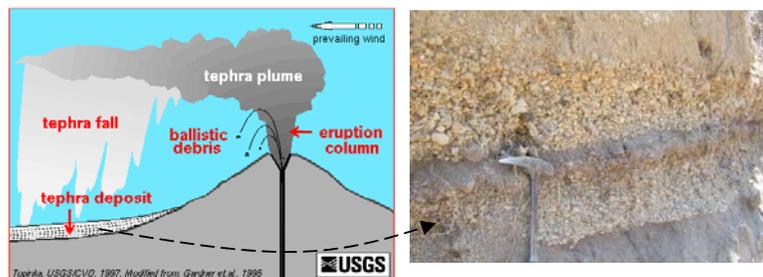
**Figura 1:** Tipos de dinamicismo eruptivo (modificado de D'après A. GOER de Herve et J.M BERLIN, 1985). 1. Hawaiano, 2. stromboliano, 3. Vulcaniano, 4. Peleeano, 5. Saint Vincent, 6. Pliniano, Maar, Saint Helenns, Katmaiano.

**1.2.1 Erupción pliniana:** Es un proceso de erupción explosiva donde mas del 50 % del magma es altamente fragmentado debido a la elevada viscosidad del y cantidad de gases presentes; este magma fragmentado es expulsado en una columna convectiva y cuando esta sobrecargada colapsa generándose flujos piroclásticos. La columna eruptiva de una erupción pliniana puede alcanzar hasta 30 km de altura sobre el cráter.

El nombre de pliniano proviene de la erupción del Vesubio (Italia), ocurrida en el año 79 después de Cristo y que fue descrita detalladamente por Plinio El Joven, quien comparó la forma de la columna eruptiva con los pinos de la campiña romana. La altura de la columna eruptiva, alcanzó entre 27 y 33 km, y se mantuvo durante 19 horas (Carey y Sigurdsson, 1987).

**1.2.2 Mecanismo de emplazamiento de los productos:** Los productos emitidos por una erupción pliniana son piroclastos de diferentes tamaños y pueden emplazarse por dos mecanismos diferentes:

- De caída: Los depósitos de caída se forman por la acumulación de clastos calientes transportados por el viento, la geometría del depósito es tabular y cubre uniformemente la topografía; la fricción del aire junto con la fuerza de la gravedad actúan como un tamiz natural sobre la forma de la columna eruptiva dependiendo de las condiciones climáticas y del viento (figura 2)



**Figura 2:** Mecanismo de emplazamiento de los depósitos de caída (Topinka, USGSICVO, 1997, modificado de Gardner et. al., 1995). A la derecha un depósito tomado a 7 km al SO del cráter del volcán Misti, denominado (en esta tesis) Sándwich

- De flujo: Los depósitos de flujo piroclástico es una mezcla de fragmentos sólidos con abundante ceniza que se generan por el colapso de la columna eruptiva, entonces los productos fluyen como ríos principalmente por las quebradas, a elevadas temperaturas.



**Figura 3:** Flujos piroclásticos generados por el colapso de una columna eruptiva, este mecanismo de emplazamiento genera depósitos como el de la derecha, este es un depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza en la quebrada Huarangual del volcán Misti.

**1.2.3 Productos volcánicos:** Los productos que emiten las erupciones plinianas se pueden clasificar de acuerdo a su tamaño de la siguiente manera (modificado de Fisher, 1991 y Schmidt, 1981).

- a) >64 mm: Bombas, tefras y Bloques (Balísticos)
- b) 2 a 64 mm: Lapilli tefra
- c) <2 mm: ceniza.

## **2. UBICACIÓN**

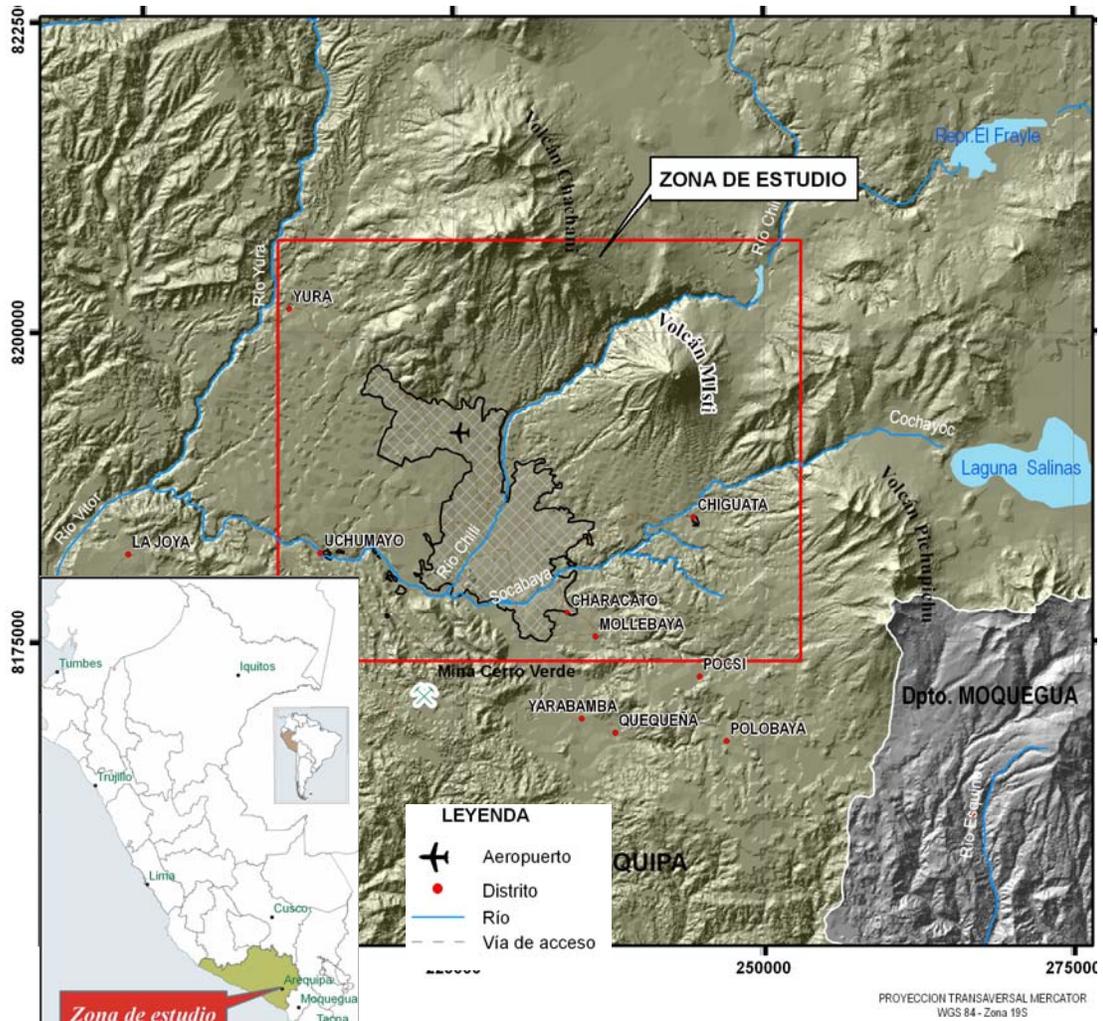
El estratovolcán Misti (16.30° S; 70.39 O) se encuentra en la cordillera occidental de los andes del Sur del Perú, pertenece a la Zona Volcánica de los Andes Centrales (ZVC) (De Silva y Francis, 1991, figura 7) y esta ubicado en el segmento norte de este.

Políticamente corresponde a la región Arequipa, departamento y provincia del mismo nombre, el cono del volcán Misti ocupa un área de 135 Km<sup>2</sup> aproximadamente, alcanza una altitud de 5822 m.s.n.m. y esta a tan solo 18 km del centro de la ciudad de Arequipa, donde viven alrededor de 1 millón de personas.

El depósito de caída “Autopista” actualmente aflora alrededor del volcán Misti hasta 25 km al oeste del cráter del volcán en 20 cm (figura 4).

## **3. OBJETIVOS DEL TRABAJO**

- Estudiar la sedimentología, dispersión volumen y geoquímica del depósito de caída de pómez “Autopista” con el fin de interpretar la dinámica que tuvo esta erupción, y de esta manera contribuir en la prevención y mitigación de desastres frente a una eventual reactivación del volcán Misti.
- Establecer la correlación tefroestratigráfica detallada de los eventos explosivos del volcán Misti en los últimos 33 870 ± 1 800 / 1460 años AP (GrN-21574) (Navarro, 2000).
- Poner esta tesis a consideración del jurado evaluador de la Escuela Profesional de Ingeniería Geología de la Universidad Nacional de San Agustín, para obtener el título profesional de Ingeniero Geólogo.



**Figura 4:** Mapa de ubicación del área de estudio, incluye el flanco sur del volcán Chachani y el flanco sur oeste del volcán Pichupichu.

#### 4. METODOLOGIA DEL TRABAJO

El presente estudio se inició el 2005 con la síntesis bibliográfica; para ello se revisaron publicaciones y tesis universitarias en las bibliotecas del INGEMMET, Sociedad Geológica del Perú, Universidad Nacional de San Agustín, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Universidad Nacional de Ingeniería e IRD; seguidamente se procedió a la adquisición de materiales (planos, imágenes y fotografías aéreas).

#### 4.1 TRABAJO DE CAMPO

Se realizaron tres campañas de campo, durante los meses de Mayo, Julio-Agosto y Octubre del 2005, sumando un total de 85 días. Se aprovecho los accesos de trocha carrozable, algunos caminos y lugares accesibles alrededor del volcán para realizar las siguientes actividades.

- Toma de muestras: La técnica empleada fue exclusiva para este depósito de caída, ya que su estratigrafía es poco común; se tomaron tres muestras de 2 Kg. aproximadamente en cada afloramiento que pertenecen a los niveles inferior, medio y superior, procurando que los pómez no se fracturen. Estas muestras sirven para realizar el análisis granulométrico y geoquímico del depósito.
- Medición de MP y ML: Se anotaron las dimensiones de los fragmentos de pómez (MP) y líticos (ML) mas grandes; para ello se recolectaron los diez fragmentos más grandes de cada nivel y se tomó nota de los diámetros mayores. Estos datos fueron utilizados en la estimación de la altura de columna eruptiva.
- Levantamiento de columnas tefro-estratigráficas: Se aprovechó los afloramientos que aparecen en cortes de las quebradas y carreteras. Las columnas corresponden a las secuencias de caída piroclástica que en su mayoría no superan los 5 metros de altura, por lo que se realizaron a escalas de 1:20 y 1:10. En base a estas columnas se logró realizar la correlación tefro estratigráfica de los depósitos del volcán Misti emplazados en los últimos 34 000 años. Así mismo se tomó nota de los espesores en cada afloramiento de la Autopista con los que se laboro el mapa de isópacas.

#### 4.2 ANÁLISIS DE LABORATORIO

- Tamizado de lapilli – pómez: La clasificación granulométrica de 15 muestras se realizó en el Laboratorio de Geología de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica de la Universidad Nacional de Ingeniería. Se usaron las mallas de 38.100; 31.750; 16.050; 6.525; 6.350; 4.750; 2.819; 1.999; 1.679;

1.191; 1.001; 0.841; 0.706; 0.594; 0.500; 0.419; 0.249 y 0.089 milímetros, bajo la norma ASTM. Esta información fue utilizada para la elaboración de los histogramas.

- Análisis petrográfico: Se mandaron a preparar secciones delgadas de 12 pómez fueron preparadas en el laboratorio del INGEMMET.
- Análisis Geoquímicos: El análisis geoquímico de elementos mayores de 12 pómez se realizaron a también en el laboratorio del INGEMMET y el análisis geoquímico de elementos traza de las mismas muestras se enviaron a los laboratorios de SGS.

#### 4.3 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

En forma alternada y posterior a las salidas de campo, se realizaron la interpretación de los resultados del laboratorio, elaborándose así los respectivos mapas de isópacas, isopleas y los diagramas estadísticos, que permitió hacer la estimación de la altura de la columna eruptiva, el volumen de material emplazado y el alcance de este. Finalmente se redactó la tesis profesional.

### 5. TRABAJOS ANTERIORES

Avendaño (2005), trata de correlacionar algunos afloramientos basándose en el contenido porcentual de minerales, considerando la correlación planteada por Legros.

Navarro (2000), describe brevemente algunos depósitos de caída del volcán Misti donde hace mención al depósito Autopista, y concluye confirmando la peligrosidad que representa el volcán para la ciudad.

Legros (2000), en su publicación “Tephra stratigraphy of Misti Volcano, Perú”, hace una breve descripción de 15 depósitos de caída de tefras ubicando estos puntos en un

croquis de escala 1:500 000 para cada depósito, donde indica el espesor de los afloramientos, los MP y ML. Además hace un análisis de la mineralogía y Geoquímica de elementos mayores de una muestra de cada depósito; Asignándole a la Autopista una edad de 30 000 años, finalmente Legros advierte el peligro que existe en la ciudad de Arequipa por el emplazamiento de tefras de producirse una erupción pliniana.

Legendre en 1999 concluye que la cristalización definida por su estudio petrográfico de los depósitos del volcán Misti, confirma el orden de cristalización normal de la serie de Bowen.

Suni (1998), desarrolla la sedimentología, de la erupción de hace 2000 años, presentando un mapa de peligros por depósitos de caída y lahares a escala 1: 150 000 del volcán Misti.

Entre los años 1997 y 2001, Thouret ha publicando artículos sobre la estratigrafía del volcán Misti con dataciones de lavas, tefras y depósitos piroclásticos, llegando a realizar un mapa general de la geología a escala 1:120 000.

Kosaka y Macedo, 2000, en base a la erupciones del siglo XV y la de hace 2000 años elaboran el mapa de peligros por caída de tefras a escala 1: 100 000 en su proyecto “Mapa de Peligro Potencial del volcán Misti”.

El volcán Misti tiene un estudio estratigráfico iniciado bastante general pero con algunas dataciones importantes (Thouret et. al., 2001) básicamente de los flujos de lava. Tefro-estratigráficamente partimos de dos depósitos de caída bien identificados y ubicados en el campo con edades de 31200 y 2060 años (Thouret et. al., 2001).

## **6. AGRADECIMIENTOS**

Deseo expresar mi especial agradecimiento a mis asesores guías y amigos: Ingenieros Jersy Mariño, Marco Rivera y Luisa Macedo, por las sugerencias, recomendaciones por despejar mis dudas durante la elaboración de la presente tesis, a ellos guardo un profundo respeto y admiración.

Mi agradecimiento al Instituto Geológico Minero y Metalúrgico en las personas de los Doctores José Macharé y Víctor Carlotto, por apostar por los investigadores jóvenes, brindarnos su apoyo y por permitirme usar la información para la elaboración de la presente tesis. Y a todos mis amigos y compañeros de trabajo por sus valiosos aportes consejos y recomendaciones.

A mi madre por el apoyo constante que me brindó para culminar mi carrera profesional.

A los Docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, quienes han contribuido en mi formación profesional.

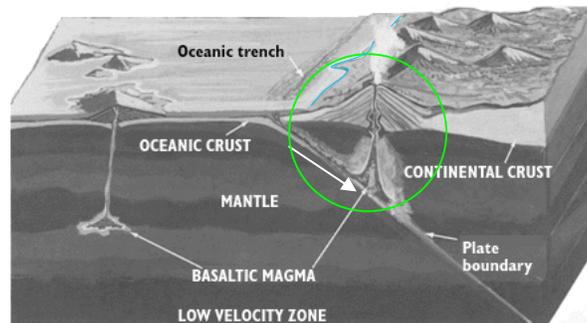
Finalmente a todos aquellos amigos, que contribuyeron a que este trabajo se haga realidad, mi agradecimiento infinito

## CAPITULO II: MARCO GEOLÓGICO ESTRATIGRÁFICO DEL VOLCAN MISTI

### 1. CONTEXTO ESTRUCTURAL

La relación genética entre subducción y vulcanismo ha sido confirmada por estudios geoquímicos que indican que la actividad magmática se inicia por la deshidratación y/o fusión de la litósfera oceánica subductada y por la interacción de los fluidos liberados en el momento en que los sedimentos de la astenósfera entran en contacto con la parte caliente del manto superior cuando son arrastrados hacia él. La presencia del agua reduce la temperatura de fusión de varios minerales y se convierte en catalizador para la fusión parcial del prisma del manto (Wörner, 1993).

Parte del magma cristaliza en el trayecto dando origen a los plutones y la otra parte es expelida hacia la superficie en forma de lava, piroclastos o gases produciéndose la actividad volcánica (figura 5).



**Figura 5:** Proceso de formación del magma por subducción normal de la placa oceánica de Nazca debajo de la placa continental sudamericana en el sur de Perú y norte de Chile.

En el Triásico-Jurásico comienza el proceso de subducción, pero la formación de la cadena volcánica sudamericana se inicia en el Mioceno inferior a medio (Isacks, 1988).

Según Sébrier y Soler (1991) del Oligoceno al Plio-Pleistoceno se produce un incremento de la actividad volcánica, que estaría relacionada al aumento de la velocidad de convergencia de las placas, seguido por una disminución de vulcanismo en tiempo histórico. Actualmente la velocidad de convergencia entre las placas de Nazca y la continental es de 7 - 8 cm/año (De Mets et al, 1980; Norabuena et al, 1999).

El volcanismo holocénico andino relacionado a la subducción, ha emplazado más de 200 estratovolcanes distribuidos en *cuatro arcos separados, conocidos como las zonas volcánicas Norte (ZVN), del Centro (ZVC), del Sur (ZVS) y Austral (ZVA)*; los cuatro ocurren en zonas donde el ángulo de subducción entre las placas oceánicas es relativamente inclinada (10 - 25°). Existen regiones donde el ángulo de subducción es bajo (< 10°), allí el volcanismo está ausente. En los Andes centrales el ángulo de subducción es marcadamente variable; así en el norte y centro del Perú la subducción es subhorizontal (alrededor de 10°), mientras que en la zona sur del Perú y norte de Chile es significativamente mayor (de 25° a 30°).

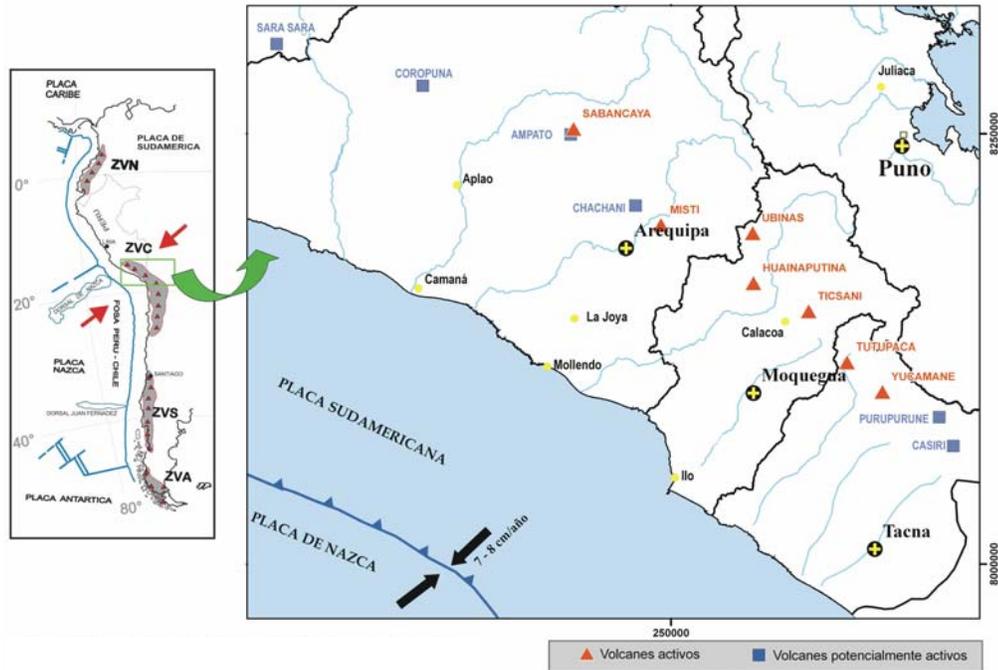
La corteza de la ZVC tienen una longitud aproximada de 1360 Km (Smink & Siebert, 1994), es paralela a la línea de costa, sus montañas superan los 4500 msnm y es extremadamente gruesa (>70 km). Las tasas de erosión por subducción del margen continental es posiblemente un 4% del volumen de la corteza oceánica subductada (Zeigler et al., 1981; Lallemand, 1995), este valor es elevado y se debe las condiciones climáticas hiperáridas y el bajo aporte de sedimentos a la fosa.

## 1.1 LOS VOLCANES ACTIVOS DEL SUR DEL PERÚ

El arco volcánico del Perú (50 km aproximadamente) está en el segmento norte de la ZVC (figura 6), los catorce volcanes activos están concentrados en la margen occidental de la placa continental sudamericana, la misma que esta ligada procesos de subducción con la placa de Nazca. Allí se encuentra el Misti, además al oriente se extiende un pequeño y discontinuo arco shoshonítico (Sébrier & Soler, 1991). Cabe destacar el volcanismo explosivo en el sur del Perú y norte de Chile en el mioceno que dio origen a los potentes depósitos de ignimbrítas riolíticas a riodacíticas y son observadas en áreas próximas al volcán Misti (ignimbrita Rio Chili de 13.19 Ma, e ignimbrita La Joya de 4.89 Ma, Pierrin, 2006).

En el Perú 400 edificios volcánicos han sido identificados (Fidel et al., 1997), de los cuales los aparatos volcánicos más antiguos (Mioplioceno) ya han sido destruidos por la erosión, pero otros aun muestran sus rasgos volcánicos (Holoceno) entre ellos

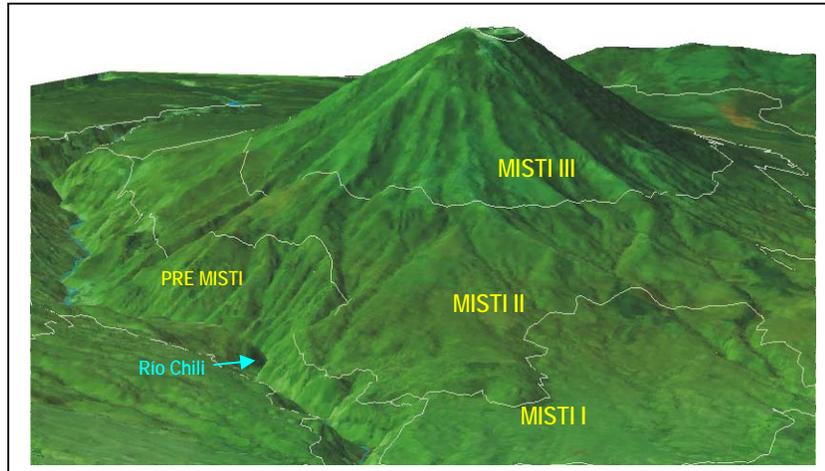
7 volcanes activos (Sabancaya, Misti, Ubinas, Tutupaca, Ticsani, Yucamane, y Huaynaputina) y 7 potencialmente activos (Ampato, Coropuna, Firura, Valle de los volcanes, Sara sara, Chachani y Tacora). Son considerados activos debido a la actividad durante el holoceno y a la manifestación fumarólica que presentan actualmente.



**Figura 6:** Distribución de los arcos volcánicos del Cenozoico en la cordillera de los andes (De Silva y Francis, 1991). Los volcanes activos del Perú, con actividad magmática desde el Plioceno tardío hasta el Holoceno (Sébrier & Soler, 1991, modificado).

## 2. MARCO GEOLÓGICO - ESTRAIGRÁFICO

El Misti es un estratovolcán de 3500 m de altura aproximadamente, es el más reciente del grupo de volcanes pleistocénicos de la zona de Arequipa (Thouret et al., 2001) y está formado por dos edificios principales: Estratovolcán (Misti 1) de edad pleistocena inferior a media (833 – <112 ka, según dataciones de  $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ ) y el estratocono (Misti 2, 3 y 4 con dataciones de  $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ , los depósitos de la base datan de hace 112 ka y los de la cima menores de 11 ka años); estos dos edificios han sido edificados por encima de una serie de ignimbritas y volcanoclastos plio-pleistocénicos agrupados como depósitos “Pre-Misti” (Thouret et al., 2001)



**Figura 7:** Vista general de la ubicación de los de los depósitos de los grupos que conforman el estratovolcán y el estratocono en los flancos SE, S y SO del volcán Misti.

## 2.1 PREMISTI

El estrato volcán Misti se formó sobre una serie de depósitos volcánicos preexistentes, los que es posible observarlos en el cañón del río Chili en el flanco oeste del volcán (figura 7). Estas unidades que conforman este sustrato (Pre-Misti) son ignimbritas de tres clases, la primera denominada “**Río Chili**” (300 m de espesor) de  $13.19 \pm 0.09$  Ma (dataciones de  $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ , Pierrine, 2005); la segunda “**La Joya**” de  $4.89 \pm 0.02$  Ma (Pierrine, 2005), conocida como sillar (Jenks y Goldich, 1956); y la tercera denominada “**Aeropuerto**”, conocida como salmón por su color rosaceo ó volcánico Sencca (Guevara, 1968 y Vargas 1970), datada en  $1.65 \pm 0.04$  Ma (Pierrine, 2005).

## 2.2 MISTI 1

Se inicia con el emplazamiento de depósitos de **flujos de lava** andesítica de matriz afanítica de edad 833000 años (Thouret et al., 2001), afloran en la margen izquierda del Río Chili en espesores menores a 300 m, habiendo recorrido hasta una distancia de 12 Km. (vista en planta desde el cráter); seguido de una **protrusión riolítica** en el flanco oeste, es un domo de composición riolítica bastante erosionado pero aun mantiene su morfología, es conocido como el hijo del Misti. Esta etapa culmina hace 112 000 años con una secuencia de **coladas** de lava también andesíticas las que tuvieron menor alcance que las primeras, afloran desde los 4000 msnm y el más conocido es el frente de lava de los 10 arbolitos.

### 2.3 MISTI 2

Luego de haberse construido la primera estructura volcánica del Misti, este se desestabiliza y se produce una avalancha de escombros que destruye en parte el estrato con emplazándose luego el depósito de **avalancha de escombros** en el flanco suroeste, sur y sureste del volcán llegando hasta 13 km del cráter, este depósito sobreyace a los flujos de lava del Misti 1 en las quebradas del Pato y San Lázaro; éste depósito está conformado por fragmentos muy heterogéneos y varios megabloques que han originado la formación de colinas en las facies medias y distales; a pesar que gran parte de la avalancha esta cubierta por secuencias de depósitos de flujo piroclástico y de lavas, han quedado expuestos los lóbulos terminales que dan a la ciudad con espesores mayores a 30 m en algunas quebradas.

Posteriormente comienza a construirse el segundo edificio del volcán Misti, hace 50000 años con la última actividad efusiva de **flujos de lava** de textura porfírica muy rico en anfíbol los que llegan hasta 5 Km desde el cráter vista en planta. Seguidamente se emplazan depósitos de flujo piroclástico de pómez y ceniza con espesores importantes, los que han cubierto parte de los depósitos infrayacentes.

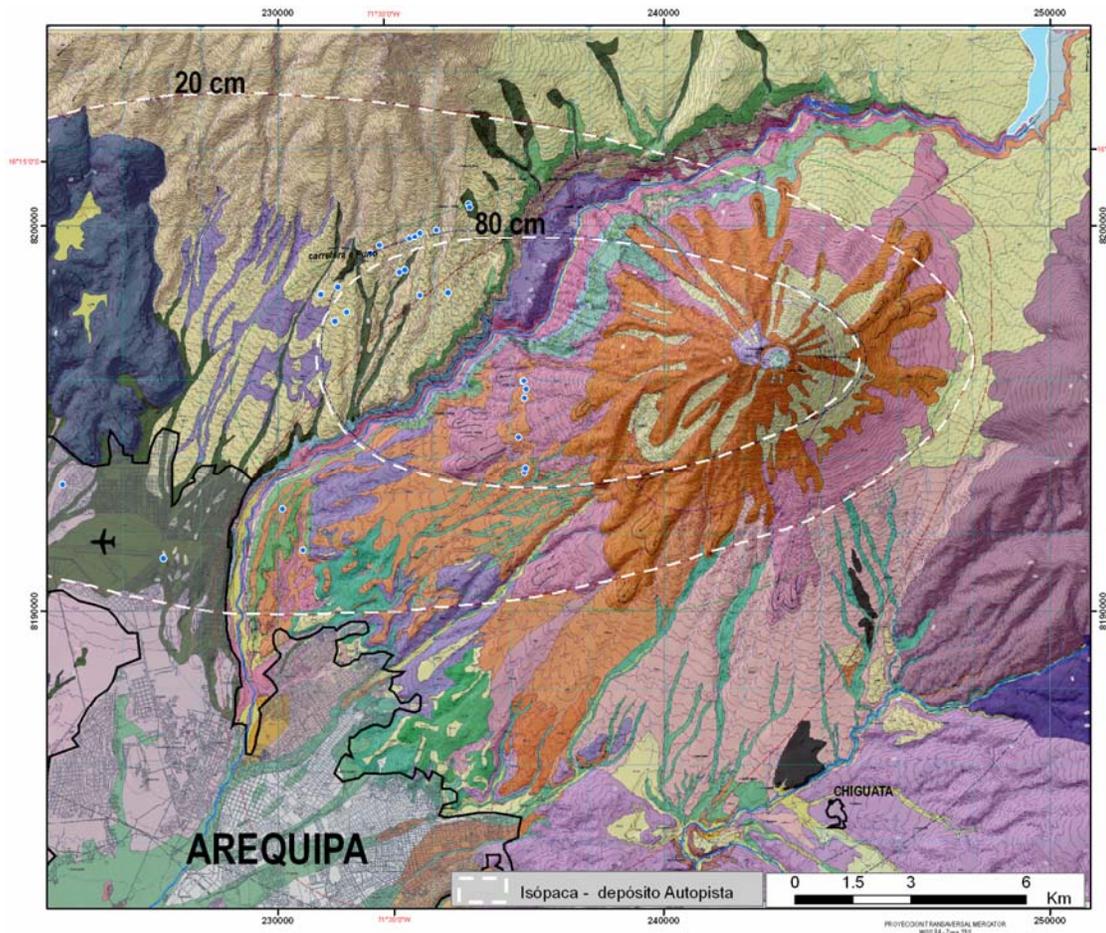
### 2.4 MISTI 3

Entre 33 800 y 11 000 años, el estrato volcán Misti se edifica con productos puramente piroclásticos, primero un importante numero de depósitos de flujo piroclástico de pómez y ceniza seguido de otros de bloques y ceniza; ellos están cubiertos por lo menos con 5 depósitos de caída de lapilli, entre los cuales se encuentra el depósito de caída “Autopista” que afloran alrededor del volcán.

### 2.5 MISTI 4

Esta última secuencia de los productos del volcán Misti de  $\leq 11\ 000$  años (Thouret e al., 2001) es un cono de cenizas cubierto por depósitos de flujo piroclástico y al menos diez depósitos de caída. Y el de la última erupción de regular magnitud de hace 2000 años. Posterior a esta secuencia piroclástica se han desarrollado importantes depósitos de lahar en las principales quebradas del volcán que han sido datadas en carbón entre 500 y 100 años (INGEMMET, 2005), estos depósitos

afloran en el abanico aluvial (donde se ha desarrollado la ciudad) y también en la planicie ignimbrítica.



**Figura 8:** Mapa geológico del volcán Misti, cartografiado a escala 1:25000 (INGEMMET, 2005), donde se señala en puntos azules los afloramientos del depósito de caída "Autopista". En líneas blancas discontinuas esta representado el espesor del depósito (isópacas) de 80 y 20 cm.

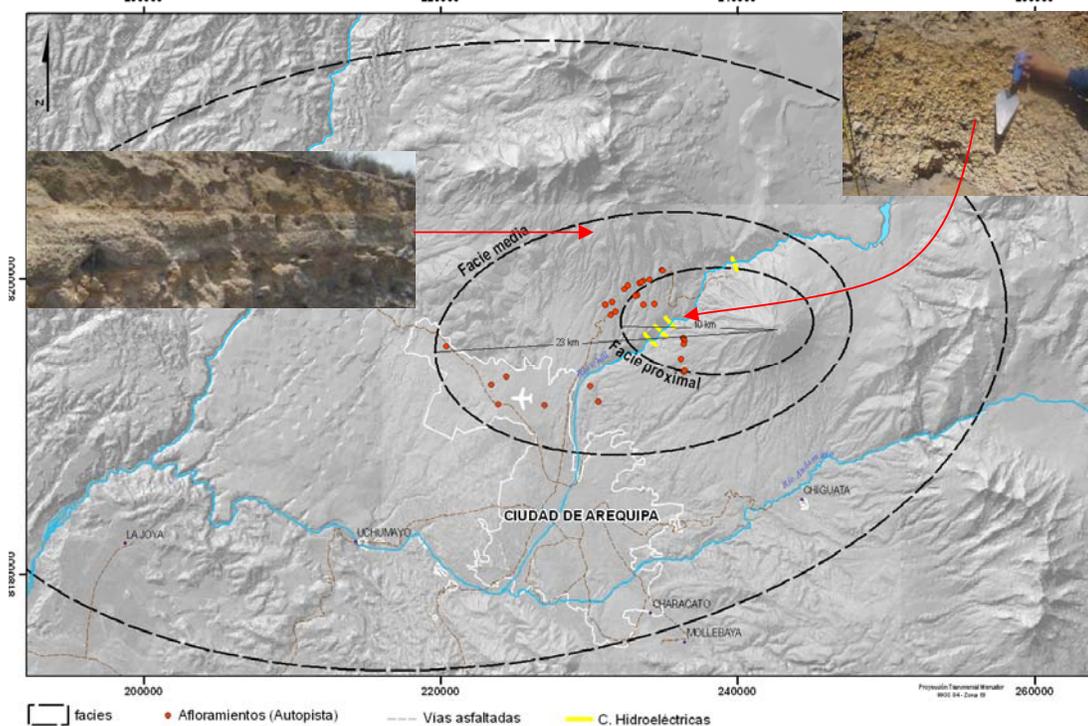
Ninguno de los depósitos registrados de la Autopista son visibles en planta, ya que solo afloran en las paredes de las quebradas y esta cubierto por mas de 10 depósitos de caída, por ello que esta representado por las líneas de igual espesor (isópacas) en el mapa geológico; este fue cartografiado a escala 1/25 000 sobre curvas de nivel cada 25 m. el mismo que se muestra a continuación, del que se hace una breve explicación con la ayuda de una columna estratigráfica general en la figura 9.



### CAPITULO III: SEDIMENTOLOGIA Y ESTRATIGRAFIA DEL DEPOSITO “AUTOPISTA”

El nombre Autopista fue asignado por Etienne Juvigné en 1994 porque se asemeja a un depósito de caída del volcán Laacher See en Alemania, denominada Autobahn que significa autopista, tiene dos pistas y un carril central que divide al depósito en dos secciones. Navarro en su tesis ya la describe lo con este nombre (figura 10).

Utilizando la definición de facies propuesta por Fisher y Schmincke (1984) señala que se delimitan tomando en cuenta la distancia de la fuente y el tipo de agente de transporte, además es variable de acuerdo a la magnitud del evento, por ejemplo en el monte Sant Helens, la facie proximal va de 0 – 24 km, (Fisher, 1990), sin embargo en caldera de Aso Japón, es considerado hasta los 45 km (Suzuki-Kamata, 1988), ambos de flujo piroclástico. En esta tesis consideramos tres facies: proximal (0 - 10 km), media (10 – 23 km) y distal (superior a 23 km), pero en esta ultima no se han encontrado afloramientos debido a la actividad erosiva que afectó el depósito.



**Figura 10:** Facies de dispersión del depósito decaída Autopista (proximal hasta 10 km, medial entre 10 y 23 km y distal superior a 23 Km). La figura de la izquierda es una vista alejada del depósito en la facie media donde se puede ver la línea oscura al medio; a la derecha un afloramiento típico en la facie proximal del depósito “Autopista”.

## 1. DESCRIPCIÓN ESTRATIGRAFICA

El depósito Autopista que aflora en espesores menores a 1.4 m; esta compuesto de lapilli y líticos lávicos (frescos y accidentales). La variación particular en la concentración de estos componentes es una característica exclusiva de este depósito, que conserva tanto en zonas proximales, medias y distales lo que lo hace reconocible en el campo. Tiene tres diferentes niveles que de ahora en adelante los llamaremos Autopista inferior, Autopista medio y Autopista superior (figura 11).

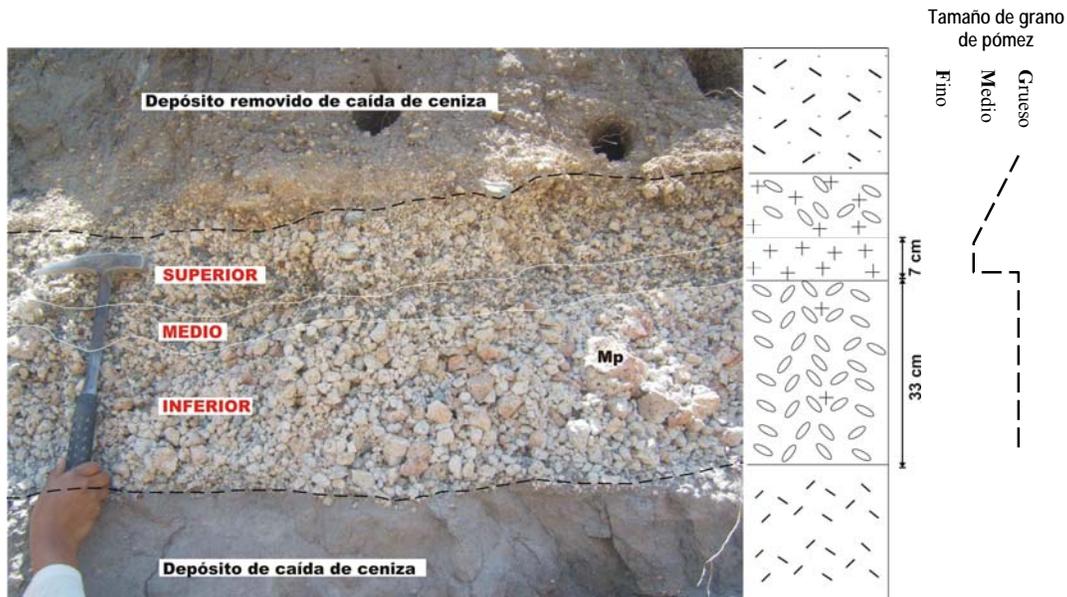
En zonas proximales el límite superior del depósito es algo difuso ya que la capa suprayacente de 10 cm está bastante alterada y erosionada que da la impresión de ser parte removida de la Autopista, pero ambos depósitos están separadas por una delgada suela dura de ceniza de 0.50 cm.

Los líticos son de dos clases (accesorios y accidentales), los accesorios son de color gris claro formaron parte de los flujos de lava anteriormente emplazados por el mismo volcán y que dieron lugar a la edificación del estratovolcán, los líticos accidentales también están presentes, formaron parte del conducto volcánico pero del substrato, son gnéisicos, frágiles y están alterados hidrotermalmente. La abundancia de líticos esta relacionado a la explosividad de de la erupción, ya que fueron arrancados del conducto volcánico y expulsados en forma conjunta de la misma forma que el material magmático.

- **Autopista inferior:** Esta capa es muy pobre en líticos, en general su color es blanquecino, de grano grueso y homogéneo predominando entre 5 y 3 cm en la facie proximal y de 1 a 3 cm en la facie medial. Las pómez de este nivel son de mayor tamaño de que las del superior; los MP (pómez de tamaño máximo) se ubican generalmente en el límite superior de este nivel.

- **Autopista media:** Ocupa aproximadamente el 9% del espesor de todo el depósito, es de color gris oscuro debido al elevado contenido de líticos. En este nivel generalmente se encuentran los ML (líticos de máximo tamaño) del depósito, mientras que las pómez en este nivel llegan a su menor tamaño.

- **Autopista superior:** Su espesor ocupa el 50% del total del depósito, en general el color es gris claro debido al mayor contenido de líticos que el nivel inferior; el tamaño de los pómez es medio de 2 a 4 cm en la facie proximal y 0.5 a 2 cm en la facie media. La variación del tamaño de grano es ligeramente granocreciente de la base al techo.



**Figura 11:** El depósito de caída autopista en la facie proximal, a 7 Km del cráter donde la parte superior del depósito esta removida, también se nota los pómez mas grandes del depósito se encuentran en la capa inferior, la Autopista esta entre dos depósitos de caída de ceniza .

El depósito aflora únicamente en cortes de carretera o de quebradas al sur oeste del volcán pues debido a que posterior al emplazamiento de este depósito se produjeron más de 9 erupciones plinianas que depositaron cenizas y tefras es por ello que en el mapa geológico esta representada por líneas de isópacas.

## 2. EDAD Y CORRELACION TEFRO-ESTRATIGRAFICA

De acuerdo a su posición en la columna tefro-estratigráfica (figura 14b), al depósito de caída “Autopista” se le asignó una edad promedio de 14 000 años debido a que en la mayoría de veces aflora entre dos depósitos guía datados por Thouret et. Al, (2001) bien reconocidos y datados que son el lapilli “Sacaroide” de  $20960 \pm 370$  años y el flujo piroclástico de pómez y ceniza de  $11280 \pm 70$  años (GrN-23961) que aflora en la urbanización Porvenir en el distrito de Miraflores. A continuación mostramos la

correlación tefro estratigráfica de los depósitos de caída desde hace 30 000 años (figura 12). Cabe destacar que entre cada depósito de caída de lapilli-pómez hay emplazados por lo menos una capa de ceniza.

### 2.1 DEPÓSITO DE CAÍDA “FIBROSO I”

El depósito está compuesto por pómez y líticos de tamaños menores 4 cm, (algunos raros llegan hasta 8 cm), está datado en  $31\,200 \pm 1330$  años por Thouret et. al, (2001). Es una capa blanca menor a 1.40 m de espesor donde los ML (Lítics de máximo tamaño) siempre están en la base, estos son grises, lávicos y frescos pero también hay alterados gnéisicos que se deshacen con solo tocarlos; los pómez son blancos perlados de aspecto sedoso y de vesículas alargadas dándole un apariencia de fibras; su mineralogía es exclusiva pues es muy rico en biotita y además contiene cristales de cuarzo. Este depósito aflora en Chiguata, sobre la quebrada Pastores y en Cayma (figura 12a).

### 2.2 DEPÓSITO DE “CAÍDA SACAROIDE”

Depósito de lapilli blanco, masivo y de granulometría aparentemente uniforme (menor a 1 cm), fue datado en  $20\,960 \pm 370$  años por Thouret et Al., 2001; los pómez son milimétricos y mantiene su tamaño en todo el depósito y contiene minerales de anfíbol, biotita y cuarzo. Este depósito posee una delgada banda oscura de 2 cm aproximadamente en la base, debido a la elevada concentración de cristales de anfíbol en este nivel. Aflora sobre la quebrada Pastores y en Alto Cayma, en un espesor de 50 cm en promedio (Figura 12b).

### 2.3 DEPOSITO DE CAIDA “FIBROSO II”

Depósito blanco de lapilli - pómez rico en líticos los mismos que están distribuidos en forma homogénea en todo el depósito. El aspecto de las pómez es fibroso por que sus vesículas son alargadas, muy similar al depósito de caída “fibroso I”, y se diferencia por que además de contener biotita y cuarzo tiene anfíbol tanto como la biotita. Los afloramientos de este depósito son escasos y a pesar de ello fue posible correlacionarlo en la columna tefro-estratigráfica compuesta, aflora sobre la Quebrada Pastores y en Alto Cayma, con espesores menores a 50 cm (figura 12 c).

#### 2.4 DEPOSITO DE CAIDA “BLANCO RICO EN LÍTICOS”

Depósito blanquecino de lapilli - pómez con minerales de piroxeno, anfíbol y cuarzo, la distribución granulométrica de los pómez es como sigue: gradación inversa hasta un tercio del depósito, el tamaño de grano es fino; los otros 2/3 es de grano grueso y sin gradación. Los líticos son menores 1 cm y están distribuidos en todo el depósito sin concentración preferencial alguna. Aflora en la quebrada el Pato (Villa ecológica) infrayaciendo al depósito “Autopista” y sobre la lava más antigua del volcán Misti al Oeste de Villa Ecológica (figura 12 d)

#### 2.5 DEPOSITO DE CAIDA “AUTOPISTA”

Este es un depósito blanquecino de lapilli - pómez que tiene una banda oscura casi al medio, este color oscuro se debe a la elevada concentración de líticos y son menores a 3 cm. Los pómez tanto del nivel inferior como del superior contienen minerales de plagioclasa, anfíbol y excepcionalmente biotita y sus vesículas son sub redondeadas y hasta amorfas. Aflora en la quebrada el Pato y al Oeste de Villa Ecológica, 1 Km. al noreste de los 10 arbolitos y en Alto Cayma. (figura 12e).

#### 2.6 DEPOSITO DE CAIDA BANDEADO

Es característico el bandeamiento bicolor gris y blanco en las pómez de este depósito, además de los minerales de anfíbol y plagioclasa que presenta. Aflora en casi toda la zona de estudio con espesores menores a 25 cm, aunque gran parte del depósito están ya removidos. Este depósito fue emplazado con gradación inversa en pómez (60%) y fragmentos líticos (40%) por una erupción subpliniana de columna eruptiva mayor a 13 km (Suni, 1999) datado en  $2060 \pm 40$  años Thouret et al., 1995, 1996, 1997.

#### 2.7 DEPOSITO DE CENIZA DEL SIGLO XV

Según las crónicas este depósito fue producido por una erupción del volcán Misti en la década del año 1470, está relacionado al tiempo del reinado del Inca Pachacutec. El depósito de ceniza es gris oscuro, contiene vidrio, plagioclasa y Piroxeno, esta cubriendo en gran parte el cono volcánico y los mayores espesores se ubican al noreste del cráter

## 2.8 CENIZA DEL HUAYNAPUTINA

Ceniza blanca que aflora en 10cm por lo general. En la quebrada Huarangal se nota las dos fases de este evento, la primera es pliniana de lapilli de 1mm con biotita, la segunda coignimbrita de ceniza mas fina y con cristales que fue datada en 1700 años D.C (Dávila, 2001)



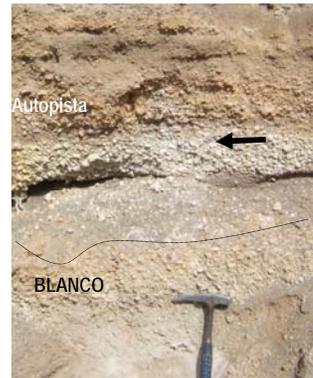
**Figura 12a:** Fibroso I



**Figura 12b:** Sacaroides



**Figura 12c:** Fibroso II

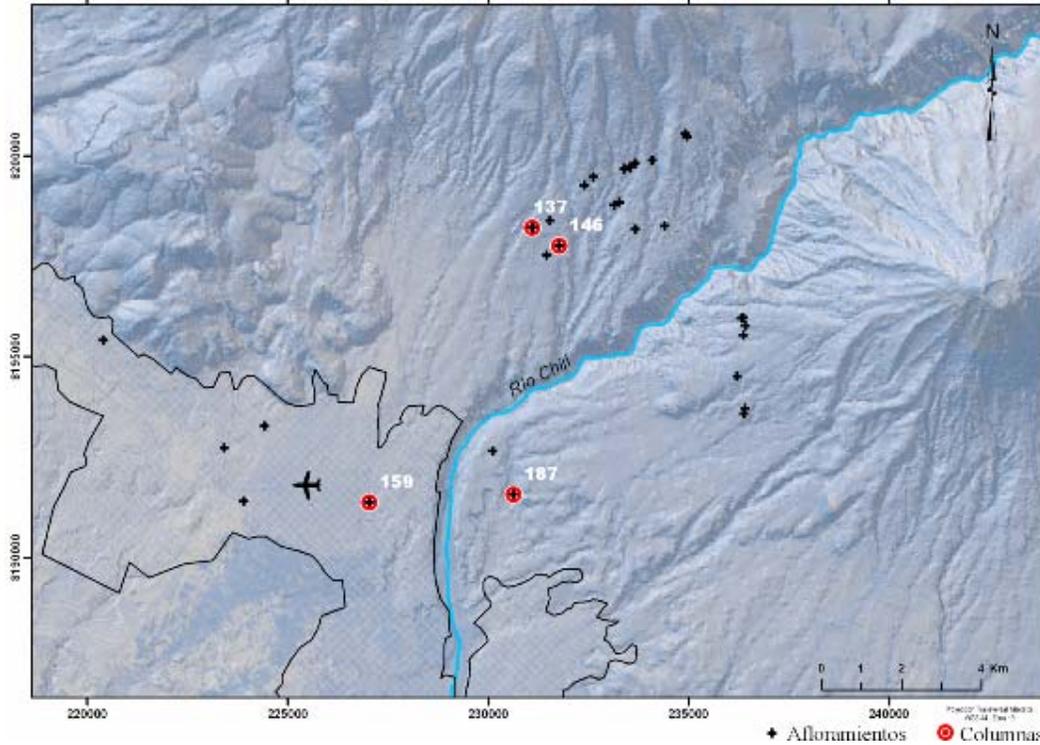


**Figura 12d:** Blanco

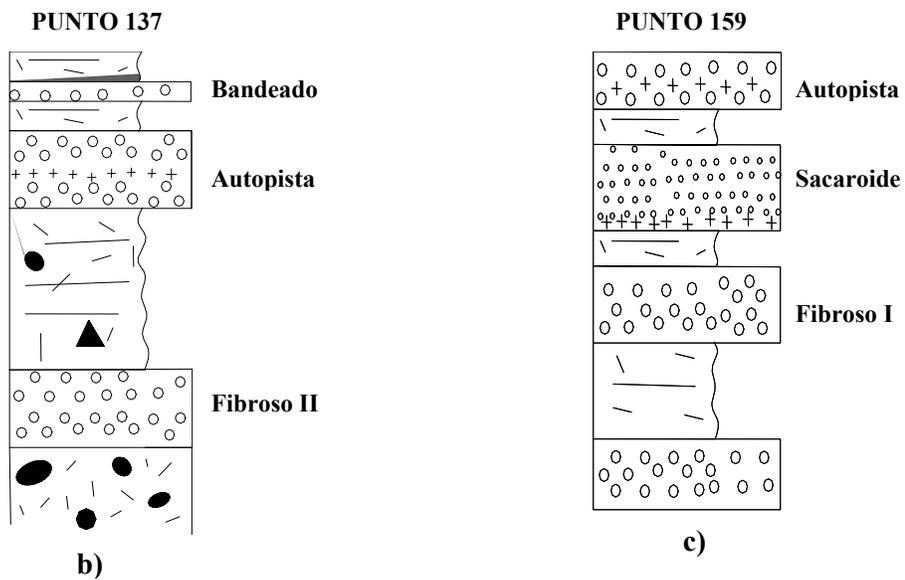


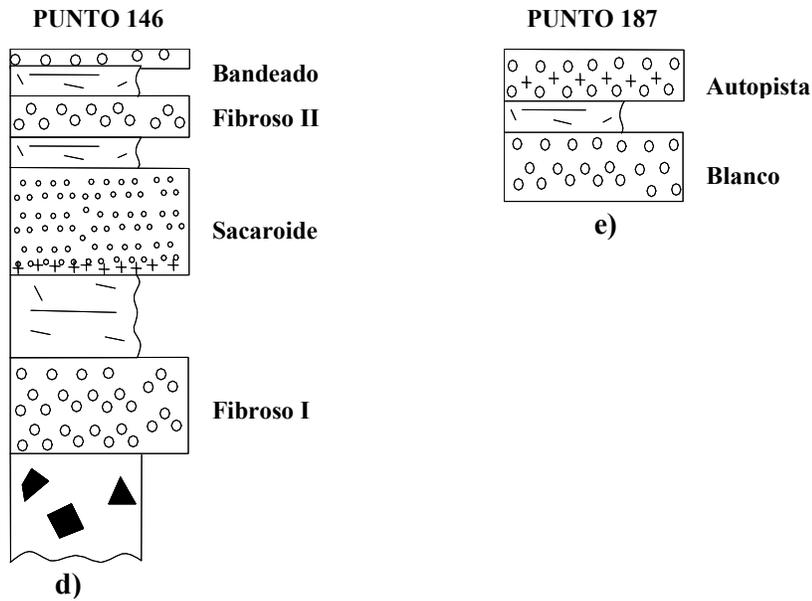
**Figura 12e:** Autopista

El orden de descripción de los depósitos esta de acuerdo a la correlación tefroestratigráfica de los 29 afloramientos encontrados, algunos de los más completos se muestran a continuación de acuerdo al siguiente gráfico.



**Figura 13 a:** Puntos de control donde se muestran los afloramientos del depósito de caída Autopista y los en color rojo las columnas mas representativas.





**Figura 13e:** Afloramiento de la facie proximal, a 6 km hacia el O-SO del cráter por el cerro Pacheco, donde se muestra algunos de los depósitos de la figura 13d.

En la columna de la figura 13d se nota los cinco depósitos de caída que suprayacen a Autopista.

La ausencia de los depósitos de parte de la secuencia comprendida entre el depósito Autopista y el Bandeado en la margen derecha del río Chili (figura 14) nos permite deducir la intensa actividad erosiva en el flanco sur del volcán Chachani entre los 14000 y 2000 años. De la misma forma en el flanco suroeste del volcán Misti entre los 30000 y 15000 años ya que los depósitos Fibroso I, Sacaroide, Fibroso II y Blanco no están presentes en esta parte del volcán, (a pesar de ser facie proximal). A ambos lados del cañón del Chili están presentes los depósitos de caída de hace 2000 años, del siglo XV y la ceniza del Huaynaputina del siglo XII.

SECUENCIA LITOEESTRATIGRAFICA	DATAACION M.A.	DESCRIPCIÓN
0.15 a 0.08	2060 ± 40	Caída de ceniza del volcán <b>Huaynaputina</b> del año 1600 D.C.
0.10		Caída de ceniza " <b>Pachacutec</b> :"
0.25 a 0.35		Caída de pómez de hace <b>2000 años</b>
1.70		Material removido de ceniza y pómez y fragmentos líticos
0.10		Caída de pómez gris rico en líticos, los pómez contienen plagioclasa y anfíbol
0.60		Caída de ceniza color gris, con una banda negra de 10 cm al techo
0.20		Caída de pómez color amarillo, las vesículas de los pómez son finas contienen plagioclasa, anfíbol
0.50		Ceniza removida color gris con algunos pómez
0.50 a 0.70		Caída de pómez escoriáceo " <b>Sandwich</b> " presenta tres niveles, el inferior es rico en líticos, el medio es una capa de 3 cm de ceniza color gris oscuro y la parte superior son pómez también rico en líticos
0.25		Ceniza removida
0.10 a 0.30		Caída de escoria bastante vesiculada, contienen plagioclasa y anfíbol
0.05		Ceniza removida
0.15		Caída de pómez color blanco, los pómez son de bajo peso específico y sus vesículas son circulares
0.15		Ceniza removida color gris oscuro
0.15		Paleosuelo
0.30 a 0.50		Caída de pómez " <b>Autopista</b> "
0.60		Ceniza removida
0.10		Caída de pómez color amarillo cremoso, los pómez contienen anfíbol y plagioclasa
0.20		Ceniza removida
0.50		Caída de pómez color amarillo ocre pobre en líticos, los pómez contienen anfíbol y plagioclasa
0.25	Ceniza removida	
0.70	Caída de pómez con concentración de líticos en la parte interior (se parece a la autopista pero invertido), los pómez son blanquesinos y contienen plagioclasa y anfíbol	
0.15	Ceniza color gris removida	
> 5.00	Flujo piroclástico rojizo de pómez y ceniza rico en líticos, los líticos son lávicos algo escoriáceos, contienen piroxeno, plagioclasa y anfíbol.	
100.00	Flujo de lava en bloques de 112 a 70 mil años	

**Figura 13 d:** Columna tefro-estratigráfica compuesta del flanco sur oeste del. Aquí se muestran los cinco depósitos de caída de lapillo-pómez que suprayacen al depósito "Autopista"

14



### 3. ANALISIS GRANULOMETRICO DEL DEPÓSITO

El análisis granulométrico se realizó Laboratorio de Geología de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica de la Universidad Nacional de Ingeniería. Se efectuó con el fin es estudiar el modo de emplazamiento y sus relaciones con el dinamismo eruptivo, a partir de las características sedimentológicas del depósito. Éstos dados en función de parámetros estadísticos tales como: mediana-promedio gráfico (tamaño de grano), desviación gráfica estándar (medidas de uniformidad-índice de sorteo).

#### 3.1 METODOS

El cribado es el método granulométrico utilizado que consiste en hacer pasar una muestra de tefras a través de una serie de mallas o tamices con diferente diámetro de abertura que van desde  $5 \Phi$  (31.75 mm) hasta  $4 \Phi$  (0.06 mm). El análisis ha sido realizado en base a quince muestras de 1 a 1.5 Kg cada una (previamente pesadas), ocho ubicadas en el sector proximal (MI-05-54, MI-05-55, MI-05-56, MI-05-58, MI-05-59, MI-05-60, MI-05-70, MI-05-71) y siete en el sector medio (MI-05-72, MI-05-73, MI-05-80, MI-05-81, MI-05-82, MI-05-86, MI-05-87), no se utilizó equipo de rotación para no fracturar las tefras al momento del tamizado. Posteriormente cada fracción obtenida, fue pesada para obtener el porcentaje relativo de cada una y realizar la respectiva corrección por pérdida de muestra. Los resultados del tamizado se muestran en el anexo II.

#### 3.2 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS

Para el análisis estadístico previamente se convierten los diámetros de las partículas expresados en milímetros (mm) a unidades **phi**; la escala **phi** fue definida por Krumbein en 1934 como el logaritmo negativo de base 2 del tamaño de grano en milímetros:

$\Phi = - \log_2 N$ ,      donde: N = tamaño de grano en  
mm ó la apertura de cada malla en mm.

### 3.2.1 HISTOGRAMAS

Los datos obtenidos en las tablas 2 y 3 han sido representados gráficamente en histogramas para visualizar de una manera simple la distribución granulométrica. En las abscisas van los diámetros de las partículas expresados en unidades phi ( $\Phi$ ); en las ordenadas van los pesos en gramos de cada fracción retenida. Los valores inferiores de  $\Phi$  que son los negativos y corresponden a las partículas más grandes y están representadas a la izquierda del diagrama.

Los histogramas unimodales indican buen sorteo y corresponden a depósitos de caída, los bimodales a depósitos de flujo piroclástico y si presenta subpoblaciones multimodales indica un pésimo sorteo es decir que intervino más de un proceso de transporte durante su emplazamiento.

- **En la facie proximal:** (Tabla1) Los gráficos de la figura 16 muestra una disposición unimodal en el nivel inferior pero con tendencia a bimodal, en el nivel superior se hace más multimodal. Debido a los resultados obtenidos, fue necesario un remuestreo de los depósitos para discriminar errores, cuyos histogramas muestran una disposición unimodal (figura 3 del Anexo 1) en los niveles inferior y superior.

FACIE PROXIMAL										
Malla		Peso en gramos								
mm	phi	MI-05-54	MI-05-55	MI-05-56	MI-05-58	MI-05-59	MI-05-60	MI-05-69	MI-05-70	MI-05-71
31.750	-4.99	6.9								
19.050	-4.25	155.2	62.7	61.5	69.3	49.5	8.3	62.7	61.5	69.3
9.525	-3.25	320.2	151.9	283.6	212.4	139.1	193.6	151.9	283.6	212.4
6.350	-2.67	174.3	112.3	232.2	130.9	162.8	188.2	112.3	232.2	130.9
4.750	-2.25	87.4	79.1	163.8	75.9	107.0	97.7	79.1	163.8	75.9
2.819	-1.50	105.5	131.4	270.4	111.7	204.1	189.5	131.4	270.4	111.7
1.999	-1.00	31.2	73.2	149.7	47.4	110.3	93.1	73.2	149.7	47.4
1.679	-0.75	12.0	38.7	75.0	19.8	52.9	43.9	38.7	75.0	19.8
1.191	-0.25	18.2	47.4	101.9	29.1	75.4	72.0	47.4	101.9	29.1
1.001	0.00	7.7	18.6	31.4	9.3	25.1	26.4	18.6	31.4	9.3
0.841	0.25	4.7	13.8	28.7	5.8	30.7	29.3	13.8	28.7	5.8
0.706	0.50	3.1	7.9	23.0	6.1	17.9	17.3	7.9	23.0	6.1
0.594	0.75	2.0	5.2	19.5	3.5	18.9	12.6	5.2	19.5	3.5
0.500	1.00	1.1	2.5	7.2	1.4	12.0	5.4	2.5	7.2	1.4
0.419	1.25	2.5	1.4	7.6	0.6	6.7	2.9	1.4	7.6	0.6
0.249	2.01	5.4	2.1	6.2	2.2	4.2	2.2	2.1	6.2	2.2
0.089	3.49	8.9	4.9	5.8	7.7	3.6	4.4	4.9	5.8	7.7
0.07	3.84	3.1	1.2	5.0	3.4	1.4	2.4	1.2	5.0	3.4
0.06	4.06	0.6	0.3	1.9	15.8	2.9	2.1	0.3	1.9	15.8

**Tabla 1:** Resultado del tamizado de muestras del sector proximal (de 0 - 10 km del cráter)



Los mayores pesos están centrados en las fracciones de  $-3.3 \Phi$  en el nivel inferior,  $-1.5 \Phi$  en el medio y  $-2.6 \Phi$  en el superior, esta disposición unimodal confirma el mecanismo de emplazamiento de caída para este depósito con predominancia de pómez de 1 cm.

- **En la facie media** (tabla 2), se han analizado 8 de las muestras tomadas en esta facie, los histogramas de las fracciones tamizadas se muestran en la figura 14, estas también en general muestran una tendencia unimodal cuya línea es platicúrtica a diferencia de la facie proximal que es mesocúrtica, notándose así la disminución en la cantidad de fragmentos grandes e incremento de las partículas finas.

En la figuras B y C del anexo 1 se confirma el buen sorteo de sorteo que es común en los depósitos de caída con modas centradas en  $-1.5 \Phi$  en los tres niveles del depósito, lo que indica una mayor abundancia de los fragmentos de 3 mm.

FACIE MEDIAL									
Malla		Peso en gramos							
mm	phi	MI-05-72	MI-05-73	MI-05-74	MI-05-80	MI-05-81	MI-05-82	MI-05-86	MI-05-87
19.050	-4.25	41.7	7.6	74.4	25.3	0.0	48.1	70.4	5.5
9.525	-3.25	170.5	88.5	79.7	95.8	54.2	108.2	149.6	20.6
6.350	-2.67	173.8	175.2	129.2	141.1	119.2	133.3	308.2	37.1
4.750	-2.25	139.8	122.6	107.7	114.8	119.9	126.0	223.3	48.0
2.819	-1.50	251.6	235.3	219.7	260.6	232.3	287.7	133.9	66.3
1.999	-1.00	121.7	149.5	155.7	168.8	149.5	202.4	172.2	76.4
1.679	-0.75	56.2	69.5	74.5	86.4	64.6	129.7	158.1	80.5
1.191	-0.25	63.6	124.6	115.6	115.9	130.2	190.3	27.0	86.9
1.001	0.00	29.0	40.7	36.8	36.7	54.4	94.5	37.2	89.8
0.841	0.25	27.5	44.8	47.6	46.7	66.1	71.8	15.5	92.1
0.706	0.50	19.6	31.9	30.0	34.3	47.7	69.4	14.1	94.0
0.594	0.75	18.0	26.0	30.1	34.7	37.7	61.1	9.7	95.5
0.500	1.00	9.9	8.5	19.2	22.8	27.4	47.1	6.1	96.3
0.419	1.25	4.7	7.3	12.3	12.5	16.8	36.2	3.5	96.8
0.249	2.01	10.9	6.8	14.3	11.0	12.6	27.6	3.5	97.3
0.089	3.49	30.4	13.4	37.9	18.5	8.5	7.2	14.6	98.6
0.07	3.84	6.2	3.5	6.4	6.4	2.1	2.7	49.3	98.9
0.06	4.06	22.7	15.6	19.6	16.8	6.4	10.9	9.1	100.0

**Tabla 2:** Resultado del tamizado de muestras de la facie medial (de 10 - 23 km del cráter).



En la figura 17, los gráficos están dispuestos de manera similar al depósito, se nota algunas diferencias en las barras de las graficas, debido a que los valores de phi no son equidistantes, dicha grafica es mejorada en el anexo 1.

### 3.2.2 VALORES ACUMULATIVOS

Los valores acumulados de las fracciones retenidas, nos permiten determinar los parámetros estadísticos (Tablas 3 y 4) de distribución de mediana (Md), promedio gráfico (Mz) y desviación estándar ( $\sigma \Phi$ ), con los cuales se evalúan las características de generación y emplazamiento de las muestras.

FACIE PROXIMAL										
Malla		% Acumulado en peso								
mm	phi	MI-05-54	MI-05-55	MI-05-56	MI-05-58	MI-05-59	MI-05-60	MI-05-69	MI-05-70	MI-05-71
31.750	-5.0	0.7						1.09	2.98	
19.050	-4.25	17.1	8.31	4.17	9.21	4.83	0.84	14.57	6.95	4.60
9.525	-3.25	50.8	28.44	23.41	37.43	18.41	20.37	42.96	25.31	17.40
6.350	-2.67	69.1	43.33	39.16	54.83	34.29	39.35	60.46	38.89	29.14
4.750	-2.25	78.3	53.81	50.26	64.92	44.74	49.21	69.43	48.06	38.15
2.819	-1.50	89.4	71.22	68.60	79.76	64.65	68.32	83.86	64.46	54.71
1.999	-1.00	92.7	80.92	78.75	86.07	75.42	77.71	89.22	74.57	64.99
1.679	-0.75	94.0	86.05	83.84	88.70	80.58	82.14	91.57	79.61	71.31
1.191	-0.25	95.9	92.34	90.75	92.57	87.94	89.41	94.25	87.61	80.38
1.001	0.00	96.7	94.80	92.88	93.81	90.39	92.07	95.47	90.73	84.25
0.841	0.25	97.2	96.64	94.82	94.58	93.39	95.02	96.71	93.84	88.15
0.706	0.50	97.5	97.68	96.38	95.40	95.13	96.76	97.64	96.10	91.20
0.594	0.75	97.7	98.37	97.71	95.86	96.98	98.04	98.32	97.62	93.97
0.500	1.00	97.8	98.70	98.19	96.05	98.15	98.58	98.59	98.43	96.16
0.419	1.25	98.1	98.88	98.71	96.13	98.81	98.88	98.71	98.86	97.77
0.249	2.01	98.7	99.16	99.13	96.43	99.22	99.10	98.97	99.18	98.97
0.089	3.49	99.6	99.80	99.53	97.45	99.58	99.54	99.43	99.62	99.50
0.07	3.84	99.9	99.96	99.87	97.89	99.71	99.79	99.75	99.82	99.74
0.06	4.06	100.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

**Tabla 3:** Porcentaje del peso acumulado de muestras que corresponden a la facie proximal. El color celeste señala los  $\Phi_{16}$ , el amarillo al  $\Phi_{50}$  y el morado al  $\Phi_{84}$

- La **mediana (Md)**, corresponde al diámetro que divide la distribución en dos mitades con pesos iguales, una constituida por partículas mas gruesas (diámetros mayores) y la otra por partículas mas finas (con diámetros menores), según Inman (1952).

$$Md = 50\% \text{ población de tamaño de granos}$$

FACIE MEDIA							
Malla		% Acumulado en peso					
mm	phi	MI-05-72	MI-05-73	MI-05-74	MI-05-80	MI-05-81	MI-05-82
31.750	-4.99		0	0	0	0	0
19.050	-4.25	3.48	0.65	6.15	2.03	0.00	2.50
9.525	-3.25	17.72	8.21	12.73	9.70	4.71	9.07
6.350	-2.67	32.23	23.16	23.40	20.99	15.08	17.16
4.750	-2.25	43.90	33.63	32.30	30.18	25.51	24.81
2.819	-1.50	64.90	53.72	50.44	51.05	45.72	42.28
1.999	-1.00	75.06	66.49	63.29	64.56	58.72	54.57
1.679	-0.75	79.75	72.43	69.45	71.47	64.34	62.44
1.191	-0.25	85.06	83.06	79.00	80.75	75.67	73.99
1.001	0.00	87.48	86.54	82.03	83.69	80.40	79.73
0.841	0.25	89.78	90.36	85.96	87.43	86.15	84.08
0.706	0.50	91.42	93.08	88.44	90.18	90.30	88.30
0.594	0.75	92.92	95.30	90.93	92.96	93.58	92.00
0.500	1.00	93.75	96.02	92.52	94.78	95.96	94.86
0.419	1.25	94.14	96.65	93.54	95.78	97.43	97.06
0.249	2.01	95.05	97.23	94.72	96.66	98.52	98.74
0.089	3.49	97.59	98.37	97.85	98.14	99.26	99.17
0.07	3.84	98.11	98.67	98.38	98.66	99.44	99.34
0.06	4.06	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

**Tabla 4:** Porcentaje del peso acumulado de muestras tomadas en la facie medial. El color celeste señala los  $\Phi_{16}$ , el amarillo al  $\Phi_{50}$  y el morado al  $\Phi_{84}$ .

FACIE PROXIMAL	MUESTRA	Md	FACIE MEDIA	MUESTRA	Md
	MI-05-54	-3.25		MI-05-72	-1.5
	MI-05-55	-2.25		MI-05-73	-1.5
	MI-05-56	-2.25		MI-05-74	-1.5
	MI-05-58	-2.67		MI-05-80	-1.5
	MI-05-59	-2.25		MI-05-81	-1.5
	MI-05-60	-2.25		MI-05-82	-1.0
	MI-05-69	-2.67			
	MI-05-70	-2.25			
	MI-05-71	-1.5			

**Tabla 5:** Valores de la mediana para muestras de las facies proximal y media

La distribución de la mediana (Md) en la facie proximal varía de -1.5 a -3.25 phi; en facies mediales su valor va de -1.0 a -1.5 phi (tabla 5); esto se puede ver al analizar la columna de frecuencias relativas acumuladas de la tabla 3 y 4 resaltado de amarillo ya que por debajo está el 50% de los valores y por arriba el otro 50%. Se nota una mejora de la selección de los depósitos de caída en las zonas distales, también se debe a la influencia seleccionadora del viento con respecto al grano fino, a medida que se alejan del volcán.

- El **promedio gráfico (Mz)**, según Folk y Ward (1957) representa una eficiencia con el método de los momentos de 88%, tiene en cuenta el valor central y se determina por la fórmula:

$$Mz = (\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}) / 3$$

FACIE PROXIMAL	MUESTRA	Mz	FACIE MEDIA	MUESTRA	Mz
	MI-05-54	-3.3		MI-05-72	-1.7
	MI-05-55	-2.5		MI-05-73	-1.5
	MI-05-56	-2.1		MI-05-74	-1.6
	MI-05-58	-2.6		MI-05-80	-1.4
	MI-05-59	-2.1		MI-05-81	-1.3
	MI-05-60	-2.1		MI-05-82	-1.1
	MI-05-69	-2.8		MI-05-86	
	MI-05-70	-1.9		MI-05-87	
	MI-05-71	-1.6			

**Tabla 6:** Valores del promedio gráfico para muestras de las facies proximal y media

La distribución del tamaño de grano promedio (Mz) del depósito, varía de -1.6 a -3.3  $\Phi$  en la facie media, de -1.1 a -1.7  $\Phi$  en áreas distales

- La **desviación estándar** que indica la media de uniformidad definida según Inman (1952), mide la distancia existente entre los valores de serie y la media y se halla por la relación:  $\sigma \Phi = (\Phi_{84} - \Phi_{16}) / 2$

FACIE PROXIMAL	MUESTRA	$\sigma \Phi$	FACIE MEDIAL	MUESTRA	$\sigma \Phi$
	MI-05-54	1.0		MI-05-72	1.5
	MI-05-55	1.1		MI-05-73	1.2
	MI-05-56	1.3		MI-05-74	1.6
	MI-05-58	1.6		MI-05-80	1.3
	MI-05-59	1.3		MI-05-81	1.5
	MI-05-60	1.3		MI-05-82	1.0
	MI-05-69	1.4		MI-05-86	
	MI-05-70	1.5		MI-05-87	
	MI-05-71	1.6			

**Tabla 7:** Valores de la desviación estándar para muestras de las facies proximal y media

El índice de sorteo se mide en la siguiente escala:

0-1 muy bien sorteado

1-2 bien sorteado

2-4 mal sorteado

>4 muy mal sorteado.

En las facies proximal y media los datos de selección y diámetro ( $\sigma \Phi$ ) varía entre 1 y 1.6 lo que indica que el depósito se ubica en el campo de caídas, (figura 18) donde se grafica el diámetro promedio (Md  $\Phi$ ) contra la selección (Mz  $\sigma \Phi$ ), el mismo sugiere que las muestras tomadas caen en el campo de los depósitos de caída.

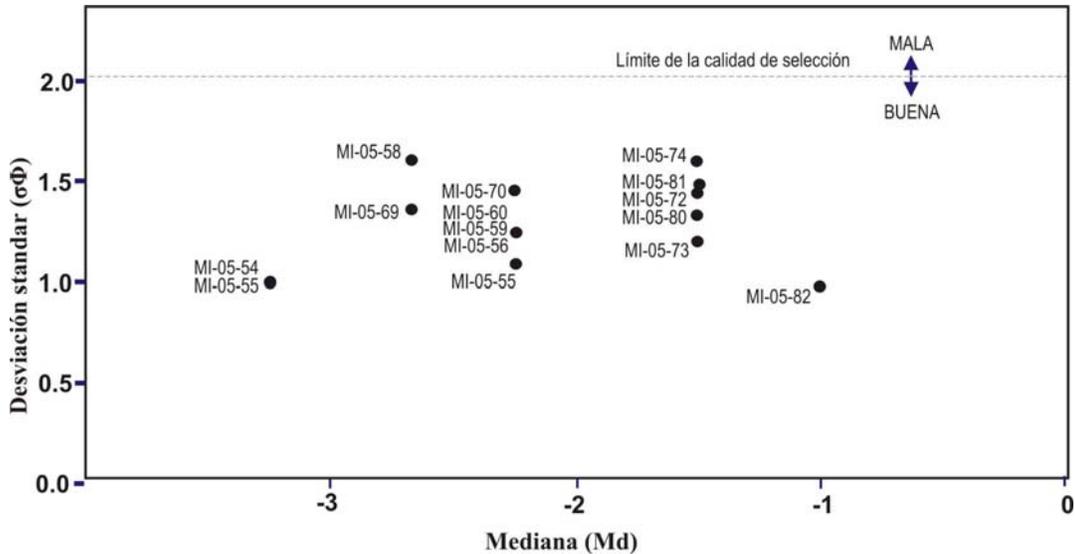


Figura 18: Diagrama de Walter (1971) características granulométricas del depósito de caída “Autopista”.

#### 4. ANALISIS DE COMPONENTES LITOLÓGICOS

Para el conteo de componentes se seleccionaron las fracciones 6.4, 2.8 y 0.6 mm de las muestras ya analizadas granulométricamente en el punto 3 del presente capítulo. Luego y se procedió a la separación de los componentes previo cuarteo de la muestra hasta obtener un aproximado de 400 granos, las fracciones de los tamaños 6.4 y 2.8 mm se realizó en forma manual pero la de 0.6 mm en un microscopio binocular. La clasificación de los componentes litológicos se realizó de acuerdo a la siguiente descripción:

##### A) PÓMEZ

La pómez es la textura del lapilli andesítico que se formó por la erupción explosiva que emplazó el depósito de caída Autopista, abundan las pómez de color blanquecino pero también hay algunos colorados y algo rojizos, estos últimos casi siempre están fracturados y son los más grandes a diferencia de los primeros que están normalmente enteros. Las pómez constituyen el 85 % de las tefras del depósito.



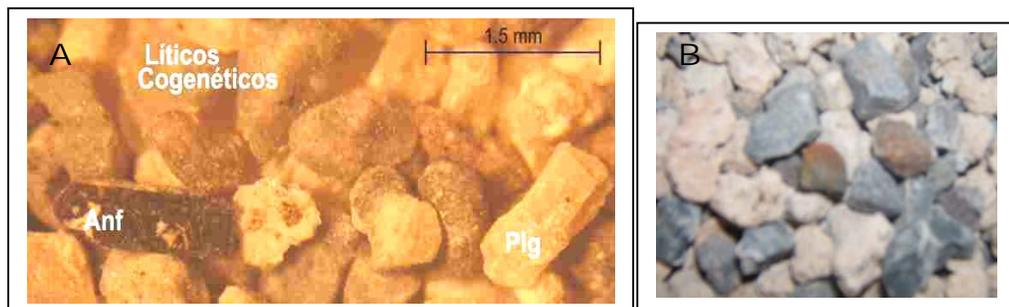
**Figura 19:** Pómez blancos y rojizos de la fracción 6.4 mm del depósito de caída "Autopista"

## B) LÍTICOS

Se han reconocido tres tipos de líticos, los cogenéticos, accesorios y los accidentales. Los líticos **cogenéticos** provienen del mismo magma que formó las pómez, son de color gris claro y algunas veces semitransparentes solo visibles en la malla 0.6 mm con ayuda de un microscopio binocular. Los líticos **accesorios** son los fragmentos que provienen de las rocas que formaron el cono volcánico, estos son frescos de color gris y de composición andesítica. Y los líticos **accidentales** son fragmentos de rocas lavicas, intrusivas, sedimentarias y metamórficas que formaron parte del basamento, generalmente están alterados hidrotermalmente.

Los líticos están presentes en el depósito por que fueron arrancados del conducto durante la erupción, muchos de ellos están frescos pero varios están alterados hidrotermalmente.

Los líticos constituyen el 15% del depósito (el 2 % de estos están alterados)

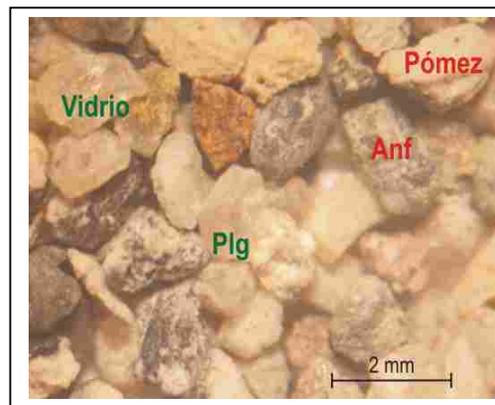


**Figura 20:** A) Líticos cogenéticos en la fracción 0.6 mm; B) líticos accesorios (gris) y accidentales (oxidados) de la malla 6.4 mm

### C) CRISTALES

Los cristales se encuentran libres debido a la intensa fragmentación durante la erupción explosiva. Solo se les ha reconocido en la fracción 0.6 mm con ayuda de un microscopio binocular de 10 aumentos, se pudo diferenciar dos grupos de cristales: opacos y translúcidos, los primeros están conformados por minerales de anfíbol, estos son negros y alargados de forma euhedral. El segundo grupo de cristales son los translúcidos que pueden ser de plagioclasa de forma euhedral a subhedral o los fragmentos de vidrio que casi siempre son amorfos y brillosos. Esporádicamente se ha encontrado biotita.

Los componentes litológicos pueden variar en función de su ubicación respecto al cráter o a su posición en el nivel del depósito.



**Figura 21:** Cristales de plagioclasa, Anfíbol y vidrio en la fracción 0.6 mm

#### 4.1 COMPONENTES EN EL SECTOR PROXIMAL (Hasta 10 km en dirección Oeste del cráter)

En la **malla 6.4 mm** (gráfico 22) el nivel inferior es muy pobre en líticos, con solo 5% entre accesorios y accidentales, el mayor porcentaje lo conforman los pómez habiendo alcanzado el 95 %. En el nivel medio crece el porcentaje de líticos hasta 19% donde el 3% son accidentales. En el nivel superior se reduce el porcentaje de líticos hasta 13% pero este valor es mayor al del nivel inferior, Se nota entonces un incremento en el contenido de líticos hacia el techo, lo que es visible también en el campo.



En general en sector proximal las pómez están presentes en un 88%, los líticos accesorios (frescos) en 10 % y los líticos accesorios (alterados) en 2%.

FACIE PROXIMAL

FRACCION 6.4 mm	MUESTRA	MI-05-55		MI-05-58		MI-05-59		MI-05-60		MI-05-70	
	Componente	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
	pómez	110	79	307	95	377	88	621	87	208	76
L. acces	25	18	13	4	37	9	78	11	61	22	
L. accid	5	4	3	1	12	3	15	2	5	2	
<b>TOTAL</b>	<b>140</b>	<b>100</b>	<b>323</b>	<b>100</b>	<b>426</b>	<b>100</b>	<b>714</b>	<b>100</b>	<b>274</b>	<b>100</b>	

**Tabla 8:** Resultados del conteo litológico en la fracción 6.4 mm de la facie proximal, estos datos están representados gráficamente en la figura 22.

En la **mallá 2.8 mm** (figura 23) el nivel inferior contiene hasta 10 % de líticos y muy pocos están alterados. En el nivel medio se duplica y solo el 3% son alterados. En el nivel superior, el porcentaje de líticos se mantiene incrementado pero en menor proporción que el nivel medio. Del mismo modo que en la fracción 6.4 se incrementa el contenido de líticos hacia el tope del depósito.

En general en sector medio los pómez están presentes en un 82 %, 16 % son accesorios y 2 % accidentales.

FACIE PROXIMAL

FRACCION 2.8 mm	MUESTRA	MI-05-55		MI-05-58		MI-05-59		MI-05-60		MI-05-70	
	Componente	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
	pómez	897	77	561	89	456	84	533	79	538	67
L. acces	51	4	57	9	77	14	126	19	231	29	
L. accid	212	18	9	1	8	1	17	3	30	4	
<b>TOTAL</b>	<b>1160</b>	<b>100</b>	<b>627</b>	<b>100</b>	<b>541</b>	<b>100</b>	<b>676</b>	<b>100</b>	<b>799</b>	<b>100</b>	

**Tabla 9 :** Resultados del conteo litológico en la fracción 2.8 mm de la facie medial, estos datos están representados gráficamente en la figura 23.



En la **mallá de 0.68 mm**. El porcentaje de componente varían de la base al techo como sigue: las pómez desde 48 % (en el nivel inferior), 18 % (en el nivel medio) hasta 13 % (en el nivel superior); los líticos cogenéticos de 5, 21 y 21%; los líticos accesorios de 2, 7 hasta 8%; los accidentales de 0.5, 4, hasta 7 %. Los cristales opacos de 16, 11, y 8% y los cristales translúcidos de 30, 39 a 42 %

En general en la facie proximal los pómez están presentes en un 26 %, los líticos 25 % y los cristales en 49%., entre minerales de plagioclasa, anfíbol, micas y partículas de vidrio que abundan en esta fracción. (tabla 10 y figura 24)

FACIE PROXIMAL

	MUESTRA	MI-05-55		MI-05-58		MI-05-59		MI-05-60		MI-05-70	
		Nº	%								
FRACCION 0.6 mm	Componente										
	pómez	100	33	117	32	30	9	23	8	68	12
	L. cogenet	54	18	27	7	85	24	44	16	122	22
	L. acces	29	10	7	2	13	4	37	14	32	6
	L. accid	13	4	3	1	9	3	21	8	28	5
	C. anf	35	12	62	17	40	11	23	8	61	11
	C. plg y vidr	73	24	152	41	172	49	123	45	240	44
TOTAL		304	100	368	100	349	100	271	100	551	100

**Tabla 10:** Conteo litológico en la fracción 2.8 mm de la facie proximal, estos datos están representados gráficamente en la figura 24

24

#### 4.2 COMPONENTES LITOLÓGICOS EN LA FACIE MEDIAL (entre 10 Y 23 Km) en dirección Oeste del cráter)

En la **mallá de 6.4mm**. Las pómez son siempre los más abundantes en los tres niveles 97, 74 Y 85 % pero se reduce ligeramente hacia el techo. Los líticos están mas concentrados al medio alcanzando un 25 % en este nivel donde el 1 % son líticos alterados al igual que en el superior.

En general en la facie medial para la mallá 6.4 mm, los pómez están presentes en un 85 %, los líticos 15 % de este último el 1% son accidentales.

FACIE MEDIAL

FRACCIÓN 6.4 mm	MUESTRA	MI-05-72		MI-05-73		MI-05-80		MI-05-82		MI-05-86		MI-05-87	
		Nº	%	Nº	%								
	pómez	349	99	480	74	930	98	600	92	180	94	267	78
L frescos	5	1	163	25	15	2	46	7	9	5	69	20	
L. alterados	0	0	7	1	1	0	9	1	2	1	6	2	
<b>TOTAL</b>	<b>354</b>	<b>100</b>	<b>650</b>	<b>100</b>	<b>946</b>	<b>100</b>	<b>655</b>	<b>100</b>	<b>191</b>	<b>100</b>	<b>342</b>	<b>100</b>	

**Tabla 11:** Conteo litológico en la fracción 6.4mm de la facie medial, estos datos están representados gráficamente en la figura 25

En la **mallá de 2.8 mm**. Los pómez disminuyen de la base hacia el techo desde 96, 77 hasta 77% (figura 26); los líticos accesorios se incrementan de 5, 22 a 24 % y los accesorios de 0, 1 a 0 %. Del mismo modo que en la fracción 6.4 se incrementa el contenido de líticos hacia el tope del depósito.

En general en la facie medial para esta mallá los pómez están presentes en un 83% y los líticos en 17 %.

FACIE MEDIAL

FRACCIÓN 2.8 mm	MUESTRA	MI-05-72		MI-05-73		MI-05-80		MI-05-81		MI-05-82		MI-05-86		MI-05-87	
		Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
	pómez	1825	95	1392	76	1445	96	711	77	2500	82	508	97	486	71
L frescos	104	5	419	23	64	4	196	21	540	18	14	3	199	29	
L. alterados	0	0	16	1	4	0	11	1	8	0	2	0		0	
<b>TOTAL</b>	<b>1929</b>	<b>100</b>	<b>1827</b>	<b>100</b>	<b>1513</b>	<b>100</b>	<b>918</b>	<b>100</b>	<b>3048</b>	<b>100</b>	<b>524</b>	<b>100</b>	<b>685</b>	<b>100</b>	

**Tabla 12:** Conteo litológico en la fracción 2.8 mm de la facie medial, estos datos están representados gráficamente en la figura 25





En la **mallá 0.68 mm** los componentes más abundantes en los tres niveles son los cristales translucidos (plagioclasa y vidrio) que alcanzan 41% y están distribuidos en un forma homogénea en todo el depósito; el segundo componente importante son los pómez estos son mas abundantes en el nivel inferior y disminuyen hacia el nivel superior. Luego los líticos cogenéticos son escasos en el nivel inferior 7 % pero se incrementan en el superior hasta 23%. Los líticos accesorios y accidentales aumentan y disminuyen paralelamente entre si, estos son menos frecuentes en el nivel inferior que en el superior pero en el medio son mas abundantes. Los cristales translucidos son mas abundantes que los opacos pero contrariamente a los líticos ambos aumentan en los niveles inferior y superior y disminuyen en el medio.

FACIE MEDIAL

FRACCION 0.6 mm	MUESTRA	MI-05-72		MI-05-73		MI-05-80		MI-05-81		MI-05-82		MI-05-86		MI-05-87	
		Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
		Componente													
	pómez	84	22	68	21	99	20	85	13	28	11	245	46	52	13
	L. cogenet	40	10	71	22	27	5	125	19	48	19	29	5	110	27
	L. accesor	26	7	48	15	13	3	69	10	29	12	25	5	28	7
	L. acciden	11	3	12	4	1	0	33	5	8	3	0	0	13	3
	C. anf	57	15	17	5	79	16	47	7	31	13	109	20	32	8
	C. plg y vidr	169	44	109	34	284	56	308	46	104	42	124	23	180	43
	TOTAL	387		325		503		667		248		532		415	

**Tabla 13:** Conteo litológico en la fracción 0.6 mm de la facie MEDIAL, estos datos están representados gráficamente en la figura 27.

27

## 4.3 RESUMEN DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES LITOLÓGICOS

En las mallas 6.4 y 2.8 mm tanto en la facie proximal como en la distal el contenido de pómez es alto llegando a su máximo porcentaje en el nivel inferior, este valor decrece notablemente en el medio y se recupera hacia el tope sin alcanzar el valor del nivel inferior. Los líticos son muy escasos en el nivel inferior, llegando a su máximo porcentaje en el nivel medio y se reduce en el nivel superior pero solo ligeramente.

En todos los casos y para los tres niveles los líticos alterados son mínimos, pues no superan el 3%. (Figura 28)

MALLA 6.4		INF	MED	SUP	MALLA 2.8		
Pómez	PROXIMAL	95.0	80.7	87.0	92.5	76.7	78.0
	MEDIAL	97.0	74.0	85.0	96.0	77.0	76.5
Líticos accesorios	PROXIMAL	4.0	16.3	11.0	9.0	20.3	19.0
	MEDIAL	2.7	25.0	13.5	5.3	22.0	23.5
Líticos accidentales	PROXIMAL	1.0	3.0	2.1	0.5	3.0	3.0
	MEDIAL	0.3	1.0	1.5	0.0	10.0	0.0

Tabla 14: Cuadro comparativo de componentes entre facies según el tamaño de grano.

En la malla 0.6 mm en la facie proximal el contenido de pómez decrece del nivel inferior al superior de 48 a 10 %. Los líticos accesorios y cogenéticos aumentan de 7 a 32 % en total. Los cristales translúcidos conforman la facie mineral mas abundante de esta fracción y se mantiene casi invariable en sus tres niveles, con un ligero incremento hacia el tope, lo que ocurre contrariamente a los cristales de Anfíbol además estos decrecen de la base al techo de acuerdo a la variación del porcentaje de pómez.

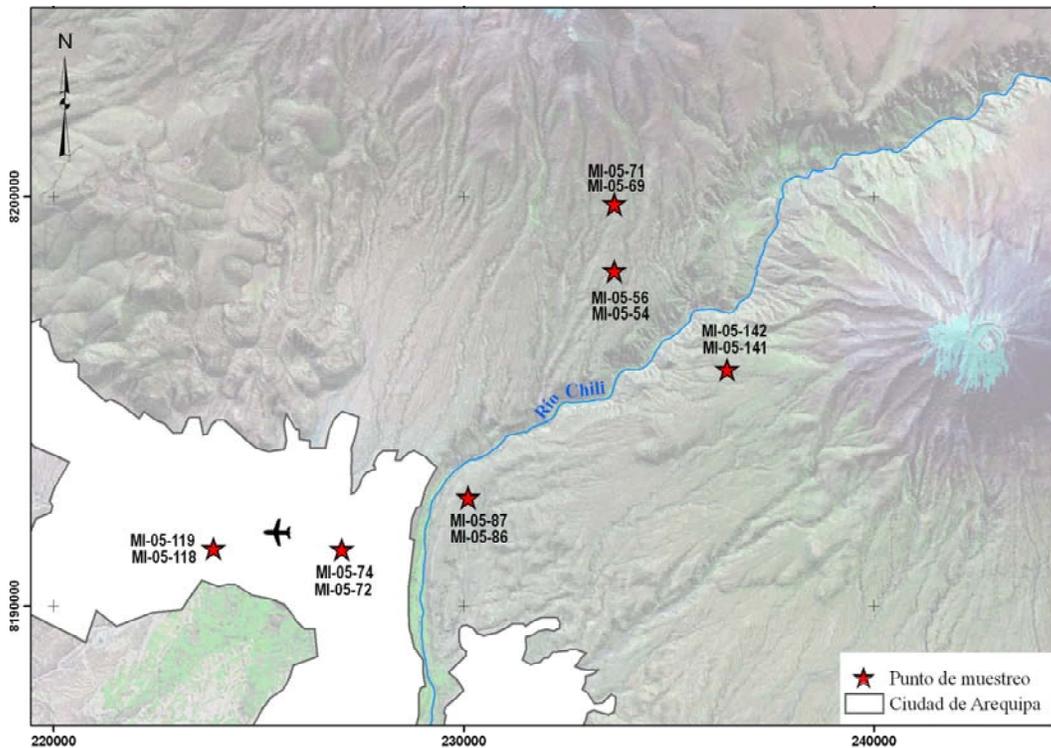
MALLA 0.6		INF	MED	SUP
Pómez	PROX	48.0	18.0	12.7
	MED	29.3	17.0	12.0
Líticos cogenéticos	PROX	4.5	21.3	21.3
	MED	6.7	20.5	23.0
Líticos accesorios	PROX	2.0	10.7	15.0
	MED	7.0	17.0	12.5
Cristales opacos	PROX	16.0	11.3	8.0
	MED	17.0	6.0	10.5
Cristales translúcidos	PROX	29.5	39.0	42.7
	MED	41.0	40.0	42.5

Tabla 15: Cuadro comparativo de componentes entre facies en la malla 0.6 mm



## 5. PETROGRAFÍA

Un total de 12 muestras de pómez del depósito “Autopista” fueron recolectadas alrededor del volcán Misti (figura 29). Estas muestras fueron estudiadas al microscopio petrográfico. La ubicación de las muestras se presenta en la figura 29. En cada punto se tomó dos muestras de pómez, una corresponde al nivel inferior y la otra al superior.



**Figura 29:** ubicación de muestras para secciones delgadas y análisis geoquímico de elementos mayores y traza.

### 5.1 DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

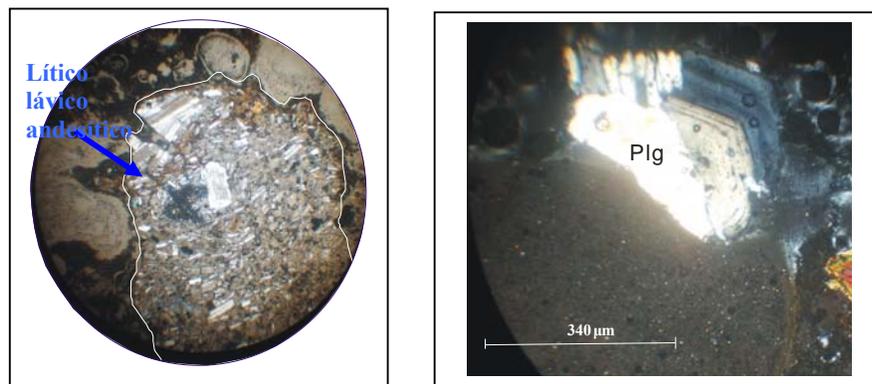
En general, las pómez son de colores blanco grisácea a amarillentas, de textura vesicular, bajo peso específico y de tamaño menor a 4 cm, principalmente las localizadas en áreas proximales. Estas contienen fenocristales de plagioclasa, biotita, anfíbol, piroxenos, óxidos, incluidos dentro de una matriz bastante vesiculada. Las vesículas son sub redondeadas a amorfas y miden menos de 3mm de diámetro.

## 5.2 DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Las pómez son vesiculares cuya matriz es afanítica, presenta fenocristales subhedrales de plagioclasa, anfíbol, piroxeno, biotita y minerales opacos. En general estos fenocristales miden menos de 1.2 mm. Los fenocristales están dispersos en la matriz donde las vesículas son sub redondeadas a amorfas menores de 3 mm. La textura es ligeramente glomeroporfirítica y algunas veces microseriada.

A continuación se presenta la descripción de las características de las fases minerales distinguidas en las pómez del depósito “Autopista”.

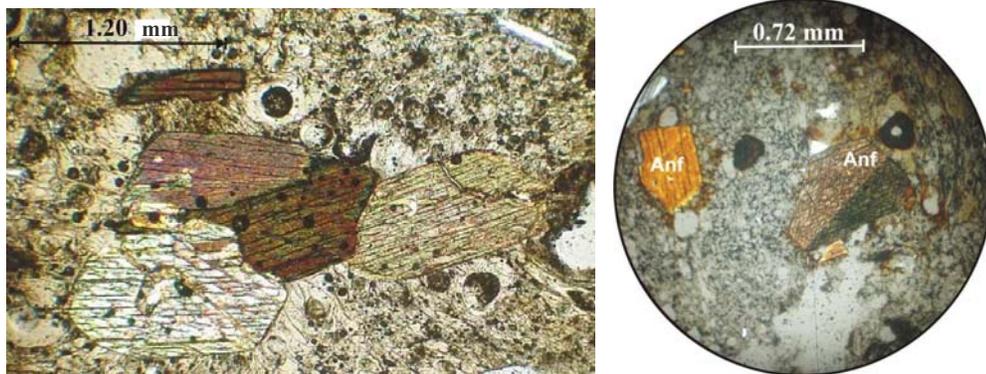
- **Plagioclasa:** Corresponde a la fase mineral predominante, y está presente hasta en un 12% y se distinguen hasta tres tamaños 1200, 400 y 20  $\mu\text{m}$ . La mayoría tienen forma subhedral a euhedral. Algunas plagioclasas, sobre todo las más grandes están zonadas mientras que las medianas están fracturadas y presentan maclas polisintéticas. En la matriz se distinguen microlitos de plagioclasa que frecuentemente muestran un ligero alineamiento. Algunas rocas muestran fenocristales con líticos mayores a 5 mm andesíticos que están incrustados en el material vítreo.



**Figura 30:** Secciones delgadas de las muestras MI-05-87 y MI-05-74 del nivel superior, a la izquierda se muestra un fragmento lítico lávico que presenta una agrupación de plagioclasas que esta presente a manera de xenolito incrustado en el magma. A la derecha se distingue un fenocristal de plagioclasa zonada.

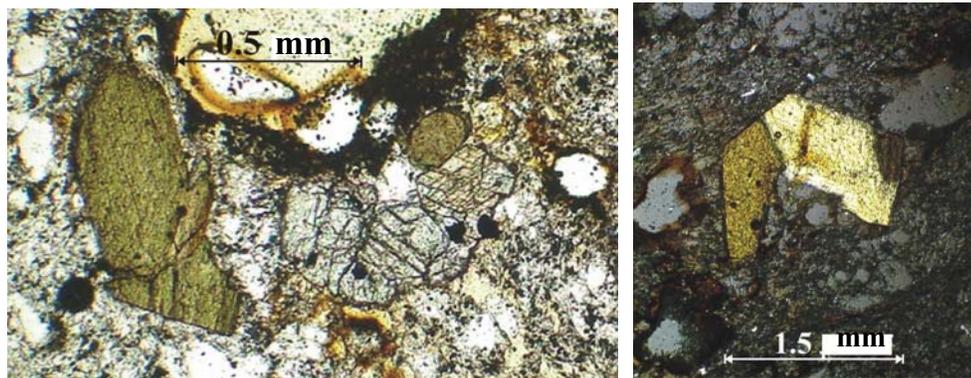
- **Anfíbol:** Están presentes en aproximadamente 8 %, algunos alcanzan (los alargados) hasta 1.2 mm. Predominan los menores a 750  $\mu\text{m}$ , también hay pequeños menores 150  $\mu\text{m}$ , estos son de forma subhedral. La mayoría de

fenocristales se encuentran fragmentados, algunos muestran un borde de óxidos y otros están siendo alterados.



**Figura 31:** Sección delgada de la muestra MI-05-86 que corresponde a un fragmento de pómez del nivel inferior del depósito (nícoles cruzados). En esta muestra se distinguen fenocristales de anfíbol subhedral y anhedral dentro de una matriz vítrea con vesículas.

- **Piroxeno.**- En las pómez también se distinguen fenocristales de piroxenos, principalmente ortopiroxenos. Estos están presentes entre 1 y 2% y son menores de 300  $\mu\text{m}$ . A veces se distinguen aglomerados de fenocristales de piroxenos, asociados a óxidos de Fe. Estos fenocristales tienen formas euhedrales y subhedrales.



**Figura 32:** A la izquierda sección delgada de pómez del nivel inferior del depósito, donde se distingue un fenocristal de anfíbol y un aglomerado de fenocristales de piroxeno. A la derecha un cristal de subhedral de biotita.

- **Biotita.** Esta mica es poco rara en las pómez. Son de formas subhedrales y anhedrales que miden hasta 2 mm. Son de colores marrones opacos (nícoles paralelos), figura 32.

**Minerales Opacos.** Corresponden a óxidos de Fe-Ti que miden entre 100 y 50  $\mu\text{m}$ . Estos están principalmente en la matriz y como inclusiones en los fenocristales de anfíbol y piroxenos.

## 6. GEOQUÍMICA

Se seleccionaron las pómez más grandes y menos alteradas del nivel superior e inferior del depósito “Autopista” para luego ser analizados en el laboratorio Química del INGEMMET, donde la Si, Al, Ti, Mn, Ca, Mg, K y Na, fueron analizados por Absorción Atómica – Flama, H<sub>2</sub>O 105 °C, PxC por el método clásico – Gravimétrico, Fe (II) por el Método Volumétrico – Titulación con K<sub>2</sub> CrO<sub>7</sub> y el P por el Método espectrofotométrico UV-VIS .

NIVEL	CODIGO DE MUESTRA	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	TiO <sub>2</sub> %	MnO %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	FeO %	CaO %	MgO %	K <sub>2</sub> O %	Na <sub>2</sub> O %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	H <sub>2</sub> O 105 °C %	PxC %	TOTAL
F I	MI-05-85	70.00	13.50	0.13	0.09	1.03	0.69	1.25	0.32	3.45	3.55	0.12	0.66	4.15	98.9
	MI-05-75	66.30	13.00	0.15	0.08	1.01	0.69	3.75	0.62	3.24	3.72	0.13	1.15	5.55	99.4
	MI-05-79	69.40	13.90	0.13	0.09	1.13	0.52	1.42	0.31	3.56	3.87	0.11	0.56	4.19	99.2
SA	MI-05-62	63.30	13.90	0.48	0.10	1.93	2.58	3.64	2.05	2.61	3.60	0.20	0.53	3.83	98.8
	MI-05-66	62.70	14.80	0.51	0.10	1.94	2.58	4.52	1.99	2.88	3.60	0.20	0.37	2.84	99.0
F II	MI-05-89	63.40	14.60	0.49	0.09	2.96	2.15	5.12	< 0,01	2.40	3.77	0.21	0.46	3.18	98.8
BL	MI-05-88	58.50	16.20	0.65	0.11	2.86	3.44	6.02	2.90	1.86	3.84	0.27	0.33	2.89	99.9
Autopista inferior	MI-05-54	59.70	16.50	0.58	0.12	2.66	2.66	4.88	2.10	2.26	3.90	0.24	0.20	2.85	98.65
	MI-05-69	59.10	15.90	0.59	0.10	2.09	3.09	5.11	2.18	2.29	3.97	0.24	0.45	3.21	98.3
	MI-05-86	60.70	15.80	0.81	0.10	1.65	2.92	4.73	2.35	2.29	4.02	0.26	0.27	3.40	99.3
	MI-05-118	61.40	15.40	0.80	0.09	1.06	3.35	4.91	2.28	2.34	3.95	0.34	0.33	3.68	99.9
	MI-05-141	58.90	16.20	0.77	0.10	1.70	3.01	4.83	2.27	2.22	3.75	0.26	0.66	3.71	98.4
Autopista superior	MI-05-56	60.60	16.10	0.59	0.10	2.75	2.58	4.85	2.09	2.27	4.11	0.22	0.21	2.50	99.0
	MI-05-71	58.70	16.10	0.63	0.10	2.40	3.09	5.46	2.34	2.18	3.65	0.25	0.95	3.11	99.0
	MI-05-87	60.50	15.10	0.73	0.10	1.62	2.84	4.86	2.31	2.05	3.64	0.28	0.38	4.01	98.4
	MI-05-74	58.40	16.20	0.82	0.10	1.78	3.44	5.64	2.89	1.85	3.61	0.24	0.71	4.18	99.9
	MI-05-119	61.30	15.40	0.82	0.09	1.42	3.01	4.80	2.35	2.32	3.85	0.32	0.29	3.67	99.6

**Tabla 16:** Resultado de análisis geoquímico de elementos mayores de las pómez de caída “Autopista” mejor conservados del volcán Misti. Además se presentan resultados de otros depósitos de caída: F I (Fibroso I), SA (Sacaroide), F II (Fibroso II), BL (Blanco). Ver figura 14.

Por su parte, los análisis geoquímicos de elementos traza se realizaron en los laboratorios SGS, por el método ICMS90; Na202 Fusión ICP + ICPMS, obteniéndose los siguientes resultados:

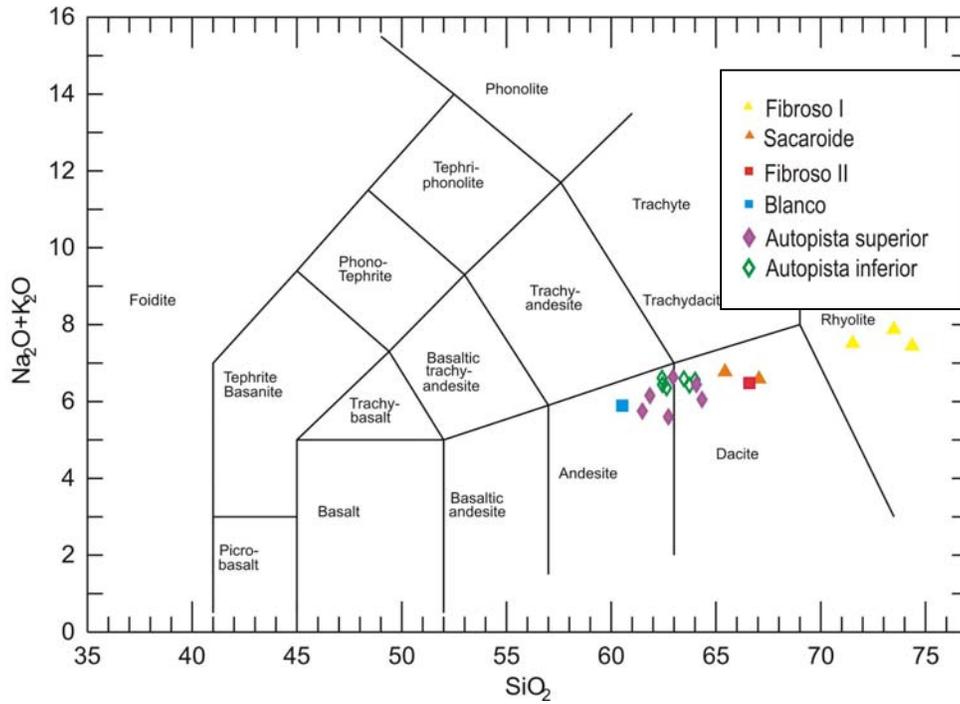
	MUESTRA	Ba	Cr	Ni	Sr	V	Zr	Ce	Co	Ga	La	Nb	Nd	Pb	Rb	Th	Y
F I	MI-05-85	1220	10	5	278	5	101	51	1	18	29	8	23	22	76	5	11
	MI-05-75	1150	20	5	382	10	100	43	1	17	25	8	18	21	72	4	10
	MI-05-79	1230	10	5	365	5	115	53	1	18	29	8	20	21	77	5	10
SA	MI-05-62	953	50	20	465	86	148	72	14	20	37	8	31	17	62	5	14
	MI-05-66	1080	60	19	599	93	171	72	14	21	38	8	30	18	62	5	13
F II	MI-05-89	1190	80	31	697	110	154	62	13	19	34	6	31	19	48	4	14
BL	MI-05-88	926	60	31	861	132	144	52	19	21	28	5	28	13	37	3	16
Autop. inf	MI-05-54	972	20	20	766	93	168	64	14	21	34	6	28	15	50	4	12
	MI-05-69	925	20	68	729	92	152	67	15	21	35	6	29	18	52	4	12
	MI-05-86	998	70	18	743	104	172	62	14	20	32	6	28	15	51	4	13
	MI-05-118	926	50	10	686	91	158	58	12	19	30	6	26	18	47	3	12
	MI-05-141	980	40	13	738	98	176	63	13	21	33	6	30	15	51	4	13
Autop. sup	MI-05-56	1100	30	22	854	110	173	63	14	21	33	6	28	14	49	4	11
	MI-05-71	997	110	18	759	98	173	64	15	22	34	6	31	15	52	4	14
	MI-05-87	999	130	19	754	103	174	61	14	20	34	6	33	16	51	4	18
	MI-05-74	882	140	27	770	132	138	47	17	21	25	5	23	74	42	2	12
	MI-05-119	993	60	11	726	105	171	63	14	20	32	6	29	14	50	4	13

**Tabla 17:** Resultado del análisis geoquímico de elementos traza de las pómez del depósito de caída “Autopista” mejor conservados y depósitos de caída de hace 30,000 años.

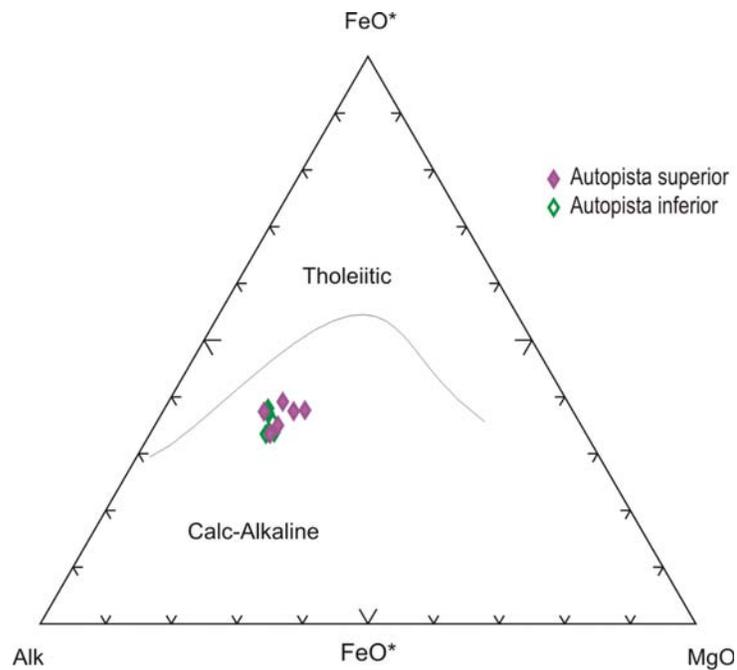
## 6.1 CLASIFICACIÓN DE LA SERIE

Los resultados de los análisis químicos son presentados en algunos diagramas de clasificación clásica de rocas volcánicas (figuras 32 y 33), como el diagrama de TAS (“total álcalis vs sílice”) de Le bas et al., 1986. Después de este diagrama, la totalidad de pómez “Autopista” son constituidas de andesitas con promedio de 63% de SiO<sub>2</sub> tanto en el nivel inferior como en el superior.

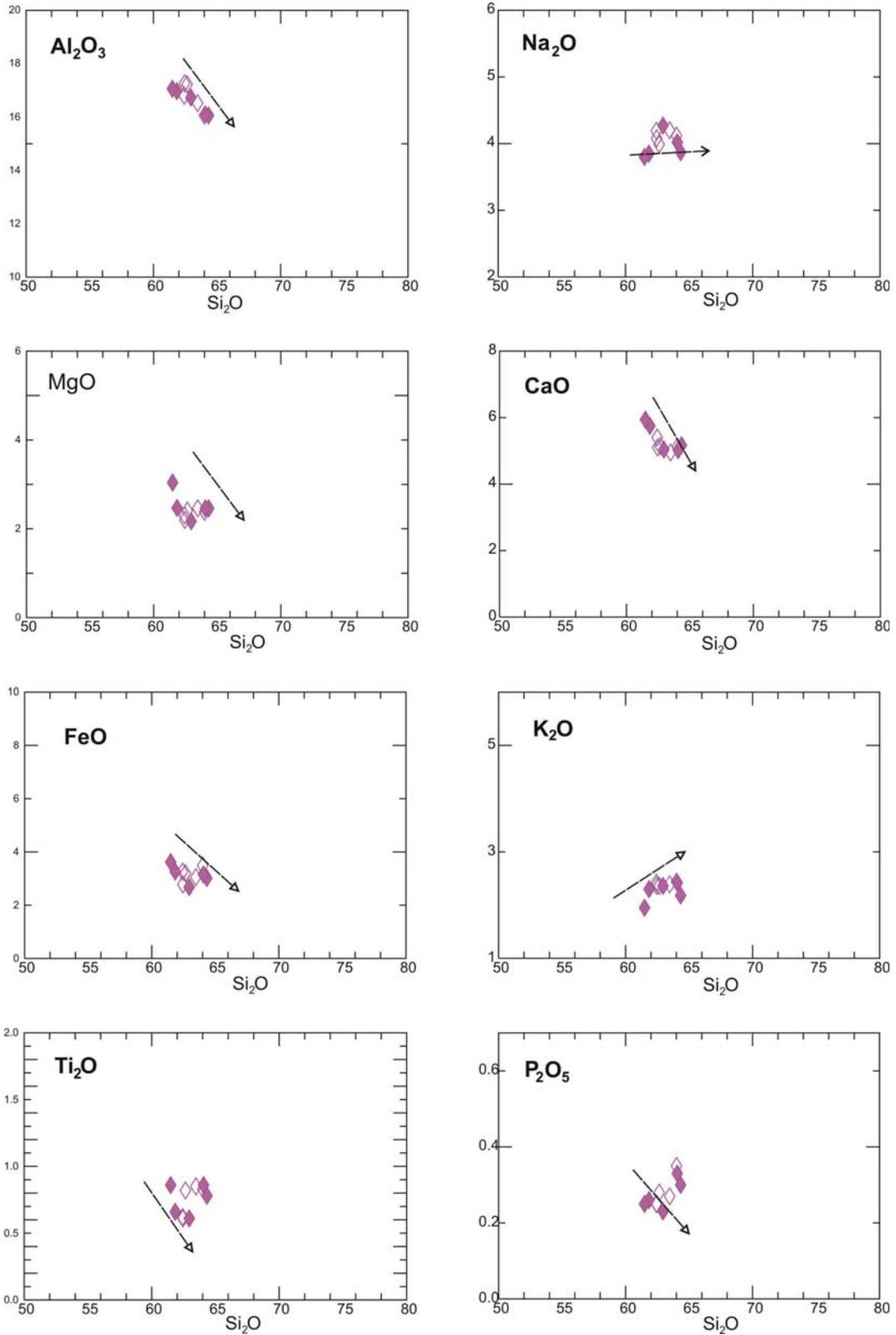
El carácter calco-alcálico es mostrado en el triángulo AFM de Kuno (1968), figura 34 donde se observa una línea de enriquecimiento de álcalis, clásico de la serie calco-alcálica.



**Figura 32:** Clasificación de pómez “Autopista” en el Diagrama TAS (“total álcalis vs sílice”) emplazadas desde hace 30,000 años del volcán Misti.



**Figura 33:** Definición de la serie calco-alcalina en el Diagrama triangular AFM de las pómez del depósito “Autopista”.



**Figura 34:** Diagramas de Harker: variación de los elementos mayores de las pómez del depósito “Autopista”.

Los diagramas de Harker (Figura 34) permiten precisar la evolución de las rocas y de estudiar el efecto probable de fraccionamiento de los diferentes tipos de minerales. Estos diagramas presentan correlaciones más o menos lineales entre la  $\text{SiO}_2$  y ciertos óxidos. La evolución es marcada por una disminución de  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , la estabilidad del  $\text{Na}_2\text{O}$  y el aumento de  $\text{K}_2\text{O}$  con el aumento en  $\text{SiO}_2$ . La tendencia general de los principales óxidos en las andesitas parece compatible con un proceso de cristalización fraccionada.

La disminución de los porcentajes en  $\text{MgO}$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  con el aumento en  $\text{SiO}_2$  puede ser ligada al fraccionamiento temprano de los piroxenos, seguido del anfíbol y la biotita.

El conjunto de rocas muestra una relación decreciente de  $\text{CaO}$  en función de  $\text{SiO}_2$ . Esta evolución del porcentaje en  $\text{CaO}$  puede corresponder a la cristalización temprana de los piroxenos y plagioclasas, seguido del anfíbol. La plagioclasa es responsable del fraccionamiento de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

El porcentaje en  $\text{P}_2\text{O}_5$  disminuye ligeramente a medida que el porcentaje en  $\text{SiO}_2$  aumenta, lo que puede ser ligado al fraccionamiento de apatito durante la diferenciación. El porcentaje de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  disminuye en toda la serie indicando el fraccionamiento de los óxidos de Fe - Ti y en menor medida de la biotita.

## 6.2 LOS ELEMENTOS TRAZAS

Entre los elementos trazas se distinguen elementos compatibles e incompatibles:

### ***Los elementos incompatibles:***

El Rb, Th, La y Nb tienen un comportamiento incompatible durante la diferenciación. Ellos presentan correlaciones positivas con respecto a los porcentajes en  $\text{SiO}_2$  (Figura 35).

### ***Los elementos compatibles:***

El Sc, Sr, Sm, Ni, V, Cr, Co, Eu, Nd, Yb e Y son fuertemente incorporados en los minerales que fraccionan. Por ende, ellos presentan correlaciones negativas a medida que aumentan los porcentajes en  $\text{SiO}_2$  (Figura 35).

El rubidio (Rb) tiene un comportamiento fuertemente incompatible durante la diferenciación y una gran gama de variación; este elemento es escogido como índice de diferenciación para discutir la evolución de los porcentajes de los elementos incompatibles (Figura 35).

El níquel (Ni) y cromo (Cr) presentan correlaciones negativas con el Rb. La disminución del porcentaje de Ni señala el elevado fraccionamiento del piroxeno en una etapa temprana de la evolución del magma (figura 36)

Los porcentajes en escandio (Sc), vanadio (V) e itrio (Y) muestran una buena relación negativa con relación al Rb. El escandio e itrio son más o menos incorporados en los anfíboles. En cambio, el vanadio traduce el rol preponderante del fraccionamiento de los óxidos de ferro-titaníferos durante la evolución del magma.

El estroncio (Sr) muestra un carácter compatible durante la diferenciación. Este carácter compatible del estroncio durante la diferenciación puede ser atribuido al fraccionamiento de la plagioclasa en una etapa inicial de la diferenciación.

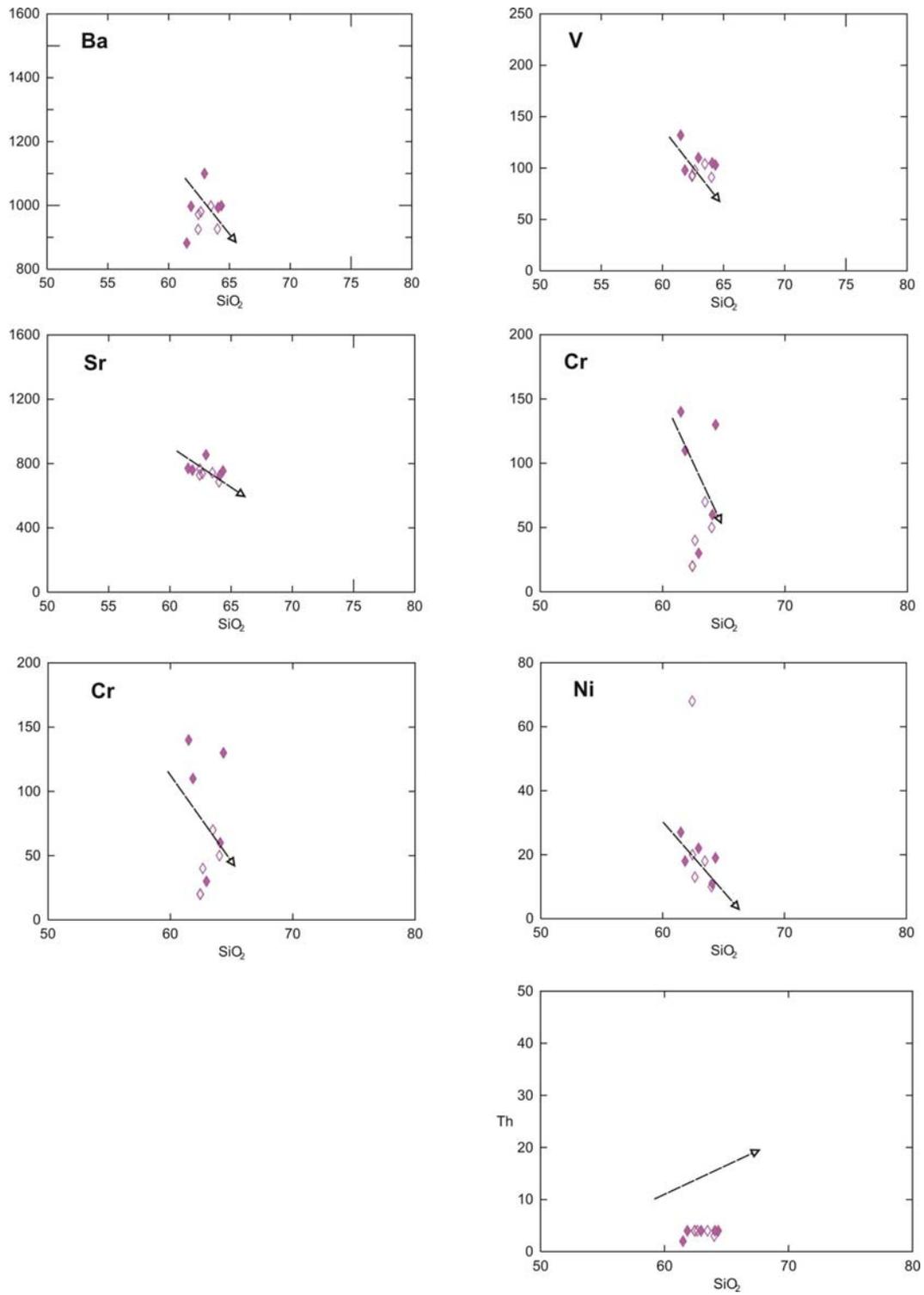
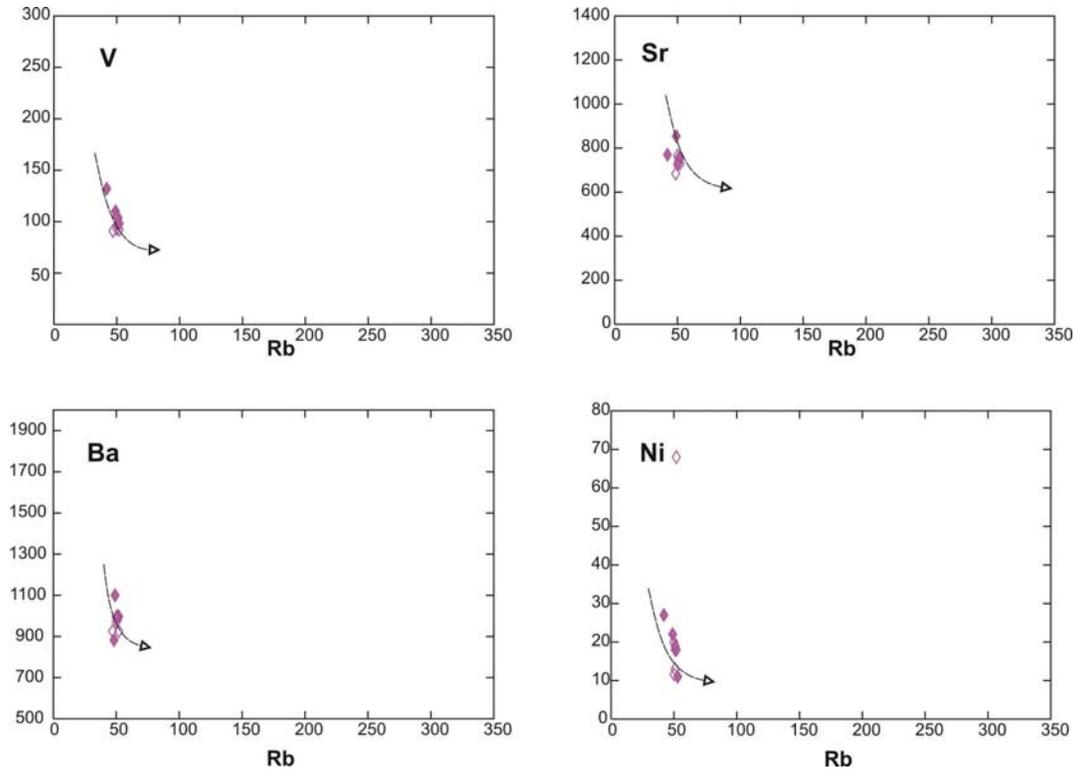


Figura 35: Diagrama de variación de algunos elementos trazas en función de SiO<sub>2</sub>



**Figura 36:** Diagrama de los tenores en elementos trazas en función de Rubidio

### 6.3 DISCUSIÓN: EVOLUCIÓN PETROGÉNÉTICA

La presente discusión será efectuada sobre el proceso de diferenciación: la cristalización fraccionada puesto en evidencia por el estudio petrográfico y geoquímico efectuado anteriormente.

#### **La cristalización fraccionada**

El estudio geoquímico de los elementos mayores y trazas muestra que la evolución de las pómez es principalmente controlado por la cristalización fraccionada, como la petrografía lo habían dejado entrever. Los argumentos en favor de una evolución por cristalización fraccionada son la relación directa que existe entre el orden de aparición de los minerales en las rocas de la serie, y las variaciones de los elementos químicos correspondientes en los líquidos residuales.

El estudio petrográfico ha mostrado que el orden de cristalización de los minerales es el siguiente; el primero en cristalizar es el piroxeno, la plagioclasa, los óxidos, el anfíbol, y la biotita.

La cristalización fraccionada es también puesta en evidencia por ciertos criterios geoquímicos:

- Las excelentes correlaciones lineares existentes entre los elementos incompatibles. En efecto, en los diagramas de los elementos trazas (Figura 37) correlacionando dos elementos incompatibles (Rb y Th), el conjunto de rocas muestra un alineamiento sobre una recta de correlación que pasa por el origen. Este comportamiento sugiere su evolución por cristalización fraccionada.

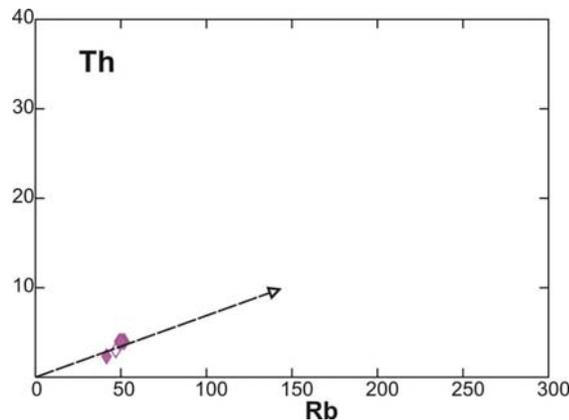


Figura 37: Diagrama de Th en función de Rb

- Los porcentajes en elementos compatibles (tales como: Sr, Sc, V, Co, Cr, Ni) e hidromagmafilos (Rb, Th) muestran también variaciones fuertes y no correlacionadas, característicos de un proceso de cristalización fraccionada (Figura 37).

Después de estos argumentos petrográficos y geoquímicos una evolución por cristalización fraccionada parece ser probable.

Un estudio geoquímico de rocas del volcán Misti efectuadas anteriormente por Legendre, (1998) muestra que sus magmas en general resultan esencialmente de la fusión parcial de la cuña del manto metasomatizado por fluidos derivados de la deshidratación de la corteza oceánica subducida (contexto de subducción), seguido de una contaminación y/o asimilación por la corteza durante el ascenso en un tramo de 70 km hacia la superficie (Kiebalá et al., 2005). Dentro de este contexto, una hipótesis sobre la génesis de magmas del depósito “Autopista” muestra que una vez generados los magmas “primitivos” en el manto ascendieron por el interior de la corteza continental y vinieron acumularse a un reservorio magmático superficial, donde evolucionaron por cristalización fraccionada y posteriormente fueron emitidos hacia la superficie.

## **CAPITULO IV DINAMICA ERUPTIVA**

### **1. DISTRIBUCION**

Los depósitos de caída pliniana y sub-pliniana se originan durante erupciones explosivas, donde tiene lugar una fuerte fragmentación del magma, y luego una expulsión violenta de los productos. Los productos emitidos pueden alcanzar varios kilómetros de altura y luego ser transportados por los vientos y cubrir extensas áreas (Tilling, 1999). Por ejemplo la isópaca de 1 mm de la erupción sub-pliniana del volcán Misti ocurrida hace 2000 indica que el evento cubrió mas de 316 km<sup>2</sup> (Suní, 1999) y la isópaca de 1 cm de la erupción del volcán Huaynaputina del año 1600 DC cubre un área de 95,000 km<sup>2</sup> (Thouret et al., 2002).

El depósito de caída Autopista fue emplazado por una erupción explosiva. El depósito muestra variación del porcentaje de sus componentes en sus tres niveles. Esta característica nos indica una dinámica eruptiva variable, al parecer con explosiones intermitentes y colapsos periódicos.

La granulometría y dispersión dependió de las condiciones climáticas y de vientos que influyen sobre la forma de la columna eruptiva, entonces el depósito de caída Autopista se formó por la acumulación de clastos transportados por el viento a partir de una columna eruptiva alta generada por la erupción de hace 14000 años aproximadamente del volcán Misti. La geometría del depósito es una capa que se emplazó cubriendo uniformemente la topografía, acumulándose tanto en las depresiones como en las partes altas. La estructura no es masiva como son la mayoría de los depósitos de caída del volcán Misti, pues existe variación en la concentración litológica.

En base a los parámetros físicos del depósito se confeccionaron los mapas de isopacas e isopleas (Figuras 38, 39 y 40), los que a continuación se explican:

## 1.1 MAPA DE ISÓPACAS:

Isópaca es una línea que representa áreas con un mismo rango de espesor de una capa ó depósito de caída.

Se encontraron 32 afloramientos hasta a una distancia de 25 km del volcán, los espesores de estos fueron introducidos y trabajados en un Sistema de Información Geográfica (Arc Map) los mismos que fueron procesados y mostrados sobre un modelo digital de elevaciones.

Normalmente es poco probable encontrar el depósito completo, sobre todo en zonas de moderada a fuerte pendiente, debido a la rápida erosión, ya que son depósitos sueltos, debido a ello es no se considera el espesor leído en el campo sino el corregido (Tabla 18 a) considerando que el 37% del espesor total del depósito lo conforma el nivel inferior, este valor fue calculado del afloramiento en el punto 105 ya que allí el depósito se encuentra completo.

Punto	Este	Norte	Espesor
4	230116	8192650	0.47
133	234407	8198253	1.03
134	233687	8198179	0.85
135	233283	8198837	
136	233147	8198781	0.83
137	231107	8198224	0.62
137b	231777	8197761	0.83
155	233678	8199818	0.75
159	227036	8191374	0.3
172	224426	8193278	0.26
187	230644	8191576	0.45
260	236343	8195964	0.4
268	223908	8191398	0.2
269	223410	8192736	0.25
270	220401	8195412	0.18
283	234929	8200559	0.73
283b	233400	8199674	0.73
137c	231469	8197523	0.93
305	231114	8198216	0.66
306	231545	8198395	0.73
307	232407	8199271	0.8
308	232627	8199479	0.86
309	233553	8199713	0.78
310	234106	8199888	0.86
311	234966	8200478	0.86
318	236378	8195967	0.5
321	236428	8195774	0.48
332	236394	8193586	0.3
333	236416	8193719	1.34
336	236221	8194516	0.5

ISOPACA (m)	AREA (Km2)	√AREA (Km)
1.4	19.21	4.38
1.2	28.27	5.32
1.0	43.88	6.62
0.8	71.15	8.43
0.6	119.10	10.91
0.4	207.68	14.41
0.2	313.86	17.72

b)

**Tabla 18a:** Valores de espesor de cada afloramiento del depósito de caída Autopista.  
**18b:** Área cubierta por cada isópaca.

a)

El mapa de isópacas posee un eje de dispersión mayor orientado en dirección oeste, y un lóbulo de dispersión de forma elíptica también hacia el oeste. En la tabla 18 se muestran las áreas de las isópacas de 20, 40, 60, 80, 100, 120 y 140 cm. La isópaca trazada de menor espesor (20 cm) cubre un área de 313 km<sup>2</sup>.

En el barlovento (parte del lóbulo con eje paralelo a la dirección del viento) la isópaca de 20 cm pasa a 25 km del cráter, la de 40 cm a 20.5 km, la de 60 cm a 15 km, la de 80 cm a 12 km, la de 1 m a 9.5 km, la de 1.20 m a 8 km y la de 1.4 m a 7.20 km, todos al oeste del cráter con una ligera orientación al noroeste.

En sentido del eje mayor del lóbulo de dispersión, el espesor de los afloramientos en áreas proximales miden 1.40; 1.20 y 1.0 m, en áreas mediales de 0,80 a 0.20 m, y pasan por los centros poblados más cercanos al volcán tales como, Zamácola, Cerro colorado, Alto Selva Alegre y Cayma.

## 1.2 MAPA DE ISOPLETAS

Una línea de isopleta es una curva de puntos con un mismo valor de dimensiones de los fragmentos más grandes del depósito, ya sea de pómez o de líticos.

Los mapas de isopletas, permiten inferir la altura de la columna eruptiva, el tipo de erupción, la dirección y velocidad predominante del viento durante la erupción. Asimismo podemos compararlo con el mapa de isópacas y tener mejor idea de la dispersión del depósito.

Los dos mapas de isopletas se construyeron a partir de los valores tomados en quince de los afloramientos registrados, casi todos situados al oeste del volcán. De cada uno de los tres niveles que presenta el depósito, se escogieron 10 pómez mas grandes (MP) y 10 líticos mas grandes (ML); las siglas significa máximos Pómez y máximos líticos. Posteriormente se calculó el valor promedio de las dimensiones de los diez y dichos valores fueron ploteados en los mapas de isopletas de pómez (Figura 39) e isopletas de líticos (Figura 40) según corresponda.



### a) Mapa de isopletras de pómez

Las isopletras de pómez tienen forma elíptica con eje mayor en dirección e este - oeste, debido a vientos provenientes del este, a diferencia de los lóbulos del mapa de isópacas que muestran un eje menor y las áreas son elipses con tendencia circular.

En la zona proximal oeste (barlovento), las pómez tienen más de 7 cm de diámetro y en el sector medio las isopletras son de 6 a 3 cm. Las isopletras de pómez de 3 y 1 cm, cubren los distritos de Cayma, Zamácola y Ciudad de Dios.

Pto	este	norte	Nivel	MP										Correg.				
4	230116	8192650	Sup	7.5	4.4	4	9	5.5	4.7	4.6	6						<b>5.7</b>	
			Inf	4	3.5	5.6	5.7	4.5	4	4.3	5	5	4.8					<b>4.6</b>
136	233147	8198781	Sup	6.2	5.4	5.2	4	4	5	4.5	4.5	4	3.8				<b>4.7</b>	
			Med	2.8	3.7	3.2	3	3.4	3.7	2.8	2.7	2.6	2.3				<b>3.0</b>	
			Inf	14	6	5.2	4.8	4.8	5	4.4	5.8	10	5.7				<b>6.6</b>	<b>4.8</b>
137b	231777	8197761	Sup	6.2	6.5	8	7	4.2	4.8	4.2	4.5	4.3	4.2				<b>5.4</b>	
			Med	4.5	4.2	3.5	3.8	4.7	3.6	6	5	5	4.6				<b>4.5</b>	
			Inf	7	7	5.2	5.2	5	4.6	4.5	5.4	4.7	5				<b>5.4</b>	<b>5.1</b>
155	233678	8199818	Sup	4	5	3.5	7	4.1	5.2	6	4.2						<b>4.9</b>	
			Med	8	7	3	4										<b>5.5</b>	
			Inf	8	4	5	5.5	4.2	4	11	8	6					<b>6.2</b>	<b>5.5</b>
159	227036	8191374	Sup	5	4.2	3.5	3.5	4.2	3.5	3.2	2.8	3.1	3.1				<b>3.6</b>	
			Med	1													<b>1.0</b>	
			Inf	5.5	6	5	3.5	4.8	3.5	2.6	4	3	2.8				<b>5.1</b>	<b>3.2</b>
172	224426	8193278	Sup	4	3.4	3.2	2.2	2	2.5	2.3	3.6	3.8	3.1				<b>3.0</b>	
			Inf	3.2	2.4	3.8	2.5	2.6	2.5	2	1.4	2.1	2				<b>2.5</b>	<b>2.7</b>
187	230644	8191576	Sup	7	6.5	7	4.5	5.5	7.5	5	5	6.5	4.5				<b>5.9</b>	
			Inf	5	5.5	5	5	7.5	4.8	4.5	5.5	5	5.5				<b>5.3</b>	<b>5.6</b>
260	236343	8195964	Sup	5.3	3.5	3.8	4.2	4.9	4.5	3.5	3.5	3.6	3.5				<b>4.0</b>	
			Inf	5	7	5	8	5	4	4	6	6	5				<b>5.5</b>	<b>5.8</b>
268	223908	8191398	Sup	3.5	3	3.4	2.5	2.4	2.4	2	2	2.3	2.2				<b>2.6</b>	
			Inf	3.5	3.25	3.5	3	3	3	3	2.5	2.3	4				<b>3.1</b>	<b>2.8</b>
269	223410	8192736	Sup	4.2	4.2	4	3	2.2	2.8	2.6	2.4	2	2.7				<b>3.0</b>	
			Inf	4	5	3.5	5	3	2.8	2.7	2.5	1.8	2.2				<b>3.3</b>	<b>3.1</b>
270	220401	8195412	Sup	2.3													<b>2.3</b>	
			Inf	2	2.3	2.5	3										<b>2.5</b>	<b>2.4</b>
310	234106	8199888	Sup	6	8	4.5	5	3.2	6	5	4.4	6	4				<b>5.2</b>	
			Inf	12	9	5	5	4	4	5	5	4.5	3.8				<b>5.7</b>	<b>3.6</b>
318	236378	8195967	Sup	5	7	5											<b>5.7</b>	
			Inf	2	6	6	12	12									<b>7.6</b>	<b>6.6</b>
321	236428	8195774	Sup	5.5	4.2	5.5	4.6										<b>5.0</b>	
			Inf	5	4.2	7	6	7									<b>5.8</b>	<b>5.4</b>
322	236384	8195529	Sup	4	4												<b>4.0</b>	
			Inf	5.1	6												<b>5.6</b>	<b>4.8</b>

**Tabla 19 a:** Valores promedio de las dimensiones de MP considerados para la elaboración del mapa de isopletras de pómez.  
**19 b)** Área de cada isopletra de pómez de la figura 39.

Tamaño (cm)	Área (Km <sup>2</sup> )
7.00	26.40
6.00	78.13
5.00	127.1
4.00	189.12
3.00	258.42



## b) Mapa de isopletras de líticos

En el mapa de isopletras de líticos (Figura 40) el lóbulo de dispersión tiene forma elíptica y orientación al este similar al lóbulo de pómez, el eje de esta isopletra se aleja ligeramente hacia el sur del eje de isópacas. Las isopletras de 7 y 6 cm están en la facie proximal, las de 5, 4, 3, 2 y 1 en la medial.

La línea inferida en sentido contrario al desplazamiento del viento (sotavento, hacia el este de 7 cm pasa a solo 750 m del cráter y la isopletra de 1 cm a 2.5 km. Al igual que las isopletras de pómez estas también alcanzan gran parte del área norte poblada de la ciudad de Arequipa.

Pto	este	norte	Nivel	ML										Promedio		
4	230116	8192650	sup	4.2	4	3.2	3.6	3.3	3.4	4.2	4	6.3	3.2	3.9		
			med													
			inf	2.4	2.6	1.8	1.6	1.4	2.1							2.0
136	233147	8198781	sup	5.5	5.4	4.7	3.7	4	0.35	3.8	3.3	3.9	2.8	3.7		
			med	4.2	4.1	3.5	3.2	3	2.7	2.8	2.7	2.5	2.7			3.1
			inf	4	3.6	3.1	2.5	3.3	2.8	2.2	2.1	2.4	2.2			
137b	231777	8197761	sup	5	5	4.7	4	4	4	5	6.5	5	5	4.8		
			med	2.8	3	3.1	2.8	2.9	2.7	2.5	2.9	2.4	3.5			2.9
			inf	2.7	2.7	2.5	2	2.1	1.9	1.8	2	1.8	1.8			
155	233678	8199818	sup	5	3.5	3.4	3.8	3.4	3	2.2	4	3	3.5			
			med	4.5	5	3.2	3.8	3.1	3	3	4	5			3	3.8
			inf	2	2.5											
159	227036	8191374	sup	2.1	1.1									1.6		
			med	2.8	1.6	2	1.5	1.7	1.6	1.6	1.6	1.9				1.8
			inf	1.2	1	0.8	0.9	0.8	1							
172	224426	8193278	sup	2	2	2.1	1.1	1.7	1.2	1.6	1.4	1.5	1.5	1.6		
			med	1	1.5	1.6	1.2	1.3	1	3	1.5	1				1.5
			inf	1.1												
187	230644	8191576	sup	2.8	3.1	2.9	4	3	4	3.5	3.4	3.6	4.6	3.5		
			med													
			inf	1.4	1.6	2	1.4	1.3	1.6	1.1						1.3
260	236343	8195964	sup	5.5	4.5	4	3.3	2.6	2.4	2.6	4	4.6	3	3.7		
			med	4.5	5	9	4.5	4.6	4	4	4.3	4	5.5			4.9
			inf	3	3.5	2	2	3	1.5	3.2	3.3	2.5	3			
268	223908	8191398	sup	2.1	1.5	2.3	1.4	1.5	1.3	1.1	1	1	1.1	1.4		
			inf	0.5												0.5
269	223410	8192736	sup	1.5										1.5		
			inf	0.5												0.5
270	220401	8195412	sup	0.8										0.8		
			inf	0.6												0.6
310	234106	8199888	sup	3.5	2.4	2.4	3.6	2.2	2.2	2	1.7	2.1	2.7	2.5		
			inf	3	2.5	2.3	3.1	2	1.5	2.6	2.7	1.4	1.3			2.2
318	236378	8195967	sup	7.8	5.5	5								6.1		
			inf	5	3.5											4.3
321	236428	8195774	sup	4	5	3.5	4	4.8	4.6	4.1	5			4.4		
			inf	2.8	3											2.9
322	236384	8195529	sup	6.1	6.5	4.4								5.7		
			inf	3												3.0

**Tabla 20a:** Valores promedio de las dimensiones de los ML del depósito de caída AUTOPISTA

**Tabla 20b:** Área de las isopletas de líticos del depósito de caída AUTOPISTA.

Espesor (cm)	Área (Km2)
7	21.95
6	37.76
5	67.45
4	105.29
3	139.74
2	181.07

Los ejes de dispersión sugieren una dirección general del viento hacia el occidente durante toda la erupción, sin embargo el eje de las isópacas muestra una ligera diferencia respecto al eje de la isopletas, ya que estas están a 8° hacia el sur siendo el eje de la isopleta de líticos el que se aleja mas del eje de las isópacas, esto se explica como los que mas obedecían la dirección del viento fueron las pómez.

## 2. VOLUMEN DEL DEPÓSITO

A pesar que el depósito Autopista es antiguo y ha sido bastante afectado por la erosión se ha estimado el volumen de material emplazado, y ya que no es posible conocer el valor exacto de material emitido, entonces utilizamos cuadros comparativos para determinar cual de los eventos emplazó mayor o menor volumen.

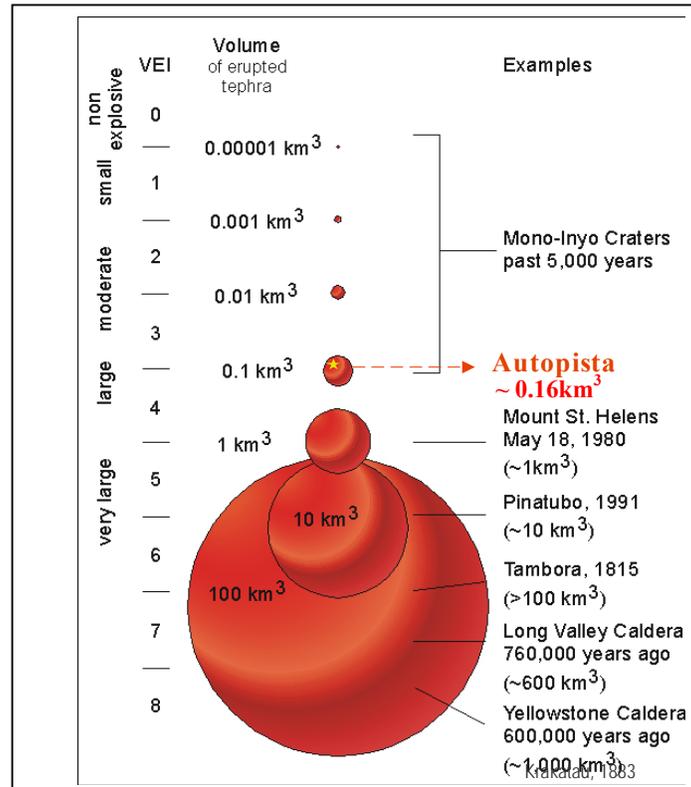
La figura 41 nos da una idea del volumen del depósito Autopista y cuanto significa frente a los eventos producidos por otros volcanes del mundo.

Para calcular el volumen del depósito de pómez “Autopista” utilizaremos dos métodos, el método de adelgazamiento exponencial y del rectángulo. En ambos métodos se consideran el área cubierta por cada isópaca y el patrón de adelgazamiento de las isópacas con la distancia desde el punto de emisión. El área cubierta por cada isópaca se calculó usando la opción para calcular áreas del software Arc Map con la formula:

```
Dim Area as Double
Dim pArea as IArea
Set pArea = [Shape]
Area = pArea.Area
```

Que permitió tener el área que esta en la tabla 18. A continuación se explican los dos métodos utilizados.

40



**Figura 41:** Comparación de volúmenes de eventos producidos en el mundo, principalmente de los últimos mil años, nótese que el depósito Autopista emplazó menos material que el de 1980 del Monte San Helens .

## 2.1 MÉTODO DEL TRAPEZOIDE:

Descrito por Froggatt (1982) y por Fiertsein y Nathenson (1992), se calculó el volumen de las capas usando como área de la base el área de cada isópaca y se multiplica por 0.0002 km que viene a ser la diferencia de espesor entre isópacas (20 cm). El valor total se obtiene sumando los volúmenes unitarios, obteniéndose como resultado 0.16 km<sup>3</sup>, pero este valor representa el volumen mínimo de material emplazado por esta erupción; ya que si consideramos la hipótesis que el área cubierta por ceniza de 1 cm es el 60% de volumen total emplazado por una erupción pliniana estaríamos hablando de 0.4 km<sup>3</sup> de material.

Espesor (m)	AREA (Km2)	√AREA (Km)	VOLUMEN (Km3)
1.4	19.21	4.38	0.004
1.2	28.27	5.32	0.006
1.0	43.88	6.62	0.009
0.8	71.15	8.43	0.014
0.6	119.10	10.91	0.024
0.4	207.68	14.41	0.042
0.2	313.86	17.72	0.063
<b>VOLUMEN</b>			<b>0.161</b>

**Tabla 22:** Parámetros geométricos usados para el cálculo del volumen de las capas de caída con base en el área de las isópacas.

## 2.2 MÉTODO DE ADELGAZAMIENTO EXPONENCIAL

El cálculo del volumen según la regla de adelgazamiento exponencial es un poco mas complejo y requiere de datos mas precisos que con los que se cuenta. De acuerdo a Pyle (1989, 1995), Fierstein y Nathenson (1992), el espesor de un depósito de caída disminuye exponencialmente con la distancia de acuerdo a la siguiente relación:

$$T = T_{\max} \exp(-k \cdot A^{1/2})$$

$T_{\max}$  = valor del peso máximo extrapolado, cuando  $A=0$  y  $-k$  = pendiente de la recta en la grafica de la figura 42.

$T$  = Espesor de una isópaca

$k$  = Coeficiente de la recta

$A$  = Area de la Isópaca, luego estos valores se utilizan en la ecuación

$$V = L_n E / \sqrt{S}$$

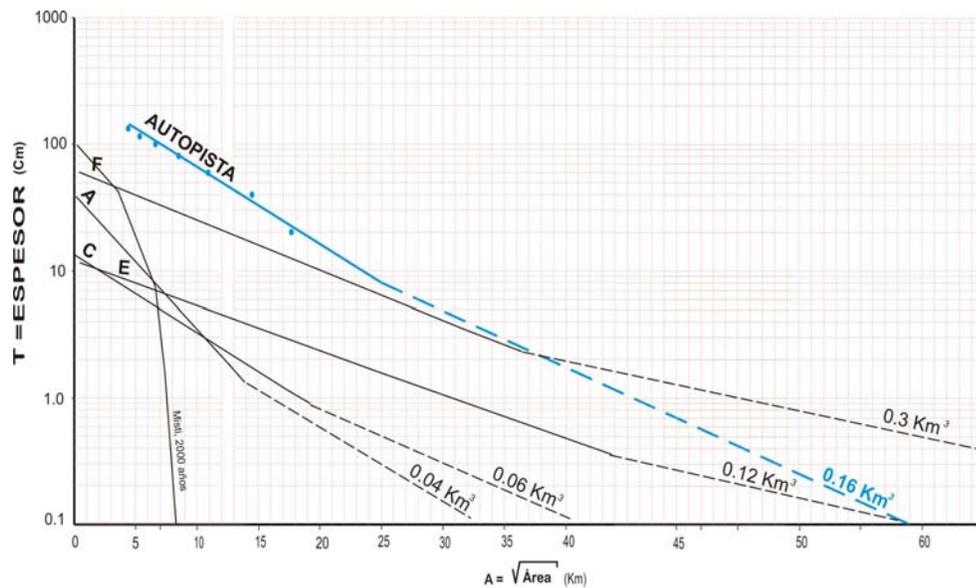
$E$  = espesor = 0.20 m

$S$  = superficie de cada isópaca

ISOPACA (m)	AREA (Km2)	√AREA (Km)	EJE MAYOR (Km)
1.4	19.21	4.38	7.20
1.2	28.27	5.32	8.00
1.0	43.88	6.62	9.50
0.8	71.15	8.43	12.00
0.6	119.10	10.91	15.00
0.4	207.68	14.41	20.50
0.2	313.86	17.72	25.00

**Tabla 21:** Datos de Isópacas del depósito de caída Autopista.

Debido a la carencia de datos de la facie distal como se nota en la figura 42 no se ha realizado el cálculo, a pesar de ello este método es el más usado y el más aproximado, por ello es que en esta oportunidad se ha extrapolado la curva y se ha usado de una manera comparativa con otros eventos tomados de Rossotti (2005). El valor  $0.16 \text{ km}^3$  de la Autopista es tomado del calculo de volumen por el método del trapezoide, el mismo que va de acuerdo a la figura 42.



**Figura 42:** El diagrama de Pyle muestra el espesor Vs la raíz cuadrada del área. El volumen obtenido para el depósito de caída Autopista es de  $0.16 \text{ Km}^3$ ; sin embargo la facie distal (ceniza), debe representar una parte significativa de todo el volumen del depósito.

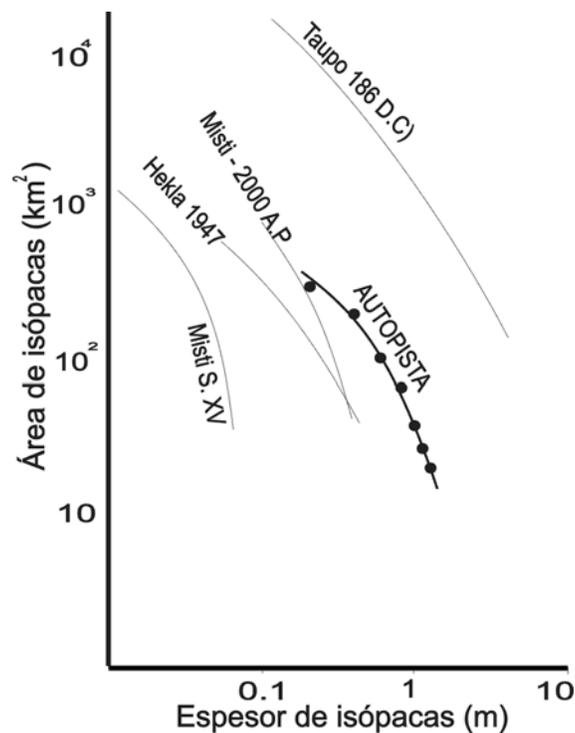
### 3. DISPERSION

El índice de dispersión corresponde al área que cubre un determinado depósito de caída y depende del mecanismo eruptivo y fundamentalmente de la altura de la columna, así como de la dirección y velocidad de los vientos en altura.

Walker (1973) propuso el índice de dispersión “D” como un parámetro discriminante para distinguir entre varios tipos de erupción, siendo igual al área de la isópaca de espesor igual a 1 % del máximo espesor ( $0.01 T_{max}$ ), pero como en este depósito no se cuenta con esa información no se ha calculado este parámetro. Por otro lado, Rossotti

(2005) escogió límites arbitrariamente de los valores de dispersión  $D$  de la siguiente manera:  $5 \text{ km}^2$  como límite entre erupciones estromboliana y subpliniana, y  $500 \text{ km}^2$  como límite entre sub-pliniana y pliniana.

Se utilizó el diagrama de dispersión de Hildret & Drake (1992) para comparar con otros depósitos bien caracterizados, los que están en el siguiente orden de mayor a menor dispersión: Taupo, Hekla, Misti (2000 años) y Misti (Siglo XV). Se graficaron el espesor de las isópacas 1.4, 0.60, y 0.20 m versus el área de las mismas donde se nota que el evento que emplazó el depósitos Autopista tuvo una dispersión mayor al de hace 2000 años y mucho mayor al del siglo XV, (figura 43).

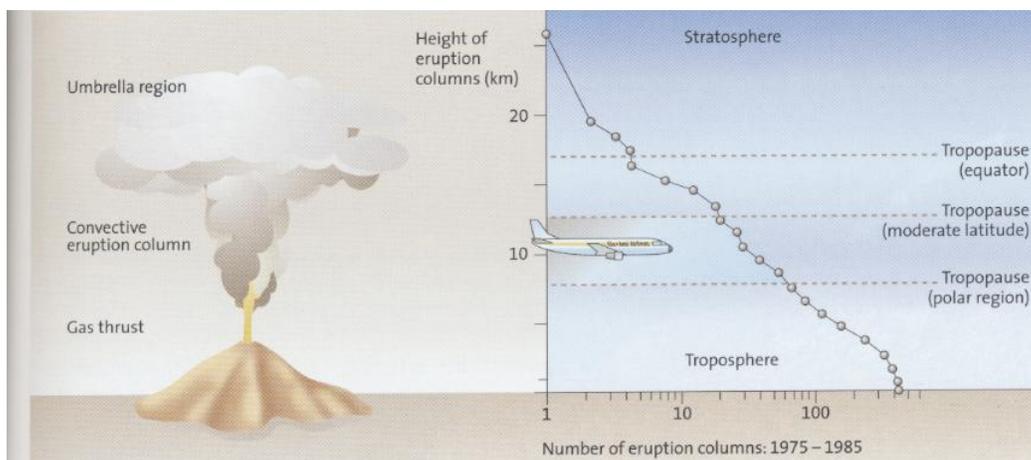


**Figura 43:** Diagrama de Hildreth & Drake (1992), donde la erupción que emplazó la Autopista muestra una dispersión intermedia respecto a las mostradas. Los depósitos de Misti Siglo XV y Misti – 2000 fue tomado de Navarro, 2000.

#### 4. ALTURA DE LA COLUMNA ERUPTIVA

Una columna eruptiva está conformada por una mezcla de fragmentos de pómez, partículas fundidas, fragmentos líticos y cristales de magma, dispersados en una fase continua de gas. Todo este material es arrojado en una gran explosión, donde una parte de la energía es utilizada para desplazar la atmósfera y toda la energía restante es empleada para la formación de la columna la cual incrementará su altura constantemente.

Independientemente que la erupción sea clasificada como pliniana o subpliniana, es importante determinar si la columna eruptiva llegó hasta la estratósfera, ya que esta diferencia tendría importantes implicaciones en la distribución espacial de los depósitos de caída, entonces las corrientes de chorro que se forman arriba de la tropopausa podrían transportar con facilidad las partículas y llevarlas alrededor de la tierra (Blong, 1984; Tilling y Punongbayan, 1993) lo cual puede afectar incluso el clima global.



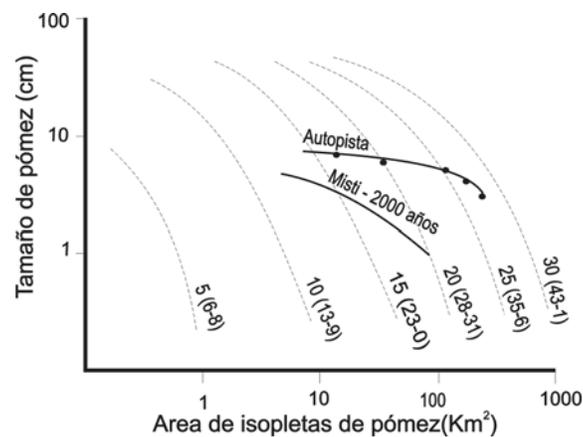
**Figura 44:** Frecuencia de las alturas diferentes de columnas de erupción entre 1975 a 1985 y alturas de tropopausa para latitudes ecuatoriales y altas (Schmincke, 2004).

Una columna eruptiva puede exceder los 30 km hasta alcanzar una densidad igual a la del aire, este equilibrio neutro se denomina Level Neutral Buoyancy (LNB). Entonces la columna se ampliará lateralmente en la región de la umbrella, y se formará también la nube en forma de hongo (figura 44), la parte central por su mayor aceleración alcanza mayor altura y las partes laterales desciendan en la región denominada paraguas (Schmincke, 2004).

#### 4.1 MODELO DE WALKER & CROASDALE (1971)

Los diagramas de Walker & Croasdale (1971) y Carey & Sparks (1986), relacionan áreas de isopletras de pómez y líticos Vs. diámetros máximos de los mismos respectivamente).

Los valores de MP vs el área de cada isopletra de pómez fueron ploteados en el diagrama de la figura 45, donde se obtiene el valor de la altura de la columna igual a los 22 km.



**Figura 45:** Área de las isopletras de pómez vs la dimensión del mismo clasto, del depósito de caída Autopista y del emplazado hace 2000 años. Se ha considerado una densidad de 1000 g/cm<sup>3</sup> para la pómez. De Walter and Croasdale (1971).

#### 4.2 MODELO DE CAREY & SPARKS (1986)

Los pómez y líticos mas grandes, siguen una trayectoria que se asemeja a la de un bloque balístico, estos son los ML y MP y son estudiados por ser densos y pesados. La trayectoria de dichas partículas no son afectadas por los vientos, y esta información es utilizada para el cálculo de la altura de la columna eruptiva.

El método de Carey & Sparks se basa en dos parámetros, uno es la mitad de la distancia perpendicular al viento (Sotavento) y a la distancia máxima en la dirección del eje mayor de dispersión, para inferir alturas de columna entre 7 y 43 km, a

velocidades predominantes de viento de 10, 20 y 30 m/s, considerando una densidad específica de  $2500 \text{ gr/cm}^3$  para los fragmentos balísticos.

Para la aplicación de este método utilizamos la información del mapa de isopletas de líticos de 3.2, pero esta vez usaremos la isopleta de 3 cm por que es el dato mas aproximado con el que se cuenta, la distancia del eje mayor se plotea en el eje x y la mitad de la distancia perpendicular al este eje en la parte donde el lóbulo se hace mas ancho.

Según el diagrama de Carey & Sparks (1986), que se muestra en la figura 46, la altura de la columna eruptiva de este evento superó los 20 km.

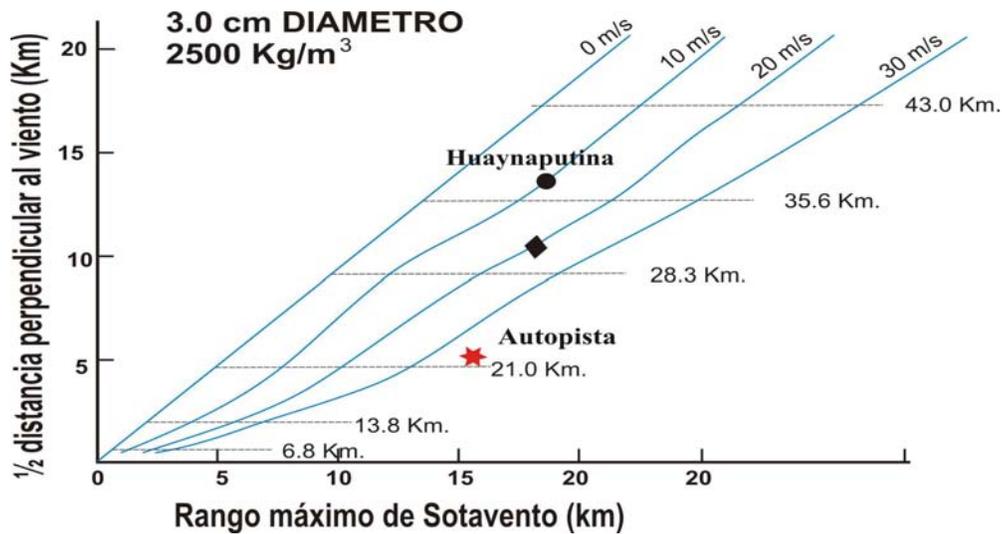


Figura 46: Diagrama de Carey & Sparks (1986), que relaciona la distancia máxima y mínima de la isopleta de líticos (0.8) 1 cm, considerando una densidad de  $2.5 \text{ gr/cm}^3$ .

## 5. EXPLOSIVIDAD

Para cuantificar las erupciones explosivas se actualmente se usa el Índice de Explosividad Volcánica (IEV), esta escala fue definida por Newhall y Self en 1952 y es una escala compuesta en la que se toman en cuenta diversas características de una erupción como son el volumen del Magma emitido, la energía térmica liberada, el alcance de los productos fragmentados, el grado de destrucción causada, la altura de la columna eruptiva, la duración de la erupción, parámetros descriptivos y otras medidas

indicadas en la tabla 23. El I.E.V. tiene una escala de 0 a 8 proporcional al incremento de explosividad.

VEI	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Descripción	No explosiva	Pequeña	Moderada	Moderada a grande	Grande	Muy grande	--	--	--
Volumen emitido (m <sup>3</sup> )	< 10,000	10,000 – 1,000,000	Uno a diez millones	Diez a cien millones	Cien a mil millones	Uno a diez km <sup>3</sup>	Diez a cien km <sup>3</sup>	Cien a mil km <sup>3</sup>	Más de 1000 km <sup>3</sup>
Altura de la columna (km)	0,1	0,1 – 1	1 - 5	3 - 15	10 - 25	Más de 25	--	--	--
Duración en horas	-1	-1	1 - 6	1 - 6	1 - 12	6 - 12	Más de 12	--	--
Inyección a la troposfera	Mínima	Leve	Moderada	Sustancial	Grande	--	--	--	--
Inyección a la estratosfera	Nula	Nula	Nula	Posible	Definida	Significativa	Grande	--	--

**Tabla 23:** Tabla de Índice de Explosividad Volcánica (VEI, por sus siglas en Inglés) Adaptado de Newhall (1982).

TIPO DE ERUPCION	Sub pliniana	Pliniana	Autopista	Ref
Velocidad de boca (m/s)	100	100-400 / 100-600		1,2
Volumen de ejecta (km <sup>3</sup> )	0.05 – 0.5	0.1 -10	0.16	1
VEI	3	3 – 6	4	3
Altura máxima de columna (k)	< 20	20 - 35	22	1
Duración de la erupción (h)		> 78	70	4,5
Índice de dispersión (D)	< 500	> 500	400	6,7
Estilos eruptivos asociados	Oleada piroclástica, extrusión de domos	Colapso parcial de columna	Colapso parcial de columna	1
Composición típica del magma	Poco evolucionado	Muy evolucionado	Muy evolucionado	1

**Tabla 24:** Comparación entre diferentes parámetros de erupciones subplinianas y plinianas, según diferentes autores (Modificada de Cioni et al., 2000). Referencias: 1= Cioni et al. (2000); 2= Carey y Bursik (2000); 3= Newhall y Self (1982), 4= Hayakawa (1985); 5= Wilson y Hildreth (1997); 6= Walter (1973 b); 7= Houghton et al (2000).

El volumen estimado del depósito de caída Autopista es de 0.16 km<sup>3</sup>, y la altura de la columna eruptiva estimada para la erupción que emplazó dicho depósito es de 22 km aproximadamente, y en base a dichos datos, pensamos que el IEV de la erupción que emplazó el depósito de caída Autopista habría sido aproximadamente 4 (Tabla 24).

Los límites entre la erupción estromboliana, subpliniana y pliniana, no han sido todavía definidos consensualmente en la literatura, sin embargo en la tabla 24 se muestra una recopilación hecha a partir de Amos et al. (1981); Francis (1996); Arrigi et al. (2001).

Así entonces el depósito de caída Autopista fue emplazado por una erupción pliniana de IEV 4 probablemente con colapsos de columna asociados.

## CONCLUSIONES

1. En los últimos 21 000 años se produjeron al menos 13 erupciones explosivas de magnitud moderada a alta (sub-pliniana a pliniana) que emplazaron depósitos de caídas de pómez. Los depósitos mejor conservados son nueve, a los que se les ha denominado “Sacaroide”, “Fibroso II”, “Blanco”, “Autopista invertida”, “Pobre en Líticos”, “Amarillo”, “Autopista”, “Sándwich” y “Bandeado”.
2. El depósito de caída de pómez “Autopista” sobreyace a depósitos piroclásticos datados en  $20960 \pm 380$  años y subyace a depósitos de flujos piroclásticos fechados en  $11280 \pm 70$  años. Por tanto dicho depósito se emplazó durante el Pleistoceno tardío, entre 20 y 11 mil años.
3. Las pómez y líticos de la base, poseen un tamaño relativamente similar al del resto de la columna. Así mismo, hacia el tope del depósito se observa una disminución paulatina del tamaño de grano. Estas características son un indicativo de un inicio brusco de la actividad eruptiva, sin evento previo, así como una culminación gradual de la erupción.
4. La alta concentración de líticos, especialmente hidrotermalizados, en la parte media del depósito, evidencia una mayor apertura del conducto volcánico horas después de iniciada la erupción.
5. Las pómez del depósito de caída “Autopista” son de composición dacítica – andesítica. Contienen fenocristales de plagioclasas (4 %), anfíboles (3 %), minerales opacos (2 %), piroxenos (0.5 %) y micas 0.1%. La pasta conforma el 63 % y las vesículas el 30%.
6. En base al mapa de isópacas, estimamos que el volumen de pómez y lapilli pómez emplazado por esta erupción es de 160 millones de  $m^3$ , y el área cubierta por la isópaca de 20 cm bordea los  $300 km^2$ .
7. A partir de datos de los mapas de isopleas, estimamos que la altura de la columna eruptiva, alcanzó poco más de 22 Km.
8. En función de las estimaciones del volumen de material emitido y la altura de la columna eruptiva, concluimos que la erupción que emplazó el depósito de pómez “Autopista”, fue una erupción pliniana.
9. El orden de cristalización de los minerales fue: piroxenos, plagioclasas, óxidos, anfíboles y biotita. Los porcentajes en elementos compatibles (tales como: Sr, Sc, V, Co, Cr, Ni) e hidromagmáfilos (Rb, Th) muestran también variaciones fuertes y no correlacionadas. Las características citadas evidencian un proceso de cristalización fraccionada.

## BIBLIOGRAFIA

- CAREY S., & SPARKS R. (1986).- Quantitative models of the fallout and dispersal of tephra from volcanic eruptions columns. *Bulletin of Volcanology*, v. 48. p. 109-126.
- DAVILA J. (1998).- Volcán Huaynaputina (sur del Perú): Estudio estratigráfico y sedimentológico de las tefras y efectos de la erupción de 1600 D.C. Tesis Ing. Geol., UNMSM, 180 p.
- DE METS ET AL. (1990).- Current plate motions, *Geophys. J. Int.*, 101, 425 – 478
- FIDEL L. & ZAVALA B. (2000).- Mapa preliminar de amenaza volcánica potencial del volcán Tutupaca. *Sociedad Geológica del Perú, Vol. Esp. II*, p. 97-104.
- FIDEL L., MORCHE W., NUÑEZ J. (1997).- Inventario de volcanes del Perú.
- FIDEL L., MORCHE W., NUÑEZ J. (1997).- Riesgo volcánico en el sur del Perú.
- FIERSTEIN J., HILDRETH W. (1992). - The plinian eruptions of 1912 at Novarupta, Katmai National Park, Alaska. *Bulletin of Volcanology*, 54, 646-684.
- FISHER, R. (1990). - Transport and deposition of a pyroclastic surge across an area of high relief: The 18 May 1980 eruption of Mount St. Helens, Washington. *Bull. geol. Soc. Amer.* 102, 1038-1054.
- FISHER R., SCHMINCKE H. (1984).- “Pyroclastic rocks. Springer, Berlin Heidelberg New York, 472 pp.
- FROGGATT P. (1982) Review of methods of estimating rhyolitic tephra volumes; Application to the Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 14, 301-318.
- GOER DE HERVÉ (1985).- Le volcanisme. *Lexique Clermont-Ferrand CRDP*
- HILDRET & DRAKE (1992).- Volcán Quizapú, Chilean Andes. *Bulletin of Volcanology*, vol. 54, p. 93-125.
- ISACKS B. (1988). - Uplift of the Central Andean Plateau and bending of the Bolivian Orocline. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 93, p. 3211-3231.
- LEGENDRE C. (1999).- Pétrogenèse du volcan “Misti Moderne” (Sud Pérou): essai de caractérisation de l'évolution pétro-géochimique et chronologique. *Mémoire d'IGAL (Institut Géologique Albert de Lapparent), France*, pp. 88.
- LEGROS (2000).- “Tephra stratigraphy of Misti Volcano, Perú”
- NAVARRO P. (2000).- Cartografía, geología, historia eruptiva y evolución de las amenazas volcánicas del volcán Misti.

- NORABUENA E. et al, (1999). Deceleration Nazca-South América and Nazca-Pacific plate motions., *Geophys. Res. Lett.*, 26, p.3405-3408
- PAQUERAU P.(2004).- Caractérisation des ignimbrites néogènes du bassin d' Arequipa, Pérou.
- ROSSOTTI A. (2005).- Reconstrucción de la Historia Eruptiva de la "Pómez Citlaltépetl" (Volcán Pico De Orizaba). Tesis Doct. UNAM. p.230
- SCHMINCKE H. (2004).- Volcanism – (Pyroclastic Flow, block and Ash flows, surges and the leacheer see eruption) p. 155 – 176.
- SEBRIER, SOLER (1991).- Tectonics and magmatism in the Peruvian Andes from Oligocene time to the Present, *Boll. Geological Socyety of América*, Special Paper 256 p. 259 – 277.
- SIEBERT L. (1996).- Hazards of large volcanic debris avalanches and associated eruptive phenomena. In: Scarpa, Tilling, R.I. (Eds.), *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. Springer, pp. 541-658.
- SUNI J. (1999).- Estudio geológico y vulcanológico del volcán El Misti y sus alrededores. Tesis, UNSA. 160 p.
- THOURET J., FINIZOLA A., SUNI J., EISSEN J., (1999).- Evaluación de las amenazas volcánicas en el área de la ciudad de Arequipa (700,000), en base a la historia eruptiva del volcán Misti, sur del Perú. *Sociedad Geológica del Perú*, Vol. Jub. N° 5, p. 119-140.
- THOURET J., JUVIGNE E., GOURGAUD A., BOIVIN P., DAVILA J. (2002).- Reconstruction of the AD 1600 Huaynaputina eruption based on the correlation of geologic evidence with early Spanish chronicles. *Journal of volcanology and Geothermal Research* 115 (2002) 529-570.
- THOURET J., FINIZOLA A., FORNARI M., LEGELEY A., PADOVANI, SUNI J., FRECHEN M.(2001) - Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Perú.
- WALKER G. (1971).- Grain-size characteristics of pyroclastic deposits. *J. Geol.* 79, p. 696-714.
- WÖRNER G., (1993).- El Vulcanismo Andino. *Mundo Científico*, N° 111, Vol. 11, p. 268-275.
- GUEVARA, (1968).- Geología del cuadrángulo de Characato. *Bol.* 23, 53 pp.
- JENKS & GOLDICH (1956).- Rhyolitic tuff flows in southern Perú. *Journal of geology* 64, 156 – 489.
- SUZUKI-KAMATA, K. (1988).- The ground layer of Ata pyroclastic flow deposits, southwestern Japan--evidence for the capture of lithic fragments. *Bull. Volcanol.* 50, 119-129

