

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
DE SAN AGUSTÍN DE  
AREQUIPA**



**CONVENIO UNSA Y EL  
PROYECTO PNUD-Gobierno  
PER 98/018**

**ESTUDIO: “MAPA DE PELIGRO POTENCIAL  
DEL VOLCÁN MISTI”**

**ING. ROBERTO KOSAKA MASUNO  
ING. LUISA MACEDO FRANCO  
BACH. HECTOR G. DIAZ URQUIZO**

**AREQUIPA SEPTIEMBRE 2000  
PERÚ**

**CONVENIO UNSA Y EL  
PROYECTO PNUD-Gobierno  
PER 98/018**

**ÁLBUM FOTOGRÁFICO DE LA CIUDAD DE  
AREQUIPA Y DE LAS MANIFESTACIONES  
VOLCÁNICAS DEL MISTI**

# MAPA DE PELIGRO POTENCIAL DEL VOLCÁN MISTI

## ÍNDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>RESUMEN</b>                              | <b>5</b>  |
| <hr/>                                       |           |
| <b>CAPITULO I - INTRODUCCIÓN</b>            | <b>6</b>  |
| 1.1. UBICACIÓN                              | 7         |
| 1.2. ACCESIBILIDAD                          | 7         |
| 1.3. OBJETIVOS                              | 8         |
| 1.4. METODOLOGÍA                            | 8         |
| 1.5. TRABAJOS ANTERIORES                    | 8         |
| <hr/>                                       |           |
| <b>CAPITULO II - GEOMORFOLOGÍA</b>          | <b>11</b> |
| 2.1 FISIOGRAFÍA                             | 11        |
| 2.2. RASGOS GEOMORFOLOGICOS.                | 13        |
| 2.2.1. CORDILLERA DE LADERAS                | 13        |
| 2.2.2. CADENA DEL BARROSO                   | 14        |
| 2.2.3. PENILLANURA DE AREQUIPA              | 15        |
| 2.3. TOPOGRAFIA Y DRENAJE.                  | 18        |
| 2.4. ESTRATIGRAFÍA                          | 19        |
| 2.4.1. QUEBRADA PASTORES                    | 19        |
| 2.4.2. QUEBRADA SAN LÁZARO                  | 20        |
| 2.4.3. QUEBRADA HUARANGAL                   | 21        |
| 2.4.4. QUEBRADA AGUA SALADA                 | 21        |
| 2.4.5. QUEBRADA AGUA DULCE                  | 21        |
| 2.4.6. QUEBRADA GRANDE                      | 22        |
| 2.4.7. QUEBRADA HONDA Y POBLADO DE CARICARI | 22        |
| 2.4.8. PILONES DE PACHECO                   | 23        |
| 2.4.9. CAMINO A CHARCANI V                  | 23        |
| 2.4. CLIMA.                                 | 24        |
| <hr/>                                       |           |
| <b>CAPITULO III - GEOLOGÍA HISTÓRICA</b>    | <b>24</b> |
| 3.1. EL VOLCAN MISTI                        | 25        |
| 3.1.1. PLANIMETRÍA DEL VOLCÁN               | 26        |
| 3.2. FORMACION DEL VOLCÁN MISTI             | 27        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>3.3. HISTORIA ERUPTIVA</b>          | <b>28</b> |
| 3.3.1. ERUPCIÓN DE 1440 A 1450         | 29        |
| 3.3.2. EVENTOS DE 1542 A 1599          | 31        |
| 3.3.3. ERUPCIÓN DEL AÑO 1677           | 31        |
| 3.3.4. ERUPCIÓN DEL AÑO 1784           | 32        |
| 3.3.5. ERUPCIÓN DEL AÑO 1787           | 32        |
| 3.3.6. PROBABLES EVENTOS DEL SIGLO XIX | 34        |
| 3.3.7. EVENTOS DEL SIGLO XX            | 36        |
| 3.3.8 RECIENTES INFORMACIONES          | 36        |

## **CAPITULO IV - ESTRATIGRAFÍA Y GEOLOGÍA** **37**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>4.1. PRE-MISTI</b>                         | <b>37</b> |
| <b>4.2. MISTI ANTIGUO</b>                     | <b>37</b> |
| <b>4.3. MISTI "MODERNO"</b>                   | <b>38</b> |
| 4.3.1. GRUPO I:                               | 38        |
| 4.3.2. GRUPO II:                              | 38        |
| 4.3.3. GRUPO III:                             | 39        |
| 4.3.4. GRUPO IV:                              | 39        |
| 4.3.5. GRUPO V:                               | 39        |
| 4.3.6. GRUPO VI:                              | 39        |
| 4.3.7. GRUPO VII:                             | 40        |
| <b>4.4. GEOLOGÍA LOCAL</b>                    | <b>40</b> |
| 4.4.1. GNEIS CHARCANI                         | 40        |
| 4.4.2. FORMACIÓN SOCOSANI                     | 41        |
| 4.4.3. VOLCÁNICO SENCCHA                      | 41        |
| 4.4.4. GRUPO BARROSO                          | 42        |
| 4.4.5. DEPÓSITOS MORRÉNICOS Y FLUVIOGLACIARES | 42        |
| 4.4.6. DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS                | 42        |
| 4.4.7. DEPÓSITOS "RECIENTES"                  | 43        |

## **CAPITULO V - EVALUACIÓN DE AMENAZAS VOLCÁNICAS** **43**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>5.1. DESCRICION TEFRO-ESTRATIGRAFIA</b>                    | <b>44</b> |
| <b>5.2. VULNERABILIDAD, RIESGOS E INESTABILIDAD VOLCANICA</b> | <b>46</b> |
| <b>5.3. TIPOS DE AMENAZA RECONOCIDAS</b>                      | <b>48</b> |
| 5.3.1. CAÍDAS DE TEFRAS                                       | 48        |
| 5.3.2. FLUJOS PIROCLÁSTICOS                                   | 52        |
| 5.3.3. AVALANCHA DE ESCOMBROS                                 | 53        |
| 5.3.4. FLUJOS DE LODO   | 55        |
| 5.3.5. FLUJOS DE LAVA   | 56        |
| <b>5.4. FENOMENOS PREMONITORIOS</b>                           | <b>56</b> |
| 5.4.1. CAMBIOS "FÍSICOS"                                      | 57        |
| 5.4.2. CAMBIOS "QUÍMICOS"                                     | 57        |

## **CAPITULO VI - MEDIDAS PREVENTIVAS A TOMAR EN CASO DE UNA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN EL MISTI** **58**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>6.1. TIPOS DE ERUPCIÓN</b>                                    | <b>58</b> |
| 6.1.1. ERUPCIÓN EFUSIVA  | 58        |
| 6.1.2. ERUPCIÓN EXPLOSIVA  | 58        |
| 6.1.3. ERUPCIÓN FREÁTICA   | 58        |
| <b>6.2. VIGILANCIA VOLCÁNICA</b>                                 | <b>59</b> |
| <b>6.3. VIGILANCIA SÍSMICA</b>                                   | <b>59</b> |
| <b>6.4. MEDIDAS DE DEFORMACIONES</b>                             | <b>60</b> |
| <b>6.5. VIGILANCIA VISUAL DE LA ACTIVA FUMARÓLICA</b>            | <b>60</b> |
| <b>6.6. PRECAUCIONES PARA AFRONTAR LAS ERUPCIONES VOLCANICAS</b> | <b>60</b> |
| 6.6.1. TIPOS DE ALERTA   | 60        |
| 6.6.2. ANTES DE LA ERUPCIÓN                                      | 61        |
| 6.6.3. DURANTE LA ERUPCIÓN                                       | 63        |
| 6.6.4. DESPUÉS DE LA ERUPCIÓN                                    | 64        |

## **CAPITULO VII – MICROZONIFICACION DE LA CIUDAD AREQUIPA** **65**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>7.1. VULNERABILIDAD Y POBLACION</b>   | <b>65</b> |
| <b>7.2. DETERIORO DE LAS EDIFICACIONES Y TUGURIZACION EN ÁREAS ESPECIFICAS</b> | <b>66</b> |
| <b>7.3. VULNERABILIDAD Y DESARROLLO</b>  | <b>68</b> |
| <b>7.4. MANEJO INTEGRAL DE LOS DESASTRES</b>                                   | <b>68</b> |
| 7.4.1. IMPORTANCIA DE LA PARTICIPACION DE LA POBLACION                         | 68        |
| 7.4.2. CONSECUENCIAS DE LA NO PARTICIPACION DE LA POBLACION                    | 69        |
| <b>7.5. LA POBLACIÓN PUEDE PARTICIPAR EN LOS ESTUDIOS DE RIESGO LOCALES</b>    | <b>70</b> |
| <b>7.6. LA NATURALEZA DE LA AMENAZA VOLCÁNICA</b>                              | <b>71</b> |
| <b>7.7. EVALUACIÓN Y PREDICCIÓN DE LA PELIGROSIDAD</b>                         | <b>73</b> |
| 7.7.1. FENÓMENOS PREMONITORES  | 75        |
| 7.7.2. ACTIVIDAD SÍSMICA   | 76        |
| 7.7.3. DEFORMACIÓN DEL SUELO   | 78        |
| 7.7.4. FENÓMENOS HIDROTERMALES   | 79        |
| 7.7.5. CAMBIOS QUÍMICOS  | 80        |
| 7.7.6. REQUISITOS PARA UNA PREDICCIÓN  | 81        |
| <b>7.8. MEDIDAS DE PROTECCIÓN</b>  | <b>81</b> |
| 7.8.1. PROTECCIÓN CONTRA CAÍDAS DE CENIZA                                      | 81        |
| 7.8.2. PROTECCIÓN CONTRA EXPLOSIONES VOLCÁNICAS Y FLUJOS PIROCLÁSTICOS         | 84        |
| 7.8.3. PROTECCIÓN CONTRA LOS FLUJOS DE LODO                                    | 85        |
| 7.8.4. PROTECCIÓN CONTRA FLUJOS DE LAVA  | 86        |
| <b>7.9. EL DESARROLLO DE LOS PLANES DE EMERGENCIA VOLCÁNICA</b>                | <b>89</b> |
| 7.9.1. ELEMENTOS BÁSICOS DEL PLAN PARA LA CIUDAD DE AREQUIPA                   | 90        |
| 7.9.2. ESCALAS DE TIEMPO   | 91        |
| 7.9.3. IDENTIFICACIÓN DE ZONAS PELIGROSAS                                      | 92        |

|  |            |
|--|------------|
| 7.9.4. CENSO DE POBLACIÓN E INVENTARIO DE PROPIEDADES                  | 93         |
| 7.9.5. IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS DE TRANSITO Y ZONAS DE REFUGIO SEGUROS | 94         |
| 7.9.6. IDENTIFICACIÓN DE LAS RUTAS DE EVACUACIÓN                       | 95         |
| 7.9.7. MEDIOS DE TRANSPORTE, CONTROL DE TRAFICO                        | 95         |
| 7.9.8. ALOJAMIENTO EN LAS ZONAS DE REFUGIO                             | 97         |
| 7.9.9. RESCATE, PRIMEROS AUXILIOS Y SERVICIOS HOSPITALARIOS            | 97         |
| 7.9.10. SEGURIDAD EN ZONAS EVACUADAS                                   | 98         |
| 7.9.11. PROCEDIMIENTO DE ALERTA DENTRO DEL GOBIERNO                    | 98         |
| <b>7.10. ESTADOS DE ALERTA PARA ERUPCIÓN VOLCÁNICA</b>                 | <b>99</b>  |
| 7.10.2. REPASO Y REVISIÓN DEL PLAN                                     | 102        |
| <b><u>CONCLUSIONES</u></b>   | <b>103</b> |
| <b><u>RECOMENDACIONES</u></b>  | <b>105</b> |
| <b><u>BIBLIOGRAFÍA</u></b>   | <b>106</b> |

# MAPA DE PELIGRO POTENCIAL DEL VOLCÁN MISTI

## **Elaborado por:**

Ing. Luisa Macedo Franco

Bach. Héctor Díaz Urquiza

## **Supervisor General:**

Ing. Roberto Kosaka Masuno

## **RESUMEN**

Arequipa es una de las ciudades de la América Latina que se desarrolló al pie de un volcán, por su expansión urbana, la ciudad se acerca cada vez mas al pie del volcán, poniendo en peligro a los habitantes que allí habitan, en caso de producirse una reactivación del volcán Misti.

La ciudad de Arequipa, es un ciudad que cuenta con una población de cerca del millón de habitantes y es considerada la segunda ciudad en importancia del Perú, es así que por razones de expansión rápida, por el crecimiento poblacional, la ciudad crece de manera desordenada, sin planificación alguna y sin considerar que Arequipa a lo largo de su historia ha sufrido daños considerables por diferentes fenómenos naturales como por ejemplo terremotos, inundaciones y erupciones volcánicas.

Las erupciones volcánicas, son fenómenos naturales que pueden ocurrir en cualquier momento, pero gracias a los avances científicos hoy en día se puede predecir una erupción con tiempo suficiente para la evacuación de poblaciones y tomar las previsiones del caso, pero para poder ser efectivo, es necesario un monitoreo volcánico y una educación a la población que podría ser afectada.

El volcán Misti, en periodos históricos nos ha dado sus manifestaciones de estar activo, especialmente en el año 1440 DC, en la época del Inca Pachacutec que arrojó grandes cantidades de ceniza, en años posteriores y a la actualidad, el Misti, periódicamente nos sorprende con algunas fumarolas, que no presentan peligro por sus contenidos y porcentajes de gases presentes, por tal motivo es que

desde 1992 la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa y el Instituto Geofísico del Perú a través de estudios de tesis para optar el título de ingeniero geólogo es que se ha logrado identificar los diferentes elementos volcánicos que ha arrojado el Misti en sus erupciones pasadas, con los cuales se ha podido realizar planos de amenazas conociendo su conducta eruptiva.

Por tal motivo, el presente trabajo valiéndose de esa valiosa información, recopila, compara y une información muy valiosa con el objetivo de realizar la Microzonificación de la Ciudad de Arequipa, que es el ordenamiento y planificación para futura expansión de la ciudad, pues éste trabajo busca ese objetivo, y que se ha realizado gracias al convenio entre la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa y el Proyecto PNUD – Gobierno PER 98/018.

## **CAPITULO I - INTRODUCCIÓN**

Actualmente las ciudades crecen sin plan alguno y sin tener en cuenta las condiciones naturales de su ubicación; tal es el caso de Arequipa que siendo la segunda ciudad del Perú en importancia y en población, esta situada en una zona de alta sismicidad, asentada en las faldas del volcán Misti (15 Kilómetros de distancia en línea recta), que en los últimos años ha tenido actividad fumarólica y del que se tiene reportes de su pasado histórico (en la época del Inca Pachacutec en el siglo XIII d.C.).

La ciudad de Arequipa actualmente, tiende a expandirse hacia el volcán Misti, esto agrava el problema, no solo en el caso de una probable erupción del volcán, si no también por el represamiento de quebradas aledañas las cuales han sido rellenas de basurales o lo que es peor existen viviendas construidas en el mismo cause de las mismas.

En las partes antiguas de la ciudad existen construcciones deterioradas por el tiempo y por los sismos, constituyen un gran riesgo para sus ocupantes, actualmente ubicados en lugares peligrosos, esto resulta muy costoso y casi imposible erradicarlos.



## 1.1. UBICACIÓN

El área de estudio se encuentra ubicada en la zona volcánica de los Andes Meridionales en la Cordillera Occidental de los Andes del Sur del Perú, dicha área se encuentra en parte en los cuadrángulos de Arequipa y Characato a escala 1:100 000 (Instituto Geográfico Nacional), Siendo sus coordenadas geográficas:

Longitud    71° 36" 43    y    71° 24" 00    Oeste

Latitud      16° 24" 36    y    16° 11" 40    Sur

La ciudad de Arequipa es la segunda en importancia del Perú, tiene una población aproximada de 1 000 000 habitantes, con una tasa promedio de crecimiento anual de 2.4 %. El centro de la ciudad se encuentra en línea recta a 15 Kilómetros de distancia y con una diferencia altimétrica de 3,5 Km con respecto a la cima del volcán.

## 1.2. ACCESIBILIDAD

La zona de estudio es accesible desde:

- La autopista Panamericana por la vía Lima-Arequipa-Tacna.
- Al Sureste de la ciudad mediante la vía de penetración hacia Juliaca (por Chiguata).
- Por el Noroeste mediante la vía que se dirige a Chivay y Cuzco (por Alto Cayma y Yura).
- Por la carretera afirmada que une Arequipa-Omate (Moquegua), vía la laguna de Salinas.
- También se tiene acceso por el sector Oeste y Sur por diferentes trochas construidas para el mantenimiento de las redes eléctricas de alta tensión (Central Charcani).
- Por vía férrea Arequipa-Mollendo
- También por vía férrea Arequipa-Juliaca-Puno-Cuzco

- Por vía aérea las aeronaves arriban al aeropuerto internacional Rodríguez Ballón

### **1.3. OBJETIVOS**

Si bien es cierto que poco podemos hacer frente a la ocurrencia de desastres naturales como erupciones volcánicas, sismos, inundaciones, etc.; o para mitigar su energía, sin embargo esta en nuestras manos construir un habitad mas seguro, teniendo en cuenta ubicación y materiales a emplearse, para que minimice el nivel de exposición frente a ellos, por tal motivo se tiene como objetivo de este proyecto:

Realizar estudios de Microzonificación de la ciudad de Arequipa y sus áreas de futura expansión, teniendo en cuenta el comportamiento vulcanológico del Misti a fin de determinar las áreas de mayor o menor riesgo de la ciudad, frente a los diferentes elementos volcánicos que podrían presentarse en una probable erupción.

### **1.4. METODOLOGÍA**

- Revisión y recopilación bibliográfica de documentos relacionados al volcán Misti y la ciudad de Arequipa.
- Reconocimiento de los diferentes elementos volcánicos en el área de estudio.
- Elaboración de mapas de riesgo (distribución de los diferentes elementos volcánicos del Misti)
- Elaboración de mapas de microzonificación de la ciudad de Arequipa, referente a áreas de expansión y evacuación.

### **1.5. TRABAJOS ANTERIORES**

Los estudios realizados a la actualidad referentes al volcán Misti y a la ciudad de Arequipa son fundamentalmente de tipo regional, los estudios de tipo vulcanológico son escasos, pero se cuenta con algunos relatos manuscritos del

siglo XIX que describe la actividad fumarólica del Misti de acuerdo a su propio entendimiento, así tenemos:

Una de las primeras publicaciones referente al Misti fue realizada por Ballón (1900), donde trata de incidir en la fisiografía del volcán. En el primer catálogo de los volcanes activos del mundo de la "Asociación Internacional de Vulcanología y Química del Interior de la Tierra" (IAVCEI), se menciona al Misti. (Hantke y Parodi, 1966).

En el año 1969 Guevara realizó la Geología del Cuadrángulo de Characato, donde hace una descripción de los diferentes elementos volcánicos asignándoles nombres para luego correlacionarlos con otros. Así, se le asigna a la andesita del Misti como perteneciente al grupo Barroso.

Paredes (1970) en su tesis denominada "La geología de las andesitas sur occidentales del volcán Misti", describe la petrología macroscópica de las rocas y la geología histórica del volcán Misti.

Cárdenas en 1972 realiza una tesis denominada "Rocas neovolcánicas de Arequipa", donde analiza la fisiografía y petrología de las andesitas de Arequipa. Laharie (1972), hace una descripción geomorfológica del Misti, en su publicación "Geomorfología y Vulcanismo en los Andes del Sur del Perú".

Ballón (1972) en su tesis, "Paleomagnetismo de las rocas volcánicas de Arequipa", describe la geología general de la zona donde incluye al Misti. En el estudio de la Sociedad Geográfica de Lima en el boletín N° 94, (1975) "Volcanes del Perú" Parodi indica la ubicación geográfica del Misti. De Silva y Francis (1991) en un estudio denominado "Los Volcanes de los Andes Centrales", interpretan imágenes de satélite Landsat Thematic Mapper (TM). En él hacen referencia a los productos volcánicos del Misti y mencionan posibles peligros.

Simkin y Siebert (1994) en la Smithsonian Institution publican en el tercer catálogo "Volcanoes of the World", un artículo donde hacen referencia de los eventos eruptivos registrados, basados en diarios nacionales y archivos históricos.

En ese mismo año, Luisa Macedo (1994), por un convenio DHA/UNDRO - UNSA presenta una tesis denominada "Peligro potencial del Misti". Donde efectuaron estudios vulcanológicos a manera de hacer cartas preliminares de prevención y mitigación de desastres.

Thouret (1995), publica un artículo titulado "Un exemple de prévision des Risques Volcaniques au Pérou meridional (région d' Arequipa), Fondé sur 1' Activité Eruptive Récente du strato-volcan El Misti". En el cual hace un análisis previo a los productos volcánicos del Misti en donde se indica una alternancia de dinamismo pliniano y peleano.

En 1995 Naciones Unidas, realiza un Programa de Mitigación de Desastres en el Perú, donde se realiza el Plano de Microzonificación de Arequipa Preliminar, teniendo en cuenta sismicidad, vulcanología e inundaciones, el cual fue realizado por la Universidad Nacional de San Agustín, ( R. Kosaka, M. Lazo, M. Hall, J. Chara, L. Macedo y R. Ticona).

Francois Legros (1997) publica "Los volcanes activos del Perú", en donde describe al Misti. En el artículo "Etude tephrostratigraphique et bioclimatique du Tardiglaciaire et de L'Holocène de la Laguna Salinas, Pérou meridional" por Juvigné, (1997) en este trabajo se analizan 7 tefras y depósitos holocénicos e históricos del Misti y del Ubinas.

En el IX Congreso Peruano de Geología, se presenta el trabajo denominado "Estratigrafía e historia eruptiva reciente del volcán Misti (Sur del Perú). Aplicación a la evaluación de las amenazas volcánicas en el área de Arequipa", por Thouret, (1997), en donde se menciona datos obtenidos hasta esa fecha. En este trabajo también se hace una evaluación preliminar de amenaza volcánica alrededor del Misti y de Arequipa.

La Sociedad Geológica del Perú presenta un trabajo denominado: "Evaluación de las Amenazas Volcánicas en el Área de la Ciudad de Arequipa, en base a la Historia Eruptiva del Volcán Misti, Sur del Perú ", por J. C. Thouret, J. Suni y J.P. Eissen (1999), en donde se hace una ampliación con mayor detalle a la

interpretación, evaluación de amenazas, dataciones e información adicional obtenidos acerca del estrato-volcán El Misti.

## **CAPITULO II - GEOMORFOLOGÍA**

### **2.1 FISIOGRAFÍA**

En la región de Arequipa, los fuertes cambios altitudinales y las características litológicas y morfológicas, permiten separar:

1. La Depresión de Arequipa (1800 - 3000 m), que debido a su baja altitud y poca pendiente, aparece como una digitación de la Planicie Costera que ingresa por el valle del río Chili y se prolonga hasta los pies de la Cordillera Volcánica. Esta superficie forma un abanico vulcano-detrítico que colecta los ríos y quebradas que descienden del Altiplano y de las vertientes de los volcanes, originando un drenaje que converge y atraviesa la ciudad de Arequipa.
2. La Cordillera Volcánica de Arequipa, está formada por los volcanes, Chachani, Misti y Pichu Pichu, que llegan a más de 5500 m de altitud y separan la depresión de Arequipa del Altiplano (Fenner, 1948; Guevara, 1969; Laharie et Derruau, 1984). La base de estos volcanes está compuesta por ignimbritas o sillar, de  $2.41 \pm 0.11$  ma. (Vatín-Perignon, 1996). Los perfiles asimétricos, E-W, de los volcanes del sector son debidos a que ellos están sobre el límite del Altiplano (4500 m) y la depresión de Arequipa ( $\pm 2500$  m) y originan diferencias de altitud entre sus flancos de 2000 m. Debido a la desnivelación entre estos dos sectores, la parte meridional de la depresión de Arequipa fue cubierta por un complejo depósito volcánico (Fenner, 1948).
3. El Misti se ubica en la intersección de dos lineamientos vulcano-tectónicos de orientación NW-SE y NE-SW. El primero forma la frontera entre el Altiplano y la Depresión de Arequipa y está formado por estructuras antiguas de dirección andina. En esta orientación están también alineados el Complejo Chachani y el Volcán Pichu Pichu. El segundo alineamiento corresponde a la prolongación del borde topográfico meridional de la Caldera Chachani (García, 1997).

4. Los límites de la Caldera Chachani en este sector, están formados por estructuras de colapso que forman bloques, los cuales se prolongan hacia el SW y atraviesan el río Chili. En el lado N y NW del Misti son identificadas estas dos principales orientaciones de estructuras.
5. Las estructuras de dirección NW-SE cortan el flanco NW del Misti. El flanco W y SW del Misti presenta una serie de estructuras de colapso, asociadas a deslizamientos que han facilitado la erosión y el desarrollo de valles profundos. En este sector, han sido identificadas avalanchas de escombros y han sido atribuidas a desestabilización del edificio antiguo (Thouret, 1996).
6. Las estructuras de inestabilidad las asociamos a la influencia de estructuras antiguas. Los efectos de gravedad debidos al desnivel entre los lados E y W del volcán actúan también como aceleradores de los procesos de desestabilización en este sector.
7. El flanco SW del Misti tiene mayor desarrollo que el flanco oriental. Esta característica, ha servido para definir una base elongada de orientación NE-SW y en ella se consideran todos los productos originados por el volcán.
8. Las observaciones estereoscópicas en fotografías aéreas, en las imágenes de satélite y los análisis de pendientes en los MDT, muestran que el Misti presenta un complejo depósito vulcano-detrítico y coladas de lava, principalmente dispuestos hacia el SW y NE.
9. En el tope de la parte intermedia del volcán, coladas de lava fueron datadas por K/Ar  $0.078 \pm 0.035$  ma. (Kaneoka and Guevara, 1984).
10. También en el flanco W, debajo de los 3000 m de altitud, análisis tefroestratigráficos muestran que este sector está compuesto por flujos piroclásticos, cenizas, algunos lahares y depósitos de avalanchas que evidencian alternancias de periodos explosivos y la ocurrencia de colapsos, debido a las inestabilidades en este sector (Legros, 1994; Thouret, 1996). Ignimbritas canalizadas que descienden hasta 12 km del cráter del Misti fueron datadas por  $C_{14}$  a  $1920 \pm 200$  años (Legros, 1994; Thouret, 1996).

## **2.2. RASGOS GEOMORFOLOGICOS.**

Las unidades presentadas se enmarcan dentro de la geomorfología regional del cuadrángulo de Arequipa, (Orihuela 1981) y la recopilación de trabajos presentados sobre dicho tema: El Servicio de Geología y Minería, la Facultad de Geología y Geofísica de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, y también estudios Geotécnicos hecho por particulares, estas unidades geomorfológicas son: La Cordillera de Laderas, La Cadena del Barroso y la Peniplanicie de Arequipa, que son de mucha utilidad para el presente estudio.

### **2.2.1. CORDILLERA DE LADERAS**

A ésta unidad se describe en la hoja Geológica de Arequipa, a la cadena de los cerros ubicados hacia el Sur de la ciudad, bordeada por los ríos Chili, Socabaya y Yarabamba, que forman parte del Batolito de la Caldera, que a su vez, es una continuación del Batolito Costanero que se extiende a lo largo del litoral peruano.

Se caracteriza por presentar un relieve de cerros moderadamente conspicuos, con relieve marcadamente dendrítico y en algunos casos paralelo. La superficie de esta unidad es rocosa con bloques que llegan hasta los 3 m. de diámetro, en la vecindad de los ríos aparecen afloramientos desnudos, por lo general se encuentra bastante meteorizada, debido al clima desértico de la región.

Aunque con el tiempo transcurrido la superficie muestra resistencia de los materiales que los constituyen, de alguna manera se observa, que el material erosionado ha aportado en pequeñas proporciones material de acarreo en las zonas adyacentes de sus emplazamientos, fundamentalmente en las zonas de Hunter y Tiabaya, favorecido por las fuertes pendientes de esta superficie.

Los cerros que mas sobresalen en esta superficie son: Sachaca (35 m.), Cerro la Aparecida (45 m.), Tío Grande (77 m. y 94 m.), Hunter (175 m.), la señal de Tiabaya registra una cota de 2,669 m.s.n.m. lo cual se deduce aproximadamente que tiene una altura de 470 m. frente al pueblo de Tiabaya, la inclinación supera los 30 grados

### **2.2.2. CADENA DEL BARROSO**

Esta unidad geomorfológica, es descrita a partir de los flujos de lodo y lava, conocidos como estribaciones que están asociadas a las erupciones volcánicas y a depósitos por la actividad post-volcánica de los tres volcanes que tutelan la ciudad, estos volcanes se encuentran dentro de la cordillera mencionada y son: El Chachani, Misti y Pichu Pichu.

Los límites de esta unidad es fácilmente distinguible debido a que su relieve muestra frentes de paredes empinadas conformando un sistema de drenaje paralelo a subparalelo, con un contraste notorio con la peniplanicie.

La superficie es ondulada e inclinada en dirección Sur-Oeste, con una pendiente promedio de 10% (Qda. San Lázaro), esta superficie está cortada por numerosas quebradas que permanecen secas durante la mayor parte del año, convirtiéndose en torrentes agresivos en épocas de lluvia, favorecidos por sus marcadas pendientes, que a su vez modifican su relieve por la erosión y transporte de sus materiales, convirtiéndose los pueblos jóvenes y urbanizaciones que se encuentran ubicados en esta zona, en un riesgo por la actividad modificadora.

Dentro de los principales PP.JJ. que se encuentran asentados en esta superficie está el PP.JJ. Atalaya, que se encuentra en un cerro de 40 m. de altura sobre la planicie, con una pendiente en la parte más desfavorable de 42%, con paredes empinadas en sus frentes y se encuentran bastante inestables. con una cota promedio de 2,525 m.s.n.m.

Destacan dentro de esta superficie algunos cerros como: La Chilca (30 m. de altura), Buena Vista (35 m. de altura), con pendiente de 40% y 50% la más desfavorable; Jerusalén (30 m. de altura) y 13.5% de pendiente promedio, Israel tiene 21.7 a 27.7 % de pendiente, Alto Jesús 13.5%, Campo Marte de 10.4 a 29.4%, el pueblo de Paucarpata con 4.1% de pendiente en promedio; en la zona de Yumina y Sabandía, la pendiente es de 10% en promedio.



### **2.2.3. PENILLANURA DE AREQUIPA**

Es una superficie ligeramente plana, inclinada hacia el Suroeste con una pendiente que va decreciendo conforme desciende de nivel, aproximadamente 4%.

Esta superficie originada por el levantamiento de la Cordillera del Barroso y las rocas ígneas de la Caldera, en la cual se depositaron materiales de distinta naturaleza que dieron lugar a la nivelación de esta superficie, se encuentran conformados por materiales tufáceos hacia el oeste y materiales detríticos hacia el este, los demás depósitos que rellenaron esta unidad han dejado superficies y relieves peculiares asociados a sus respectivos materiales.

Dentro de esta unidad se han distinguido las siguientes subunidades:

#### **2.2.3.1. SUPERFICIE DEL AEROPUERTO**

Esta superficie se ubica al noroeste de la ciudad de Arequipa, que abarca los distritos de Cayma, Zamácola y parte de Yanahuara, su relieve es suavemente ondulada con remanentes, que atestiguan formaciones tufáceas de la superficie de Pachacútec, que afloran en la mayor parte de las quebradas.

Los depósitos son de naturaleza detrítica y piroclástica, se caracteriza por quebradas medianamente profundas y casi verticales (Qda. de Zamácola) esta superficie ondulada oscila entre los 5 y 7 % de pendiente en Buenos Aires y Francisco Bolognesi respectivamente.

La vecindad mas importante la constituye la cadena del Barroso que hace contacto con el límite norte, siendo esta zona la principal aportadora de materiales de la superficie; el cañón del Chili que colinda por el lado este, compromete al sector que se extiende a lo largo de la carretera a Charcani.

#### **2.2.3.2. SUPERFICIE DE PACHACÚTEC**

Es una extensa superficie casi plana que comprende Semirural Pachacútec y Pachacútec, habitualmente de color rosáceo, asociado a los tufos rosados del volcánico Sencca. Por lo habitual sus vertientes se muestran estables y en equilibrio, sus quebradas definen un drenaje dendrítico fino, mostrando quebradas

algo anchas y poco profundas como en el sector de Challapampa y Pachacútec, las cuales son aprovechables por la agricultura.

Los tipos de relieve muestran una topografía fuertemente ondulada como el sector de Semirural Pachacútec cuyas pendientes llegan a 16.5% y en Alto Libertad la máxima pendiente llega a 13.8%, por la parte de Pampa de Camarones y Huaranguillo la agricultura la realizan en terrazas que alcanzan hasta 2 m. de altura.

Esta superficie colinda con la penillanura de Cayma y el lecho de inundación del Chili.

#### **2.2.3.3. CAÑÓN DEL CHILI**

El cañón formado por el río Chili, se extiende desde el costado del río Chili hasta el retiro de Santa Luisa (Chilina), formando un cañón bastante profundo, manifestando una intensa actividad de erosión y profundización de su cauce, que a la vez constituyen un testigo de las formaciones geológicas que van desde el Pre-cámbrico hasta el cuaternario.

Las paredes empinadas llegan a los 42 % de inclinación, con una altura máxima de 175 m. aproximadamente a la margen derecha.

#### **2.2.3.4. LECHO DE INUNDACIÓN DEL CHILI**

Engloba el lecho ordinario o aparente (determinado entre las orillas), el distinto sistema de terrazas sucesivas que se extienden a lo largo del valle del río y la llanura de inundación.

Este lecho tiene forma alargada en sentido longitudinal y asimétrica en lo transversal al eje del río dividiendo a la ciudad en dos partes.

Yanqui (1990) distingue tres terrazas consecutivas que en orden de antigüedad las describe extendiéndose desde Los Angeles, Misericordia Señor y La Gruta en el distrito de Yanahuara; la segunda asociada a los taludes verticales que comprende desde Las Retamas hasta la Urb. El Lago, en el mismo distrito; que a su vez sirve de dique para el encauzamiento del río con la Av. La Marina.

Esta subunidad se relaciona con la peniplanicie del cercado, y con la superficie de Pachacútec por el sur hace contacto con el Batolito de la Caldera.

#### **2.2.3.5. SUPERFICIE DEL CERCADO**

Dentro de esta unidad casi plana, se ubica el cercado de la ciudad de Arequipa, los distritos de Miraflores, Mariano Melgar y parte del distrito de Paucarpata con una pendiente de 5 a 6 % hacia el Suroeste. La atraviesan a todo lo largo, quebradas como las de Independencia, San Lázaro y Miraflores, algunas de ellas se originan en la cumbre del Misti.

Esta superficie colinda por el norte con la cadena del barroso, aportando la mayor cantidad de material de erosión, también limita con la superficie de Miguel Graú y el lecho de inundación del Chili por el suroeste, mientras que por el límite sur hace contacto con la superficie de Socabaya.

#### **2.2.3.6. SUPERFICIE DE MIGUEL GRAU**

Los flujos de lodos provenientes del volcán Misti, han sido depositados en los lugares donde hoy se asientan los PP.JJ. de Miguel Graú y Alto Selva Alegre, estos materiales al extenderse sobre la planicie, dejaron una superficie casi plana, sobre esta superficie ha trabajado la erosión casi lineal.

El tipo de relieve es típico del lugar dejando muestra de suavidad a la erosión a lo largo de su drenaje.

Esta subunidad es vecina por el norte con la Cadena del Barroso y por el sur con la penillanura del cercado.

#### **2.2.3.7. LECHO DE INUNDACIÓN DEL RIO SOCABAYA**

Esta superficie engloba el área de influencia del río de Socabaya, el cual abrió su paso por la Superficie de Socabaya, en esta unidad el Lecho es controlado por unos taludes escarpados labrados por el mismo río, con alturas menores a los 20m.

Al contactar con el río Yarabamba abarca toda la zona de Huasacache, controlado por las rocas intrusivas de Tingo y la Caldera hasta el río Chili.

### **2.2.3.8. SUPERFICIE DE SOCABAYA**

Con este nombre, Yanqui(1990), describe la superficie de Socabaya. formada por los flujos del Barroso, del Pichu Pichu, abarcando gran parte del distrito del mismo nombre.

La forma que presenta esta superficie es variada mostrando sectores planos como la de Characato a Socabaya y zonas onduladas como los cerros de Salaverry, Juli, Bella Vista y Buena Vista, en algunas depresiones formando pequeños pantanos.

Las alturas de estos cerros son: Salaverry(30 m.) con pendiente de 11% hacia el este y 19% por el oeste, la altura de los cerros Juli, Bella Vista, Buena Vista y Chilpinilla tienen en promedio 20 m.

El plano 1 nos muestra las diferentes geformas de la ciudad de Arequipa.

### **2.3. TOPOGRAFIA Y DRENAJE.**

El área que comprende la penillanura de Arequipa presenta una superficie ligeramente ondulada en forma triangular que comprende las localidades de Arequipa, Yura y la confluencia de los ríos Chili y Yura.

Esta rodeada de cerros altos que a la vez forman parte de la Cordillera de Laderas y las estribaciones del altiplano.

Las altitudes de esta superficie van desde los 1,800 hasta los 2,600 m.s.n.m., inclinada hacia el Suroeste con pendiente promedio de 4 % , el drenaje superficial se muestra bastante favorable y ésta discurre a través de los ríos Chili, Socabaya, Mollebaya y Yarabamba considerándolos como colectores mayores; los colectores secundarios están constituidos por quebradas que atraviesan la ciudad como las de San Lázaro, Miraflores, Santa Rosa, Paucarpata y Characato en la margen izquierda y la quebrada de Cerro Colorado o Chullo en la margen derecha, generalmente estos colectores se encuentran en actividad erosiva.

El cono volcánico tiene un drenaje principalmente radial, mientras que la Penillanura de Arequipa el drenaje es básicamente paralelo con dirección Suroeste, dentro de las subunidades de ésta se tiene que por ejemplo: en la

Superficie del Cercado la dirección del drenaje es S 45° W en Miraflores, en el Cercado S 60° W y en Mariano Melgar se tiene que el drenaje es E-W.

La Superficie de Socabaya presenta dos tipos de drenaje, uno relacionado a los cerros con pendientes de 20% y el otro asociado a la Penillanura con pendiente de 4%.

El drenaje de la Superficie de Pachacútec es muy favorable para evacuar las aguas superficiales, esto ocurre debido a una serie de colectores secundarios anchos y poco profundos, con pendientes que varían entre 6 y 4%.

En la Superficie del Aeropuerto presenta un drenaje paralelo, existiendo una diferencia de los distritos de Cayma y Yanahuara, que presenta quebradas profundas de 15 m. en promedio y con pendientes de 5 a 7% con dirección N-S; en diferencia con el distrito de Zamácola y el Aeropuerto que presenta un drenaje de 1 m. de profundidad, en la zona de Francisco Bolognesi es básicamente paralelo.

La Superficie de Miguel Graú (considerando Alto Selva Alegre), tiene un drenaje paralelo a subparalelo con una pendiente de 6% disminuyendo según la topografía, con quebradas que alcanzan una profundidad de hasta 10 m.

Es importante hacer mención de los numerosos riachuelos secos denominados "Torrenteras", que cruzan el área urbana por diferentes lugares y que en tiempos de lluvia llegan a convertirse en verdadero peligro para los pobladores.

## **2.4. ESTRATIGRAFÍA**

Se ha encontrado afloramientos por todo el contorno del Misti, sobre todo en el Sur del volcán hacia la ciudad de Arequipa, si bien es cierto que es pobre en cortes profundos que faciliten el estudio, se ha logrado la identificación de los afloramientos en las siguientes quebradas:

### **2.4.1. QUEBRADA PASTORES**

Primera quebrada importante al Este del río Chili, la quebrada Pastores es probablemente la más interesante desde el punto de vista estratigráfico. Esta muestra la secuencia piroclástica, desde la lava base que reposa directamente

sobre las ignimbritas del Plioceno. En la parte superior de esta lava (datada  $0.27 \text{ Mi} \pm 0.08$ ) encontramos residuos del Chachani, las secuencias riolíticas y dacitas a micas y la secuencia andesítica a piroxenos y anfíboles.

Los restos encontrados del Chachani se caracterizan por la descomposición de andesitas básicas que son mas básicos que los del Misti, y un parecido mineralógico en los feldespatos y piroxenos con un espesor de muchos decímetros y con líticos de 10 cm a lo largo de 5 Km desde la cumbre de Chachani, característico de los plineanos.

Las secuencias riolíticas y dacíticas a micas son en esta quebrada las mas completas, tres niveles plineanos importantes alternan con dos flujos de pómez y un flujo piroclástico con bloques de ceniza. La segunda secuencia plineana ha sido datada en 34 000 años gracias a la materia orgánica encontrada en la parte baja de la misma secuencia.

La secuencia andesítica es igualmente muy desarrollada, se han encontrado varias secuencias de plineanos interestratificados con los flujos piroclásticos. El episodio mas importante de flujos piroclásticos representa una buena parte de la vertiente de la quebrada.

#### **2.4.2. QUEBRADA SAN LÁZARO**

Es la mas profunda de las quebradas del Misti, es también el camino mas directo entre el volcán y la ciudad. Estratigráficamente esta corta por mas de 50 metros de profundidad una avalancha de rocas que constituye aquí la base. Muy pocos derramamientos plineanos son observables, lo que dificulta las correlaciones.

Aquí se puede observar en la base un flujo de lava andesítica que se encuentra interestratificado con flujos de piroclastos y seguido de una secuencia de bloques de ceniza de espesor de una decena de metros. Sobre ellos se observa una secuencia plineana amarillenta por una alteración. Esta es casi siempre inaccesible a causa de la verticalidad de sus paredes. Podemos reconocer sin embargo un afloramiento riolítico bajo una avalancha de escombros.

La quebrada San Lázaro muestra islas de 20 y 25 metros de alto de paredes verticales y techo plano, constituidos por un flujo piroclástico y de pómez que son a menudo seguidos de plineanos. Las pómez son fácilmente reconocidas por una espectacular mezcla de magma color claro y uno oscuro. Pedazos de madera carbonizados permitieron la datación 1920 B.P.± 200. Esta erupción representa el último suceso importante del Misti.

#### **2.4.3. QUEBRADA HUARANGAL**

A un kilómetro de las afueras de la ciudad (por el P.J. Miguel Grau) esta quebrada se observan los depósitos de avalanchas de los que constituye la base estratigráfica, sobre los que se desarrollan directamente las secuencias andesíticas que muestran una alternancia de plineanos y de flujos piroclásticos a menudo con una secuencia plineana notable, menos completa que en la quebrada Pastores; los principales niveles encontrados en las otras quebradas pueden ser reconocidas también en esta quebrada, y se les caracteriza por una secuencia de plineanos y flujos piroclásticos. El flujo de pómez datado 1920 B.P. esta igualmente presente en esta quebrada.

#### **2.4.4. QUEBRADA AGUA SALADA**

La quebrada Agua Salada, desciende al el Sur hacia Chiguata. En la confluencia con el río Andamayo se unen en una avalancha de escombros que forman las colinas que separan esta localidad con la ciudad de Arequipa, cerca de la vertiente esta remonta una secuencia de flujos piroclásticos andesíticos, que comprende una alternancia de sucesos de flujos piroclásticos y de flujos fluviales. En la parte base de uno de los flujos piroclásticos se encontró un pedazo de madera carbonizada sobre el que se viene realizando la datación correspondiente. Aquí se puede encontrar también los flujos de pómez de 1920 B.P.

#### **2.4.5. QUEBRADA AGUA DULCE**

Afluente de la quebrada Agua Salada, esta quebrada nos muestra un corte en la parte superior de andesita con alteraciones, recaídas plineanas, flujos piroclásticas que son productos del último periodo eruptivo a menudo representado en otras

quebradas únicamente por secuencias de madera carbonizada sobre uno de los flujos de piroclásticos lo cual ha dado una edad de 10670 B.P.  $\pm$  240.

#### **2.4.6. QUEBRADA GRANDE**

Desde el camino de Caricari que lo cruza hasta la confluencia con el río Andamayo algunos centenares de metros mas lejos, esta quebrada presenta algunos cortes muy interesantes en la secuencia andesítica, riolítica, dacítica y avalanchas de escombros.

La secuencia andesítica esta bien representada en el afloramiento, además se encuentran diferentes caídas de plineanos, quienes permiten hacer la correlación estratigráfica entre los sectores SE y SW. Una caída plineana amarillenta constituye uno de los últimos eventos importantes que ha cubierto todo este sector SSE.

Cerca de la parte baja del flujo de recorta la secuencia con riolitas atrapadas dentro de la avalancha de escombros y la secuencia andesítica. La cual esta representada por flujos piroclásticos andesíticos y con bloques de cenizas donde se encontró madera carbonizada que arroja una edad de 31200 B.P.  $\pm$  1330.

Por debajo la avalancha de escombros mide de 10 a 20 metros. Los flujos de la confluencia con el río Andamayo se observa los flujos piroclásticos y los depósitos volcanoclásticos bajo la avalancha de escombros, este es el único lugar donde se observa la base de esta avalancha. Subiendo la quebrada se observa flujos de piroclastos y la secuencia andesítica, cerca al curso de la corriente, esta quebrada y vecinas se juntan en lugares difíciles de llegar, y el flujo de pómez de 1920 B.P. se encuentra encajado dentro de los valles.

#### **2.4.7. QUEBRADA HONDA Y POBLADO DE CARICARI**

Situado en el relieve de dos valles entre la quebrada Honda y el río Andamayo, el poblado de Caricari ofrece dos cortes en una sucesión plineana; en la base encontramos flujos piroclásticos, siendo el único flujo que ha podido depositarse sobre este relieve, al parecer por su viscosidad.



En la parte superior, la secuencia muestra cuatro niveles de recaídas de plineanos. La secuencia andesítica compuesta por muchos niveles correlativos con los del sector SW y con dos niveles del camino a la Laguna de Salinas.

En esta quebrada estas secuencias de andesitas se encuentran interestratificados con los flujos de piroclastos. Mas al Este el río Andamayo encaja los terrenos volcánicos mas antiguos del Pichu Pichu. La quebrada Caricari, con vertientes mas ligeras no muestra afloramientos de depósitos de Misti.

#### **2.4.8. PILONES DE PACHECO**

Se ubica en las partes altas del volcán Misti hacia el SW, presenta algunos afloramientos que permiten reconocer las recaídas plineanas vistos en otras quebradas. Estos son en general mas gruesos aquí, pues están mas cerca al volcán. Observamos en particular una recaída plineana recubierta con flujos piroclásticos de piedra pómez, sin duda de la misma erupción. Observamos también un pequeño flujo de lava desconocida en otros lugares seguido de un flujo piroclástico, probablemente de la ultima erupción.

#### **2.4.9. CAMINO A CHARCANI V**

Situado sobre el área SW del Chachani, el camino que lleva a la central Hidroeléctrica de Charcani V, particularmente se muestra muy interesante; de hecho los problemas de erosión y de encajaduras tan agudas en la quebrada, y por otro lado los flujos piroclásticos del Misti son bloqueados por el profundo cañón del río Chili (400 m) que separa los dos volcanes. Tenemos entonces una sección de recaídas plineanas que descienden hasta la secuencia riolítica.

Desde la cumbre hasta el cruce de las secuencias riolíticas y dacíticas están bien representadas y reposan sobre un flujo piroclástico de bloques y cenizas del Chachani. A partir del cruce, sobre el camino a Charcani V, las erupciones del Misti reposan sobre flujos de lava, las avalanchas de escombros y flujos de lodo u otros depósitos fluviales provenientes del Charcani. Ningún depósito de una erupción reciente del Misti parecen estar interestratificados en la secuencias riolíticas, dacíticas o andesíticas.

La secuencia de micas comienza con el flujo piroclástico, el único flujo que pudo atravesar el río Chili. Enseguida se superponen tres recaídas de plineanos. La secuencia andesítica esta representada por una veintena de recaídas plineanas separándolas unas de otras por niveles de acumulación de cenizas. Las caídas de pómez tienen niveles de hasta 80 cm de espesor y muestran alternancias de feldespatos, piroxenos y anfíboles.

#### **2.4. CLIMA.**

La ciudad de Arequipa presenta un clima desértico, con una precipitación anual promedio de 62 mm., siendo mínima en los meses de Abril a Agosto y máxima en los meses de Enero a Marzo, teniendo un promedio mensual de temperatura de 24 °C para los meses de Diciembre a Marzo y un mínimo de 3.7 °C para los meses de Junio y Julio, con una humedad relativa en promedio de 57.1%.

### **CAPITULO III - GEOLOGÍA HISTÓRICA**

Los volcanes se deben a un proceso telúrico conocido con el nombre de "Tectónica de Placas". La corteza terrestre está fragmentada en enormes placas, unas 15 entre grandes y pequeñas, que rozan o chocan frontalmente con movimientos apenas de centímetros por año. Sin embargo, por estos movimientos y por otros fenómenos geofísicos se producen poderosas acumulaciones de energía en los planos de contacto debidas, en el caso específico, al proceso de subducción de la placa de Nazca que se mueve por debajo de la placa continental; al límite máximo de carga soportable, en algún punto se produce la liberación de la energía acumulada, en forma de ondas sísmicas que producen temblores o terremotos y calor a elevada temperatura, de tal manera que llega a fundir las rocas comprometidas en el proceso, formando un foco magmático.

El magma asciende lentamente como una bolsonada, debido a su menor peso específico y, cuando la masa pastosa casi fluida alcanza la superficie del suelo, brota como lava o como material explosivo y se desparrama depositándose alrededor de la fisura de emisión, formando un volcán o acrecentándolo en el caso ya que existiera uno.

El Misti es clasificado como un estrato-volcán, formado por capas rocosas, unas encima de otras y presenta 2 o hasta 3 conductos centrales por los que salió la lava, que desemboca en el vértice del cono cráter.

### **3.1. EL VOLCAN MISTI**

Entre los numerosos accidentes naturales que adornan el paisaje arequipeño, sin duda el que mayormente llama la atención es el enorme monte cónico, conocido como El Misti (El Señor) que se levanta 3500 metros de altura por encima de la ciudad hacia el Norte, a tan solo 15 Km de distancia de ella, la cumbre se encuentra a 5825 m.s.n.m. presentando sus laderas cierta simetría, que evidencian su juventud relativa.

Su corona derruida del cráter, se desmorona continuamente y va perdiendo altura. Sus flancos tienen 2400 m de altitud por el lado Sur (Alto Selva Alegre) y a 4100 m en el lado Norte (Pampa Cañaguas), su altura es de 3500 m sobre Arequipa (Plaza de Armas) y de 1900 m sobre el Altiplano. La disparidad de estos datos pone en evidencia su ubicación sobre un enorme pliegue de la corteza terrestre (Parodi, 1987), lo mismo que los demás volcanes del Perú y Chile. Esta flexión es una zona de debilidad que ha favorecido el surgimiento del magma.

Las otras montañas vecinas, que se encuentran a ambos lados del Misti cierran un arco del horizonte septentrional; Chachani con una altura de 6100 m.s.n.m. y el Pichu Pichu a 5650 m.s.n.m.

El Misti presenta fumarolas visibles algunas veces desde la ciudad, para citar algunos casos en 1983 y 1984 y a mediados de 1985, los diarios publicaron noticias sensacionalistas referente a una posible erupción. Sobreviene la calma cuando se comprueba, en pocos días, que no es así, ya que no se manifiestan otros fenómenos que son premonitores como el aumento y repetición continua de sacudidas sísmicas locales, el considerable aumento de las fumarolas, las modificaciones en el campo magnético de la zona en actividad, una leve hinchazón del edificio volcánico y hasta alteraciones climáticas, fenómenos todos

que detectan los instrumentos, instalados en el Misti por el Instituto Geofísico del Perú, o los instrumentos del Observatorio de Characato de la U.N.S.A.

La mayor actividad fumarólica se produce en el domo, el olor a  $\text{SH}_2$  es característico de las emanaciones de ácido sulfhídrico; el ácido clorhídrico se presenta en una proporción de 1,5 a 2% del vapor de agua, por esto el color de las fumarolas es albo, la temperatura de las fisuras de emisión es de 100 a 120 °C. Otros gases están presentes en proporciones menores. Las incrustaciones formadas por las fumarolas del Misti son de azufre, yeso, anhidrita y ralstonita. Este último es un mineral raro de color rojo, encontrado por primera vez en un volcán siberiano.

### 3.1.1. PLANIMETRÍA DEL VOLCÁN

A raíz de muchas especulaciones en el año de 1963 el Instituto Geofísico Militar efectuó la restitución estereo – fotogramétrica del cráter del Misti llegando a las siguientes conclusiones:

|   |         |
|---|---------|
| La cota mas alta de la boca exterior es     | 5 822 m |
| La cota mas alta de las boca interior es    | 5 747 m |
| La cota del punto mas alto del domo es      | 5 584 m |
| La cota del punto mas bajo del cráter es    | 5 549 m |
| Error relativo en los valores acotados      | 1 m     |
| diámetro mayor de la boca exterior          | 935 m   |
| diámetro menor de la boca exterior          | 690 m   |
| diámetro mayor de la boca interior          | 545 m   |
| diámetro menor de la boca interior          | 520 m   |
| Excentricidad del punto mas alto del domo   | 45 m NW |
| Excentricidad del punto mas bajo del cráter | 75 m SE |

### **3.2. FORMACION DEL VOLCÁN MISTI**

Por los datos obtenidos sobre la historia del Misti se ha desarrollado en dos etapas desde el origen de su surgimiento (mas de 4 millones de años), por un conducto o chimenea que ha atravesado formaciones rocosas volcánicas preexistentes de tipo Ignimbrítico del periodo que se ha denominado Sencca, pertenecientes al Terciario Superior (Plioceno) con mas de 5 millones de años de antigüedad. Empezó a surgir en medio de los complejos volcánicos Chachani al Oeste y Pichu Pichu al Este, que existían, en un conjunto de seis volcanes el primero y un rosario de cuatro el segundo, actualmente casi por completo destruidos por la erosión. El edificio del Misti fue creciendo por sucesivas erupciones distribuidas en el transcurso de tres millones de años hasta alcanzar al final, una altura mayor a la que actualmente tiene. La roca derivada de las erupciones lávicas, es la andesita y una muestra recogida de Horno Chico (cañón del Chili), considerado modelo de este tipo, arroja una edad de 3.2 millones de años. Esta roca presenta una textura cristalina, microporfírica con matriz microlítica fluidal. En su crecimiento el volcán en su primera etapa se denomina Chila y el espesor de acumulación de capas y mantos se acumula en mas de 900 m. Las erupciones se produjeron por la chimenea central de un diámetro muy amplio y entre fines del Terciario y comienzos del Cuaternario.

A continuación de esta primera etapa se paso a una primera fase de gran quietud, entre 200 y 300 mil años de duración, en la que los agentes del intemperismo causaron un gran desgaste en el edificio volcánico. El diámetro del cráter, por esa época, debe haber sido enorme, tal vez entre 3 y 4 Km prácticamente derivado de una caldera.

Hace mas de un millón de años se inicio la segunda etapa de formación del Misti con el brote de nuevas erupciones por una chimenea de menor diámetro que la anterior, situada al costado Este. En este periodo volcánico, con sus rocas lávicas y piroclásticas se conoce con el nombre de Barroso y se han desarrollado en el Cuaternario Reciente, Holoceno (L. Macedo, 1994).

Con el largo paréntesis actual, de algunos miles de años, en el que el volcán no erupciona en forma ostensible, la erosión sigue cumpliendo su acción destructora.

Este segundo periodo de formación del Misti se le conoce con el nombre de **Barroso** y se inició hace más de un millón de años. Terminado este segundo periodo, la actividad del Misti está considerada por Alberto Parodi “...**en un estado de quiescencia, en una fase intereruptiva. (de descanso) Nada hace pensar que haya terminado en modo definitivo este proceso en éste y en otros volcanes (...) como el Ubinas, el Ticsani, el Yucamani y en otros fumarólicos como el Sabancaya y el Coropuna.**

Sobre las manifestaciones volcánicas del Misti después del periodo Barroso, Parodi agrega: “**Desde las primeras informaciones históricas hasta el presente se conoce qué en El Misti se producen emisiones gaseosas notables de tiempo en tiempo acompañadas de sacudidas sísmicas casi imperceptibles. Son manifestaciones muy moderadas que, sin embargo, evidencian estados de reducida actividad**”.

Sin embargo, el Misti habría tenido, en una época histórica cercana (1440-1450; según Antonio Chávez), erupciones significativas, con destrucción de los pueblos próximos y numerosos muertos (**Martín de Murúa**).

### **3.3. HISTORIA ERUPTIVA**

Curiosamente, el Misti siendo identificador de Arequipa, no se sabe la procedencia de su nombre, hasta los días del historiador Ventura Fernández de Córdoba (1752) y en las postrimerías de la colonia era anónimo, nombrándosele genéricamente con el del volcán. Pareciera que en época republicana le fue bautizado con el nombre de Miti que en el lenguaje mestizo, quiere decir “caballero”. Los indios chimbas, le conocían, según versiones españolas, con el nombre de San Francisco.

Según los antecedentes históricos encontrados de los diferentes archivos con los que cuenta la ciudad se ha logrado recopilar lo siguientes relatos de los eventos

ocurridos en el transcurso de su historia relacionados a las diferentes manifestaciones eruptivas del Misti:

### 3.3.1. ERUPCIÓN DE 1440 a 1450

Es importante anotar que cuando Vásquez de Espinoza (1650) describe la ciudad de Arequipa y parte de su distrito nos dice: ***“hay por la banda del oriente (de Arequipa) un cerro o volcán muy alto a modo de pan de azúcar, tiene de subida más de dos leguas y no es este el que reventó (Huaynaputina), por que no tiene fuego...”***

Martín de Murúa (Rivera, 1996), fue un cura mercedario que aprendió las lenguas quechua y aymara, lo que le facilitó tener conocimiento de la actividad del Misti en época incaica, basada en los relatos de los nativos peruanos. Al parecer dicho evento ha dejado una evidencia material. Que consiste en una pequeña capa de ceniza de color negro que subyace a la ceniza de color blanquecino del volcán Huaynaputina (erupción del año 1600 DC). El hecho de no encontrar alguna capa que la separe implica que pueda tratarse de la ceniza de tiempo incaico relatada y tomada por Murúa.. En el relato original se advierte una relación existente (atribuida por los nativos) entre el volcán y los sismos, es decir que ante cualquier movimiento sísmico las miradas se dirigían hacia el volcán. Así mismo los nativos se refieren a una gran nube oscura que pudo haber sido la fuente de origen de esta capa que hoy en día mide más de 3 centímetros en la periferia de la ciudad actual.

Sin lugar a dudas, después de revisar los documentos a cerca de estos fenómenos en Arequipa, el que hace una descripción más detallada es la del padre Martín Murúa (1925), cuando escribe sobre Arequipa lo siguiente: ***“La Coya Ipabaco, mujer del Inca Yupanqui acudieron a esta ciudad (Arequipa) animando a toda la gente y haciendo muchos sacrificios al dicho volcán; gobernó mucho tiempo el Cuzco por ausencia de su marido el Inca Yupanqui; muy valerosa, manifiesta en un terrible terremoto en un volcán grande que esta tres leguas de la ciudad de Arequipa que lanzo de sí tanto fuego con tan grandes llamaradas que dicen que fue cierto haber llovido de***

***esta ceniza en todo el reino, la cual mando hacer muchos sacrificios a sus ídolos...”***

Un poco más adelante, Murúa nos hace relación de los sucesos que acontecieron antes de la llegada de los españoles a Arequipa; debemos de remarcar que Murúa estuvo en Arequipa entre los años de 1599 y 1600 según consta en los archivos conventuales Mercedarios (Barriga 1951); nos cuenta: ***“dicen los viejos antiguos que esta ciudad llamada Yarapampa (antes que se llame Arequipa), que en tiempo del fuerte Inca Yupanqui, hubo un grandísimo terremoto, procedente del volcán por que lanzo de sí tanto fuego y con tan grandes llamaradas que parecía ser de día claro, cubriéndose luego el volcan de una nube oscurísima por espacio de dos días en los cuales no se vio más fuego”.***

***“Después de ello se sucedió otro terremoto con grandísimos temblores, despidiendo toda esta noche el volcán, grandes llamaradas de fuego, con terribles ruidos y gran ediondez de azufre acompañada de mucha cantidad de piedra y cenizas, y portentosos truenos por espacio de cinco días, lloviendo ceniza de hasta 150 leguas; y que si no fuera por el gran valor del Inca Yupanqui y de la Coya Ipabaco, se hubieran ido los indios de todo el Perú al menos hasta donde llego la dicha ruina, los unos apavorándose y los otros desesperados y dejándose morir; por que como estos reyes vieron haberse arruinado y asolado toda esta dicha ciudad, de suerte que no quedo tan solo una persona ni un edificio ni ella que no feneciese, salvo los indios de la parroquia que tiene en un distrito llamado San Lázaro, que estos se escaparon por no estar en ella, sino en la ciudad del Cuzco, a causa de haber ido a hacer la mita del Inca, que de otra manera bien murieran y así no hay ningún indio natural de esta ciudad en ella, sino todos mitimaes y de los que trajo el Inca cuando vio la ruina y los dichos indios de San Lázaro, que volvieron a poblar y así se dice hoy en día Llactayoc, que quiere decir nacidos en la tierra y criollos en ella...”***

El padre Bernabé Cobo (1890), que radicaba en Lima hacia los primeros años del siglo XVII y que recién empieza sus visitas al Virreinato del Perú a partir del año



1612, nos refiere lo siguiente: ***“que son muchos los volcanes y que han reventado algunas veces, como hay memoria del de la ciudad de Arequipa (El Misti). León Pinelo dice que este volcan hizo amago de ceniza en 1577, que reventaron en tiempo de los reyes Incas, antes de la venida de los españoles a este reino...”***

### **3.3.2. EVENTOS DE 1542 a 1599**

En el texto "Los terremotos de Arequipa" (volumen I, 1951), escrito por el padre mercedario Víctor Barriga. Se ha tomado la narración de una probable actividad del Misti. Sin embargo el evento guarda siempre una estrecha relación con la actividad sísmica, ya que en Arequipa ocurrió un terremoto el 22 de enero de 1582 (Barriga. 1951). La vinculación a una probable actividad volcánica se debe al hecho que el sismo ocurrió al medio día del 22 de enero de 1580 y repentinamente se oscureció. Así mismo en un puerto antiguo de la costa (Mollendo-Islay), distante 84 Km aproximadamente de Arequipa, ocurrieron hechos muy importantes que vinculan y ratifican una actividad volcánica: muerte de ganado y pérdida de terrenos de cultivo por contaminación de las aguas.

### **3.3.3. ERUPCIÓN DEL AÑO 1677**

Teodosio C. Ballón (1901), comete un error en su libro al relatarnos sobre la expedición realizada el 2 de Mayo de 1667 consignándola como realizada en el año 1677. Sobre esta erupción del volcán Misti del año 1677 que no tuvo mayores consecuencias, nos indica: ***“al continuar saliendo el humo se envió otra expedición encabezada por el cura de la compañía Fernando Bravo y otros, informando además de que habían sentido mucho ruido dentro del volcán...”***

El presbítero Ventura Travada y Córdova en su crónica "Suelo de Arequipa convertido en Cielo" (1752) habla extensamente sobre el Misti y su actividad fumarólica de Marzo y Mayo de 1677. Los habitantes de Arequipa se atemorizaron al observar fumarolas en el volcán, ya que aún estaban muy frescos los recuerdos de la erupción del año 1600 del volcán Huaynaputina. Al ser tan intensas dichas fumarolas, se organizaron dos expediciones: la primera en Marzo que no tuvo un

buen término. Y la segunda en Mayo constató que lo observado desde la ciudad se trataba de fumarolas del volcán puesto que sintieron mucho olor a azufre. Dicha actividad por tanto sólo fue fumarólica con alguna emanación de cenizas alrededor del cráter.

#### 3.3.4. ERUPCIÓN DEL AÑO 1784

Es raro que un historiador como Domingo de Zamácola no consigue en sus escritos el nombre del volcán, ¿Misti?, cuando nos relata algunos temblores y cosas curiosas ocurridas: ***“El 9 de julio de 1784 hubo un temblor a las 8.39 de la mañana, el continuo movimiento de la tierra no descansa, por la noche a las 12.30 se oyó un estruendo como si hubiese disparado un cañonazo por el aire o como si se hubiese caído algunas casas; se asegura que en este instante descendió por el lado del volcán, un globo ígneo, que muchos lo vieron, sus centellas alumbraron y se hizo invisible por la parte de la sierra...”***

#### 3.3.5. ERUPCIÓN DEL AÑO 1787

Cuando el Intendente de Arequipa, Don Antonio Álvarez y Jiménez (Barriga 1941), en una de sus primeras acciones es la de realizar la visita a Chiguata y su volcán; ordeno que se levantará un plano del referido volcán, para ello el día domingo 3 de Diciembre del año 1786 emprenden la ascensión el matemático Francisco Vélez, secretario de esta intendencia; el Teniente Coronel Don Francisco Suero; el Alférez Don Manuel de Clos; Don Laureano José Maldonado, oficial de la secretaria; el Alcalde de Naturales Don Domingo Vásquez y varios indios. En esta oportunidad, no se menciona de que el volcán humeara en forma significativa.

Según la misma información de Álvarez y Jiménez, el volcán empieza a humear en forma alarmante a partir del día 28 de Julio de 1787 como nos indica: ***“Desde el día 28 de Julio un gran humo aliginoso y denso, que poniendo en consternación toda la ciudad a dado motivo a que el Estado Eclesiástico empezase a ser publicas procesiones y rogativas, citando a la gente de ambos sexos para procesión de sangre...”***

Esta procesión fue aprovechada para cumplir las ordenes del Intendente de realizar el levantamiento topográfico del volcán. En esta oportunidad llegan a la cumbre Francisco Suero, Francisco Vélez, Francisco Ojeda y doce indios cargados de yareta.

Esta expedición salió de Chiguata el día 8 de Octubre de 1787 y llegó a la cumbre el día 10 relatando lo siguiente entre otras cosas: ***“En esta eminencia de Risqueria que domina toda la cumbre y parte principal de la citada boca observamos por espacio de 6 horas, que en el centro de ella salía expelido un gran trozo de vapor del grueso de mas de 9 cuadras unas veces en forma de pirámide y otras en la de nube, siempre prolongada y continuando, sin embargo de forma hacia arriba en su dilatación diversas figuras y promontorios, según el impulso de la explosión de la gravedad del aire, que elevándose en grande altura se reunía y condensaba hasta formar cuerpos separados; los cuales corrían por la atmósfera, a donde les llevaba el viento a manera de nubes, de aquella especie de solidez y color que estas aparentan...”***

***“...Puestos los ojos en esta extensa cumbre, se nos presento el gran boquerón principal. Su vista nos fue de bastante terror, tanto por el vapor denso que exhalaba con ímpetu y violencia aquella concavidad, cuando por el fuerte ruido que se oía a manera de un río caudaloso a ratos muy recio, y a ratos remiso, según las ondulaciones del aire y la impresión que hacia el eco de la cóncava pañolería. En esta especulación vimos que la columna de vapor no obstante de ser de tan grande corpulencia, nos llenaba toda la oquedad de la expresada boca, y que salían unas veces por un lado y otras por otro tomando diversas direcciones, pero sin dividirse, ni separarse hasta la mayor altura a que se eleva...”***

***“...Primeramente advertimos, que no se percibía hedor alguno a azufre, o cosa semejante; antes por el contrario la fetidez era muy grande como de cuerpos podridos. Tenia si, algún antimonio, por que era a manera de ácido fermentado a semejanza de la herrumbre o del carnillo que da el cobre***

***mohoso, o a moho del hedor de las tintorerías cuando están hirviendo los tintes de diversas especies y calidades, que de todo punto causa una inexplicable ediondez...”***

Si bien es cierto que la información es imprecisa, por la evidente falta de conocimientos vulcanológicos, que impiden establecer parámetros comparativos, es suficiente la información histórica disponible para tener la certeza de que la actividad del Misti en esos años no habría aumentado ostensiblemente... Que esas manifestaciones puedan llamarse rigurosamente erupciones, es seguramente discutible, aunque expresan que después del periodo **Barroso**, la actividad del Misti continúa. No obstante, las manifestaciones del Misti, parece que no han pasado de las emanaciones de gases, que hasta la fecha conocemos.

### **3.3.6. PROBABLES EVENTOS DEL SIGLO XIX**

En mayo de 1971, los andinistas: Antonio Salomón, Luis Alberto Linares, Jesús Chacón, Domingo Piromally, Raúl Damiani, Patricio Núñez del Prado y Pablo Masias Núñez del Prado, después de observar el cráter desde su mismo borde, declararon ante la prensa la cual publicó las siguientes notas:

***El Comercio: “...bajaron hasta cierta parte del cráter, comprobaron extraordinarias fumarolas, ruidos intensos subterráneos como temperaturas elevadas. ...echaron por tierra las aseveraciones de numerosas personas, en el sentido de que el Misti no emana fumarolas, y que las columnas, observadas desde la ciudad, son simples nubes”. (71/5/4).***

***Expreso: “Que el volcán Misti está en constante actividad y que es fácil observar desde el domo que las llamas de fuego son enormes y que los gases cobran dimensiones inusuales. (...) El ruido, asimismo, es alarmante, pues se parece al sonido un jet cuando empieza a volar”. (71/5/7).***

***Correo: “Ayer confesaron los andinistas que nunca antes han visto semejante cantidad de gases del cráter, lugar en el que permanecieron cuatro horas... Un ruido parecido al que producen los jets, se siente dentro del cráter, cosa que nunca hemos escuchado...” (71/5/4)***

Algunos de los andinistas buscaron al vulcanólogo Alberto Parodi para darle una información más directa e indagar sobre la situación real del Misti, luego de darle hasta los detalles de lo visto en el cráter, él nos hizo la siguiente explicación se trataba de una desgasificación del volcán, pero acrecentada por el vapor de agua producido por el hielo y nieve que se derretía. Es decir, que al haberse acumulado una mayor cantidad de nieve que en otras temporadas al volverse agua, había descendido filtrándose en el domo, y por las altas temperaturas había resurgido violentamente en forma de vapor, junto con los gases.

No es casual, que en el mismo informe de 1787, se dice textualmente lo siguiente: ***“A, esto se agrega, que a principios de el mes de Julio cayó en esta cordillera una inmensa Nevada, que cubrió no sólo todo el volcán hasta su ultimo pie, sino también los Cerros colaterales, hasta una grande distancia y se mantuvo la Nieve más de quince días hay allí muchas aguas, que combatidas por el fuego central causan fermentación y evaporación copiosa, capas de causar al Mismo tiempo aquel gran ruido...”***

En el año 1971 la temporada de nevada fue intensa (febrero marzo) por lo que la cantidad de nieve que se acumuló en la cumbre fue mayor de lo normal ¿No sucedió exactamente lo mismo en 1677 y en 1787?

Simkin y Siebert (1994), señalan que en Agosto de 1830 y 1831, en Septiembre de 1869 y en Marzo de 1870, ocurrió algún tipo de actividad; lamentablemente al revisar otros textos históricos, no se pudo encontrar información.

Sin embargo, un testimonio encontrado sobre una posible actividad o período de crisis, lo encontramos en un texto de Flora Tristán (Rivera, 1996). Dicho testimonio dice: ***“...Algunas veces el volcán arroja humo y esto sucede particularmente por la tarde. A veces en ese humo he visto llamas...”***. Dichas observaciones fueron realizadas a finales de Octubre de 1833 en su visita a Arequipa. Lo rescatable es que aparentemente los eventos del Misti sólo han consistido de fumarolas. En 1878, ante las continuas emisiones de fumarolas, Juan López de Romaña conjuntamente a Solon Bailey ascienden al volcán para realizar las primeras mediciones y ensayos de gases en papel tornasol, comprobándose la

existencia de anhídrido carbónico, hidrógeno sulfurado y ácido sulfúrico (Alberto Parodi).

### 3.3.7. EVENTOS DEL SIGLO XX

En el presente siglo se ha observado actividad fumarólica en el domo existente dentro del cráter interno según comentarios de diversos andinistas que lo han ascendido. Así mismo ellos indican que dicho domo ha crecido (se ha "inflado") en los últimos 40 años (Juan Zárate, comunicación oral). Así mismo se ha constatado personalmente la constante emisión de gases provenientes del domo e incluso del borde este del cráter interno.

En 1932, el doctor Compton asciende al cráter del volcán Misti y comprueba la existencia de fumarolas en el domo, opinando que se encuentra activo. Esto causó una reacción de alarma en la población al ser mal interpretada por el periodismo (Alberto Parodi). También se debe señalar las crecientes actividades fumarólicas en 1948-49 y en 1984-85 que causaron alarma en la población.

### 3.3.8 RECIENTES INFORMACIONES

Últimamente, mucha gente ha opinado acerca del Misti y su reactivación; una de estas opiniones, producto de un trabajo, al parecer personal fue la del Ing. Richard Oliver (Ing. del Centro Nuclear de Londres) siendo el Ing. Modesto Montoya de la Sociedad Peruana de Física (encargado de dar a conocer dicho trabajo) dijo: ***“que el Misti se encuentra actualmente muy activo, cuya cámara del magma esta llenándose y que en cualquier momento puede explotar. Es como una olla de presión que en cualquier momento puede llegar a su fase final...”*** (1991 El Comercio).

Dichas declaraciones causaron un revuelo general, tanto por que el pueblo no conocía los fundamentos de tal planteamiento y segundo por que la población y los investigadores locales desconocían las fuentes y recursos que se utilizaron para llegar a tales conclusiones.

## **CAPITULO IV - ESTRATIGRAFÍA Y GEOLOGÍA**

La actividad eruptiva del estrato volcán Misti, representa una amenaza permanente para aproximadamente 900,000 habitantes que viven en Arequipa. El Misti comprende dos edificios construidos sobre un sustrato vulcanoclástico que incluye gruesos depósitos de lahares e ignimbritas del Pleistoceno y una serie de flujos de lava e ignimbritas del Cuaternario inferior (Thouret, 1996).

### **4.1. PRE-MISTI**

El sustrato llamado Pre-Misti, agrupa una serie de depósitos volcánicos que son preexistentes a la edificación del volcán y son observados en el cañón del río Chili en el flanco oeste del actual volcán. Las unidades que conforman este sustrato Pre-Misti son ignimbritas de naturaleza riolítica y dacítica conocidas como “sillar” (Jenks y Goldich, 1956), o también como volcánico Sencca (Guevara, 1968 y Vargas 1970). Así como unos derrames de lava cuya edad no es conocida actualmente. Estos derrames se ubican en Miraflores y Mariano Melgar, Dicha unidad corresponde al volcán Chachani.

### **4.2. MISTI ANTIGUO**

Al Misti antiguo se le asigna una edad Pleistocénica inferior a media (Thouret, 1997). El cual está compuesto por una secuencia de sedimentos volcánicos (200 m de espesor); Flujos escoriaáceos (50 m de espesor) localizado por inmediaciones del Colegio Militar Francisco Bolognesi; Derrames de lava andesítica que se extiende a lo largo del río Chili; Derrames de lava en bloques (200 m de espesor) los cuales también se les encuentra en el río Chili; Secuencia de flujos ignimbríticos no soldados (20 a 30 m de espesor), localizados por la hidroeléctrica de Charcani I y II; El piedemonte del Misti “antiguo” esta cubierto por depósitos de avalancha de escombros y cubren mas de 50 Km<sup>2</sup> hacia el Sur y SW; estos registran el derrumbe del flanco del volcán antiguo que ocurrió probablemente antes del Pleistoceno superior.

Estos depósitos de avalancha de escombros se entretajan con otros depósitos similares hacia el SE del piedemonte, reflejando la desestabilización del extinto complejo volcánico Pichu Pichu ubicado a 35 Km al Este de Arequipa.

### **4.3. MISTI "MODERNO"**

El estratocono "moderno" se ha formado casi contiguo, y se ha superpuesto en parte, al Misti antiguo hacia el Este y Sur Este. Una variedad de domos con flujos de lava forman la base del estratocono arriba de los 3220 m y se han emplazado a través de largos periodos de extrusión de domos y efusión de lava.

El denominado Misti "moderno" está conformado por varios tipos de depósitos, los que han sido reunidos en siete grupos, debido a su estratigrafía, facies, textura, origen, modo de emplazamiento y finalmente en base a la cronología basada en C14. así tenemos:

#### **4.3.1. GRUPO I:**

Correspondiente al estratocono Moderno del Misti, asignado al Pleistoceno superior (Thouret 1999), conformándolo las siguientes unidades.

1. Derrames de lava andesítica, (50 m de espesor) ubicados en la Qda. San Lázaro.
2. Depósitos de flujos de pómez, escóreas, bloques y cenizas (50 m de espesor) ubicados en el cañón del río Chili.

#### **4.3.2. GRUPO II:**

Corresponde a la base del estratocono moderno del Misti asignado al Pleistoceno superior (Thouret, 1999), con un espesor de 20 a 25 m.

1. Depósitos de colapso de domos de composición andesítica, se le encuentra en la Qda. Huarangal con una extensión de 10 Km.
2. Flujos Piroclásticos Líticos, sobreyacen al depósito anterior (5 a 8 m de espesor)



#### **4.3.3. GRUPO III:**

Secuencia piroclástica reconocida en el pie de monte al Este del volcán Misti, conformada por flujos piroclásticos, cenizas e ignimbritas no consolidadas ( 20 a 30 m de espesor).

#### **4.3.4. GRUPO IV:**

Compuesto por una secuencia de flujos de escóreas y caídas de pómez, tiene un espesor de 10 a 15 m, y cubre los flancos del Chachani al cual se le ha asignado la secuencia Kaki (Navarro 2000), compuesta por capas de lapilli pómez.

#### **4.3.5. GRUPO V:**

Se trata de un conjunto de depósitos de tefras y varios flujos de pómez de composición riodacita a riolítica, así tenemos:

1. Secuencia dacítica y riolítica con un espesor de 10 a 15 cm.
2. Secuencia amarillenta compuesta de flujos piroclásticos de bloques y ceniza.
3. Secuencia rosada compuesta de pómez rosáceo.
4. Derrames de lava andesítica.

#### **4.3.6. GRUPO VI:**

Compuesto por flujos piroclásticos de bloques y ceniza y flujos escoreáceos de tipo Peleano, con un espesor de 20 m. Este grupo esta compuesto por.

1. Flujo piroclástico rico en fragmentos líticos
2. Flujos piroclásticos de bloques y cenizas.
3. Caída piroclástica “gris olivo”
4. Flujo de escóreas.

#### **4.3.7. GRUPO VII:**

Su principal característica son las caídas de pómez, conformado por lapilli, pómez y cenizas, el cual forma un abanico con un área de 20 Km<sup>2</sup> (Thouret 1997), dentro de este grupo se han observado lahares en las riberas de las quebradas Huarangal, San Lázaro y Pastores, así como también en la Pampa El Cural, este grupo lo conforman:

- Depósitos de oleada piroclástica.
- Caídas de pómez
- Depósitos ricos en pómez
- Depósitos de cenizas recientes del Misti (siglo XV)

La cumbre arriba de los 5000 m de altura muestra dos cráteres concéntricos alojados dentro de un cono de lava y escóreas en forma truncada y de media luna. Dentro del viejo cráter de 950 m de ancho cuyas paredes van paralelas a fracturas de dirección N 40° y N 120°, un cráter joven bordeado de escóreas de 550 m de diámetro y de 200 m de profundidad lleva encajonado un domo – plug andesítico donde la actividad fumarólica persiste.

Ambos cráteres y la cumbre están localizados dentro de una caldera de 1.5 Km de diámetro sepultada por depósitos piroclásticos.

### **4.4. GEOLOGÍA LOCAL**

En cuanto a la geología local, se encuentran las siguientes formaciones:

#### **4.4.1. GNEIS CHARCANI**

Es parte de un conjunto denominado Complejo Basal de la Costa. El gneis presenta la característica propia de bandeamiento. Constituido por bandas claras de coloración rosada compuestas por cuarzo y feldespatos potásicos; y por bandas oscuras de coloración verdosa debido al alto contenido de anfíboles y biotita de grano fino a muy fino. Se le encuentra aflorando en las inmediaciones del cañón del Chili, muy cerca a la hidroeléctrica de Charcani

La edad que se le asigna es precambriana, debido a que según su posición estratigráfica se le encuentra subyaciendo a la Formación Torán del Devónico en el valle de Majes. Una muestra de gneis granítico ubicado en las inmediaciones de Tiabaya, dio una edad de  $679 \pm 12$  ma., mediante el método K/Ar (Stewart, 1974).

#### **4.4.2. FORMACIÓN SOCOSANI**

Aunque su afloramiento más representativo está localizado en Socosani (estratotipo), se encuentra una pequeña parte en el cauce del río Chili a 2800 m.s.n.m. Dicha formación está constituida por calizas grises azulinas y lutitas con intercalaciones de areniscas y de sedimentos volcanoclásticos hacia su base. La edad que se le asigna esta basada en los fósiles perteneciente al Jurásico Inferior y Jurásico Medio (Benavides. 1962).

#### **4.4.3. VOLCÁNICO SENCCA**

Son tufos de composición riolítica a dacítica, en el que se distingue a simple vista granos de cuarzo, feldespatos y biotitas. Contiene además algunos fragmentos líticos. Normalmente no son soldados. Las unidades que le conforman son cuatro (Guevara, 1969):

- I Unidad, llamada de base. Esta unidad está compuesta por tufos de colocaciones grises, poco compactos con fragmentos andesíticos y pómez.
- II Unidad. Esta unidad está compuesta también por tufos de colores blanquecinos, son compactos.
- III Unidad. Tufos de color marrón claro, compacto con abundante cuarzo y micas negras.
- IV Unidad. Tufo dacítico, con juntas columnares y en partes está soldado. Se le asigna una edad pliocénica media. Mediante el método radiométrico K/Ar se encontró una edad menor a 2 ma. (Kaneoka y Guevara, 1984).

#### **4.4.4. GRUPO BARROSO**

El grupo denominado Barroso por Mendiola (1965) presenta en nuestra zona de estudio sólo dos de sus tres unidades.

##### **4.4.4.1. VOLCÁNICO CHILA**

Es la unidad inferior del grupo y constituye parte de los basamentos de los volcanes Misti y Chachani (Guevara, 1969). Está constituido por una alternancia de flujos andesíticos de colocaciones gris oscuras, brechas y conglomerados volcánicos. Sobreyace al volcánico Sencca con un espesor de 900 m.

##### **4.4.4.2. VOLCÁNICO BARROSO**

Se le encuentra ampliamente distribuido formando parte de los edificios volcánicos del Misti y Chachani. Está constituido por flujos de lava andesíticos de textura porfírica de color gris oscura y fenocristales de plagioclasa. Sobreyace al volcánico Chila con discordancia erosional y está cubierto por los depósitos piroclásticos recientes como son las tefras.

#### **4.4.5. DEPÓSITOS MORRÉNICOS Y FLUVIOGLACIARES**

Se les encuentra en las partes altas del complejo volcánico Chachani. Estos depósitos están constituidos por bloques y fragmentos de origen volcánico dentro de una matriz areno-arcillosa. La actividad glaciaria no parece haber sido muy importante ya que no se han reconocido circos ni valles glaciares.

#### **4.4.6. DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS**

Estos depósitos se localizan en todo los piedemontes volcánicos, están conformados principalmente por unidades de lapilli pómez, fragmentos líticos, bombas y escorias; intercaladas con capas de caídas de cenizas y suelos. Están ampliamente distribuidos en la parte oriental del Chachani, al norte, al este y al sur del volcán Misti.

#### **4.4.7. DEPÓSITOS "RECIENTES"**

Están conformados por secuencias alternadas de gravas, arenas y limos, intercaladas con materiales coluviales heterogéneos, materiales de terrazas fluviales (cantos redondeados a sub-redondeados).

## **CAPITULO V - EVALUACIÓN DE AMENAZAS VOLCÁNICAS**

La ciudad de Arequipa se halla ubicada en una zona que cuenta de un benigno clima, con un sol radiante casi todo el año y con temperaturas templadas, pero a su vez se encuentra en una zona sísmica y volcánica a la vez, es así que Arequipa a lo largo de su historia ha sufrido muchos desastres naturales, siendo unos más destructivos que otros; por tal motivo la ciudad ha sido destruida en varias ocasiones por sismos de gran magnitud.

En el siglo XV, el Misti erupcionó causando muerte a centenares de personas y dejando en ruinas la ciudad. También en otras oportunidades la ciudad ha sido afectada por inundaciones causando pérdidas de vidas y materiales.

Si tenemos en cuenta el explosivo crecimiento poblacional que crece desordenadamente y hacia áreas marginales altamente peligrosas, como es el caso de los asentamientos humanos (Independencia, Asunción, Miguel Grau entre otros), que van creciendo hacia el volcan Misti; de ocurrir alguno de los desastres naturales antes mencionados, es posible que las pérdidas humanas y/o materiales sea muy grave, como ya ocurrió antes, por tal motivo se ha visto la necesidad de elaborar Mapas de Microzonificación de la ciudad de Arequipa, teniendo en cuenta los diferentes desastres naturales a los que es vulnerable esta, es así que Las Naciones Unidas con la Universidad Nacional de San Agustín se han unido en un convenio a fin de realizar dichos "MAPAS DE MICROZONIFICACION", para delimitar las zonas y dar un uso adecuado del suelo.

Además, la ciudad se ha ampliado dramáticamente contracorriente hacia el Misti. Debido a esto, la población en el área de Arequipa (900,000) y la ciudad vecina de

Chiguata (2,000) están amenazados por lo menos por cuatro tipos de peligros volcánicos.

## **5.1. DESCRICION TEFRO-ESTRATIGRAFIA**

La tefro-estratigrafía elaborada en base a secciones estratigráficas situadas en las quebradas del Misti, además con la fotointerpretación, petrografía, geoquímica y algunas dataciones por Ar-Ar y C14, concluimos que la actividad eruptiva presenta siete grupos de depósitos piroclásticos y autoclásticos que sugieren cuatro tipos de dinamismo explosivo. La mayoría de lavas calco-alcalinas pertenecen a una serie potásica de andesitas y dacitas, mientras que las andesitas básicas y las riolitas son escasas, así tenemos:

- Potentes lujos de lava y flujos de lava en bloques conforman la base del estratocono; se emplazaron a través de largos períodos de efusión de lava y extrusión de domos entre 0.3 y 0.1 Ma. Este grupo está cubierto por una secuencia piroclástica interestratificada con flujos de lava en bloques que han formado la cumbre del cono.
- Brechas monolitológicas, densas y vítreas, canalizadas hasta 10 km valle abajo del cráter, se atribuyen a colapsos de domos-coladas del estratocono.
- Estas brechas están cubiertas por depósitos de flujos piroclásticos ricos en líticos e ignimbritas no soldadas, con depósitos de caída y vulcanoclásticos intercalados, que pueden ser evidencias de las erupciones formadoras de la caldera. Uno de los flujos de pómez tiene una edad  $C_{14}$  de  $47350 \pm 2100/1700$  aproximadamente.
- Depósitos de flujo de escorias, flujo piroclástico rico en líticos y de caída cubren los flancos del extinto estratovolcán Chachani al Oeste, Norte y NE del Misti. Depósitos interestratificados de origen glacial sugieren que a ésta secuencia se le puede asignar al último período glacial y después de 47000 años.

- Depósitos de flujo de cenizas y pómez de composición riolítica pueden reflejar un episodio explosivo que llevó a la formación de una caldera. La parte superior de estos depósitos dio una edad  $C_{14}$  de  $33870 \pm 180011460$  aproximadamente.
- Una secuencia de depósitos de flujos de cenizas y bloques de composición andesítica incluye algunas capas interestratificadas de caída plineana. Estas *nubes ardientes* son testigos del desarrollo y la destrucción de varios domos entre 34,000 y 14,000 años aproximadamente.
- Depósitos de caída de cenizas y lapilli pómez de 4 a 6 m de espesor indican que el Misti ha tenido de 8 a 10 erupciones plineanas a subplineanas en los últimos 14,000 años, a veces acompañadas por oleadas piroclásticas. Los suelos interestratificados, escasos y pobremente desarrollados, sugiere un control climático y períodos relativamente cortos de descanso de la actividad explosiva. La última erupción plineana más fuerte datada entre los años 200 AC (Thouret, 1996) consistió en caída de pómez que fue llevada a Arequipa por los vientos imperantes del Este. Los flujos piroclásticos ricos en pómez se canalizaron dentro de 5 valles radiales hasta los actuales suburbios de Arequipa y Chiguata formando un abanico.

La actividad explosiva en el Misti ha continuado a través de tiempos históricos: dos depósitos de ceniza indican alguna actividad volcánica en 1292-1412 DC y en 1440-1480 DC, éste último es mencionado en narraciones históricas (Chávez Chávez, 1992). La mayoría de los 7 eventos reportados en los siglos XVI y XIX corresponden quizás al incremento de actividad fumarólica. Sin embargo se registró un evento sísmico y freático (?) moderado en 1677 y dos eventos en 1784 y 1787 (Simkin y Siebert, 1994). Desde entonces, en el cráter joven y sobre su *plug* se han observado actividad fumarólica de elevada temperatura ( $100^{\circ}$  -  $120^{\circ}$ C, Parodi, 1987), como en 1948-1949 y 1984-1985.

## 5.2. VULNERABILIDAD, RIESGOS E INESTABILIDAD VOLCANICA

Los análisis de pendientes y las características morfológicas en el Misti, permiten definir áreas que pueden ser desestabilizadas.

- El cono reciente, debido a las fuertes pendientes, puede ser desestabilizado fácilmente en el caso de una reactivación.
- Las características calco-alcalinas y el desarrollo de cripto-domos en caso de reactivación del Misti, pueden generar colapsos por reactivación de las estructuras geológicas antiguas y podrían originar también flujos piroclásticos.
- Los flujos pueden ser canalizados por los valles del lado oeste del volcán y podrían llegar a las urbanizaciones de Arequipa distante a 15 km.
- La parte NW del Misti es también susceptible de inestabilidad. En este sector se han determinado las mayores pendientes del volcán. Las características litológicas: buzamiento concordante de las capas con la pendiente del volcán, alternancia de coladas de lava, cenizas, piroclastos y otros sedimentos vulcano-detríticos poco consolidados.
- Los afloramientos de este sector pueden ser fácilmente erosionados o desestabilizados en el caso de deformaciones en el volcán y también pueden ser acelerados por la continua erosión de las aguas del río Chili que cortan la base volcán.
- Una desestabilización del flanco en este sector podría causar una destrucción de la infraestructura de la Central Hidroeléctrica de Charcani y un corte total de la energía eléctrica de la región; la destrucción y recubrimiento de las carreteras que dan acceso a los centros poblados localizados al NE del Misti y represamiento de las aguas del Chili.
- El río Chili tiene un cauce angosto y puede ser fácilmente cubierto por los productos volcánicos. En el caso de explosión lateral, los flujos piroclásticos, serían canalizados hacia los sectores más bajos, es decir al NW, W y SW; flujos ignimbríticos fueron identificados en esta zona, a 12 km del cráter



(Legros, 1994; Thouret, 1996). En este sector se encuentran también la ciudad de Arequipa que sería seriamente afectada.

- A lo largo del cauce del río Chili podrían provocarse serios riesgos, debido a que todos los recursos hídricos de esta cuenca están destinados al uso poblacional, agricultura e industria. Por otro lado, un embalse del sistema de represas del Chili, acumularía un volumen considerable de aguas que están en las represas: 1) Aguada Blanca, 43 millones de metros cúbicos; 2) La represa de El Frayle, 200 millones de metros cúbicos pero en la actualidad esta capacidad está reducida a 135 Millones de metros cúbicos, (García, 1994).
- Los riesgos ligados a flujos de lodo no parecen muy altos. Por la ausencia de cobertura glacial en el Misti, pues las escasas superficies de nieve son delgadas capas y se desarrollan durante los meses de diciembre a abril. Sin embargo, se debe considerar que la tefra no consolidada de una posible erupción durante los periodos de lluvias, noviembre a febrero, los cauces de los ríos y quebradas transportan importantes cantidades de agua que podrían ocasionar flujos de lodo e inundaciones en la ciudad de Arequipa.

Las deformaciones en los volcanes están relacionadas a: la actividad sísmica, la litología, al grado de cohesión e interestratificación de los productos volcánicos, a las características morfológicas y al basamento sobre el que se desarrolla el edificio (Mcguire, 1996). Las pendientes de estabilidad en los flancos de los volcanes es de alrededor  $35^\circ$  (Mcguire, 1996) y al pasar este límite pueden originarse deslizamientos o colapsos en los flancos. Varios volcanes han producido erupciones laterales debido a colapsos provocados por el desarrollo de criptodomas durante su reactivación y los flujos piroclásticos producidos por las erupciones laterales sobrepasan los 10 km de distancia del volcán (Hoblit and Harmon, 1993; Belousov, A., 1996). La peligrosidad de estas erupciones es muy alta y los daños pueden ser cuantiosos, debido a la presencia de poblaciones e instalaciones, localizadas cerca de volcanes explosivos, como el caso de Arequipa. En este trabajo se desarrolla una técnica, basada en el análisis automático cuantitativo, de un Modelo Digital Topográfico (MDT) construido a

partir de datos topográficos del Misti. Con los análisis de pendientes se identifican las zonas inestables o susceptibles de desestabilización. Los análisis son comparados con las observaciones morfológicas en 9 imágenes de satélite en superposiciones de imágenes sobre los MDT. Bloques tridimensionales generados de los MDT son también utilizados para visualizar y tener una mejor comprensión del problema.

### **5.3. TIPOS DE AMENAZA RECONOCIDAS**

Se han reconocido cuatro tipos de amenaza: a) Caídas de tefras (Caída de cenizas y caídas plineanas o subplineanas de lapilli pómez); b)Flujos piroclásticos; c)Avalancha de escombros d) Flujos de lodo (lahares).

#### **5.3.1. CAÍDAS DE TEFRAS**

Se distinguen dos tipos de caídas de tefras:

##### **5.3.1.1. CAÍDAS DE CENIZAS**

Las erupciones explosivas ocurren cuando el gas se expande súbitamente mientras sale el magma, o cuando el agua superficial o subterránea es vaporizada abruptamente cuando se produce el contacto de magma caliente.

El magma es expulsado en forma de fragmentos líquidos y sólidos (tefras), que, son eyectados hacia arriba desde el cráter para formar una columna o nube de material transportado por el aire, en el cual las partículas más finas son arrastradas por el viento.

Los fragmentos de gran tamaño (balísticas) caen rápidamente en áreas cercanas al volcán como es el caso de la localidad de Chiguata donde se han encontrado bombas volcánicas de hasta 50 cm de diámetro; y los más pequeños caen a mayor distancia, mientras que el polvo fino puede ser transportado por el viento a cientos de metros y escasamente a miles de kilómetros.

En el transcurso de una erupción vulcaniana, las tefras son eyectadas desde la columna eruptiva. Los elementos constituyentes de esta columna son fragmentos de lava arrancados de las paredes del conducto y líticos freatomagmáticos.

Escasamente se observan materiales de baja densidad como pómez, escorias. Precisamente los proyectiles balísticos abandonan el cráter a velocidades que varían de decenas a centenas de metros por segundo. La trayectoria de estos proyectiles balísticos no es afectada por la dinámica de la columna o por el viento, ocasionando pérdida de vidas humanas y daño en las propiedades por impacto.

Una erupción subplinaea producida por el volcán Misti generaría una columna eruptiva que depositaría lapilli pómez y cenizas en distintas direcciones dependiendo de la altura de la columna y de la dirección del viento. Ya que se ha reconocido caídas de 30-50 cm de espesor hacia el suroeste y sureste del Misti. Si se toma en cuenta que el último depósito de lapilli pómez de  $\pm 2000$  años aproximadamente se extiende hacia el suroeste, reconociéndose hasta 3 cm de espesor a más de 30 Km. La ciudad de Arequipa se encuentra hacia esa dirección con respecto al volcán a tan sólo 18 km. Por lo tanto la caída de tefras pueden causar daños en la propiedad y víctimas por impacto de los materiales expelidos. La acumulación de éstas pueden ocasionar que las construcciones colapsen, se dañen líneas de transmisión de energía y comunicaciones; dañar o liquidar la vegetación y animales. La suspensión de partículas de grano fino en el aire ocasionaría problemas de visibilidad y salud, puede estropear maquinaria (motores de combustión interna). El transporte tanto aéreo, ferroviario y de carreteras es vulnerable.

Caídas delgadas (menores de 2 cm) pueden causar graves daños a servicios comunitarios como son hospitales, centrales de generación eléctrica, plantas de bombeo, sistemas de drenaje y plantas de tratamiento de agua.

La ceniza fina puede producir cortocircuitos en las líneas de transmisión de radio y televisión. La oscuridad producida durante el día por las caídas de tefra puede persistir desde horas hasta varios días, pudiendo causar pánico y complicar otros problemas ya existentes. Se debe considerar que la tefra no consolidada es muy peligrosa ya que al caer agua encima en épocas de lluvias fácilmente se convierten en flujos de lodos, ocasionando otros problemas adicionales. Se debe tener en cuenta que las tefras transportan gases ácidos y nocivos.

Basándonos en los mapas de isopacas y el análisis estadístico de vientos de la ceniza del siglo XV. El eje mayor de dispersión de la ceniza del siglo XV alcanza entre 25 y 28 km en dirección SW. De acuerdo a estos datos probablemente cuando la columna supere los 3 km de altura, las direcciones de viento serán predominantemente hacia N y NE, pero en Otoño tienen una dirección NW.

## CONCENTRACIONES DE SO<sub>2</sub> Y PARTICULAS DE SUSPENSION

| Contaminante                    | Tiempo Promedio | Cantidad Aceptable | Criterios de Riesgo |             |            |      |
|---------------------------------|-----------------|--------------------|---------------------|-------------|------------|------|
|                                 |                 |                    | Alerta              | Advertencia | Emergencia | Daño |
| Partículas en suspensión (TPS)* | 24 h            | 350                | 450                 | 625         | 875        | 1000 |
| Dioxido de azufre**             | 24 h            | m <sup>3</sup> 350 | 859                 | 1718        | 2291       | 2863 |
|                                 |                 | ppm 0.12           | 0.3                 | 0.6         | 0.8        | 1    |

Fuente: Organización Mundial de la Salud.

- Microgramos/m<sup>3</sup>
- Microgramos/m<sup>3</sup> y ppm

### 5.3.1.2. CAÍDAS PLINIANAS O SUBPLINIANAS DE LAPILLI - PÓMEZ

Al referirse a una erupción de tipo plineana se entiende un dinamismo eruptivo explosivo con una columna eruptiva sostenida. Este dinamismo es esencialmente un evento muy intenso en el cual un flujo continuo de fragmentos de magma y gas son liberados a través del conducto hacia la atmósfera. Esta descarga es representada por una columna eruptiva que generalmente suele estar comprendida entre 30 Km y 55 Km de altura. Así mismo, los materiales volcánicos expelidos suelen involucrar áreas mayores a 500 km<sup>2</sup> y muestran una fragmentación moderada. Los depósitos asociados a una erupción plineana son: caídas de lapilli pómez, flujos y oleadas piroclásticas. La composición del magma involucrado en esta actividad suele ser riolítico o dacítico. Entre los factores que controlan esta dinámica eruptiva podemos indicar: la forma y el radio del conducto, el contenido de volátiles en el magma, las diferencias de presión y la temperatura (Francis, 1993). Un ejemplo de una erupción plineana en la zona volcánica de los Andes Centrales, fue la ocurrida en el volcán Huaynaputina el 19 y 20 de febrero

de 1600. El área que cubrió el depósito de lapilli pómez bordea los 85000 km<sup>2</sup> y los 8 km<sup>3</sup> de volumen (Thouret, 1997).

Se debe tener en cuenta también que existen otros tipos de actividad eruptiva semejantes a la plineana. Estos son conocidos como: subplineana y ultraplineana. Ambos tipos de actividad generan depósitos semejantes ya que sus mecanismos eruptivos son muy parecidos. Sin embargo difieren los siguientes factores: la dispersión, fragmentación de sus productos, textura, facies de los depósitos, volumen, etc. En una actividad subplineana se podría visualizar una columna eruptiva comprendida entre 10 Km y 30 Km de altura. Cubriendo un área comprendida entre 5 km<sup>2</sup> y 500 km<sup>2</sup> con un porcentaje de fragmentación menos que moderado. El principal factor que controla la altura de la columna y su dispersión posterior es que el magma descargado es menor en estos eventos. Un ejemplo de este tipo de actividad se produjo el 21 de noviembre de 1986 en Japón, donde la columna eruptiva del volcán Oshima alcanzó los 16 Km de altura (Francis, 1993). Así como la columna de ±2000 años aproximadamente del Misti de 21 km. En cuanto a la actividad ultraplineana, se debería visualizar columnas eruptivas mayores a 55 Km de altura. Cubriendo por lo tanto áreas mayores a los 5000 km<sup>2</sup> con una porcentaje de fragmentación mayor que moderado. Por ejemplo la erupción del Lake Taupo (Nueva Zelanda) en el año 186 DC cuyos depósitos cerca a la fuente de origen tienen un espesor de 1.5 m y de 25 cm a 100 Km de distancia donde las pómez tienen un diámetro de 3 cm (Walker, 1980).

De acuerdo al análisis estadístico de dirección de vientos y datos de la última caída de lapilli pómez de alrededor de 2000 años aproximadamente inferimos que: Depósitos de caídas subplineanas pueden llegar hasta una distancia de 23 km alrededor del cráter actual, sobre todo con direcciones de viento hacia el Oeste y SW. Basados en una caída subplineana de alrededor de 2000 años aproximadamente que aflora hasta 22 km al SW, y en su zona distal tiene un espesor de 10 cm.

### 5.3.2. FLUJOS PIROCLÁSTICOS

Al colapsar la columna eruptiva en una actividad plineana se originan depósitos de flujos de pómez o ignimbritas compuestas principalmente por pómez, ceniza y gas. Una de las características de estos flujos es que son controlados topográficamente canalizándose en cauces y depresiones preexistentes debido a su movilidad. Estos flujos pueden alcanzar velocidades de 100 a 300 Km/hora y cubrir áreas comprendidas entre 1 km<sup>2</sup> Y 10000 km<sup>2</sup>. Las amenazas y riesgos asociados se derivan de su alta velocidad, densidad y temperatura; ocasionando asfixias, entierros, incineraciones y severos daños a la propiedad.

Existen varios depósitos en toda la secuencia volcánica estudiada por ejemplo el flujo piroclástico de ±2000 años aproximadamente. Este depósito se encuentra emplazado y canalizado en las quebradas San Lázaro, Huarangal y Agua Salada.

En caso de una probable ocurrencia de estos flujos, los cálculos para conocer la distancia que recorrerán dichos flujos fueron propuestos por Scott (1989) para flujos piroclásticos y por Crandell (1988) para avalanchas de escombros. Ellos han proporcionado valores de coeficientes de relación entre altura o desnivel (H) que existe entre la cima del volcán y el piso del probable valle por donde se canalizará y la distancia (L) a recorrer o recorrida por flujos anteriores. Estos coeficientes ayudan a estimar la extensión de probables flujos piroclásticos y avalanchas, basándose en la distribución de depósitos de flujos piroclásticos preexistentes y en la topografía morfología del volcán. Entonces:

La relación brindada por Scott (1989) es la siguiente:  $f = H/L$

Por lo tanto, el coeficiente de correlación (f) para el flujo de pómez de ±2000 años aproximadamente que alcanzó una distancia máxima es:

Distancia recorrida por los flujos de pómez (L) = 12000 m

Diferencia de altura entre la cima y el piso de la qda. (H) = 3300 m

Entonces:  $f = H/L$

$f = 3300/ 12000 = 0,28$

El coeficiente de correlación (f) para el flujo de pómez de  $\pm 2000$  años aproximadamente que alcanzó una distancia mínima es:

Distancia recorrida por los flujos de pómez (L) = 6000 m

Diferencia de altura entre la cima y el piso de la qda. (H) = 2000 m

Entonces:  $f = H/L$

$$f = 2000 / 6000 = 0,34$$

Por tanto las zonas de mayor amenaza por flujos piroclásticos se localizan con un radio mayor a 6 Km

### **5.3.3. AVALANCHA DE ESCOMBROS**

Desde la erupción del Mount St. Helens en los Estados Unidos en 1980, se ha comprendido que los estrato-volcanes muy elevados, con pendientes muy empinadas y con alteración hidrotermal y/o fracturamiento en algún flanco, están propensos a movimientos en masa influenciado por algún movimiento sísmico, alguna erupción o un crecimiento de un domo (criptodomo como en el Mount St. Helens); que desencadenaran el colapso de un flanco. Este tipo de colapso de flanco constituye una de las mayores amenazas volcánicas, debido a que puede involucrar volúmenes mayores a  $10 \text{ km}^3$  de materiales y desplazarse a velocidades superiores a 100 Km/hora alcanzando distancias superiores a 50 Km desde su fuente. Por ejemplo el Monte Bezymianny (península de Kamchatka, Rusia) en 1956 produjo una avalancha de  $0.8 \text{ km}^3$  pero devastó un área de  $\pm 500 \text{ km}^2$ . El Mount St. Helens (Estados Unidos) en 1980 produjo una avalancha de  $2.7 \text{ km}^3$  y arrasó un área de  $550 \text{ km}^2$ . El volcán Bandai-san (Japón) en 1888 generó una avalancha de  $1.5 \text{ km}^3$  (Francis, 1993).

En el volcán Misti se ha reconocido en el suroeste depósitos de avalanchas de escombros en forma de colinas cónicas conocidas como "hummocks". Así mismo en el valle del río Chili, hacia el flanco noreste del volcán Misti se tiene otros depósitos de avalanchas de escombros. Lo que sugiere que puede volver a ocurrir un evento similar, mas aún si tomamos en cuenta el probable escarpe de falla que atraviesa el flanco oeste del volcán, lo que facilitaría un colapso de dicho flanco.

Por lo tanto se puede utilizar para este tipo de depósitos el coeficiente de correlación de Crandell (1988). Donde la relación  $f=H/L$  corresponde a:

H Altura del edificio volcánico

L Distancia recorrida por las avalanchas

f Coeficiente de correlación

Entonces para los depósitos de avalancha de escombros del piedemonte suroeste del Misti se tiene lo siguiente: una distancia máxima de 14 Km y una distancia mínima de 6 km. Entonces al aplicar la relación  $f = H/L$  se obtiene.

$$L = 14000 \text{ m}$$

$$H = 3000 \text{ m}$$

$$\text{Entonces: } f = H/L$$

$$f = 3000/14000 = 0,21$$

Para una distancia mínima:

$$L = 6000 \text{ m}$$

$$H = 3000 \text{ m}$$

$$\text{Entonces: } f = H/L$$

$$f = 3000/6000 = 0,50$$

Por otro lado Hayashi y Self en 1992, realizaron un estudio comparativo entre flujos piroclásticos y avalanchas de escombros, tras lo cual concluyeron que el coeficiente de correlación para 40 avalanchas de escombros en volcanes calcoalcalinos es 0.22. Entonces si se reemplaza este coeficiente en la relación dada para el volcán Misti se tiene:

$$f=H/L \implies L = H/f$$

$$L=3000/0.22 = 13.63 \text{ Km}$$

Entonces, esa sería la distancia promedio que pueden recorrer las avalanchas de escombros. Por lo tanto se deberá prever una zona de 14 Km al suroeste del



volcán Misti para evacuar a la población en caso de inferir un fenómeno de este tipo, ya que los barrios periféricos de la ciudad resultarían afectados ante un evento de este tipo.

En el caso del Misti este debilitamiento puede ser atribuido a fracturas verticales de rumbo N 120 ubicadas en el flanco W con alineamientos hacia el sur. En caso de producirse una erupción violenta, por inestabilidad, uno de los flancos puede provocar un colapso originando avalancha de escombros.

Probablemente de acuerdo a la estructura del edificio volcánico podría ser hacia el flanco W y podría extenderse el colapso hacia el Sur. Las avalanchas producidas en el flanco W se depositarían en la cuenca del río Chili y posiblemente llegarían hasta las inmediaciones de Arequipa generando desastres en las principales centrales térmicas e hidroeléctricas.

#### **5.3.4. FLUJOS DE LODO**

Un depósito de flujo de lodo está compuesto por una mezcla de escombros de origen volcánico con agua que fluye o que ha sido originada en forma directa o indirecta por la actividad del volcán (McPhie, 1993). Dichos flujos pueden ser producidos de muchas maneras; por ejemplo, por un drenaje de agua de un lago cratérico brechado, mezcla de flujos piroclásticos con agua o el deshielo por fusión de una capa de nieve. El ejemplo típico de la formación de flujos de barro con relación a actividad volcánica se produjo en el Nevado del Ruiz en Colombia, que en el año 1985, causó la muerte de mas de 23 000 personas en la población de Armero, distante 56 Km del volcán hacia el este.

En el volcán Misti es poco probable que se produzca un fenómeno de tal magnitud, debido a que no presenta nieves perpetuas. Sin embargo en periodo de lluvias gran parte del volcán se cubre de nieve y hielo temporal, particularmente los flancos sureste, sur y suroeste. De producirse una actividad eruptiva en este periodo, se liberaran aguas por fusión que ha de mezclarse con el material que incorporará el flujo a su avance. Dichos flujos se canalizaran en las quebradas radiales del volcán y en el río Chili, ocasionando la destrucción de las centrales

hidroeléctricas de Charcani y el sepultamiento de los barrios periféricos asentados en los cauces de las quebradas.

### **5.3.5. FLUJOS DE LAVA**

Son masas de roca fundida que salen de los cráteres o fisuras de los volcanes con temperaturas superiores a los 1000°C las velocidades de avances de los flujos de lava varían considerablemente desde unos pocos metros a cientos de metros por hora para flujos de lava silicios hasta varios kilómetros por hora para flujos de lava basálticos. Dadas sus velocidades bajas rara vez constituyen una amenaza para la vida humana.

El mayor peligro relacionado a flujos de lava representa el daño parcial o la destrucción total por enterramiento, trituración e incendio de todo lo que encuentra a su paso.

Una vez que se han identificado los centros de emisión, actuales o potenciales se puede predecir sus rutas más probables basándose en la topografía circundante.

En el caso del Misti por tratarse las lavas de una composición intermedia (andesita) y de composición ácida (riolita dacita) se ha calculado un radio de acción de 9 km, (según comparación de datos para mapas de riesgos del volcán Sabancaya), las zonas afectadas serian la represa de Aguada Blanca, Hidroeléctrica de Charcani, Escuela de Policías y terrenos de cultivo (L. Macedo, 1994).

### **5.4. FENOMENOS PREMONITORIOS**

Cada volcán se puede comportar de diferentes maneras durante diferentes eventos, pero en general sus erupciones caen dentro de uno u otro patrón distinto identificable de acuerdo con la naturaleza de las erupciones anteriores.

Cuando no se dispone de información más específica, es razonable suponer que las erupciones futuras de cualquier volcán van a ser del mismo tipo que las ocurridas en el pasado, tal como lo revelan el estudio geológico de los depósitos piroclásticos y lávicos.

Sería difícil predecir una erupción, pero una serie de datos premonitorios nos pueden anunciar una intranquilidad en el edificio volcánico. Parámetros físico-químicos nos indican un cambio en los eventos normales del volcán. Pueden producirse los siguientes fenómenos premonitorios:

#### **5.4.1. CAMBIOS "FÍSICOS"**

##### 1. Actividad Sísmica

Aumento en la actividad sísmica local

Ruidos audibles

##### 2. Deformación del edificio

Expansión (inflación) o levantamiento de la superficie del edificio volcánico y deflación.

Cambios en la pendiente del edificio volcánico

##### 3. Fenómenos hidrotermales:

Aumento de caudal en las fuentes termales

Aumento de la descarga de vapor de las fumarolas

Aumento en la temperatura y composición del agua en fuentes termales y en el vapor de las fumarolas

Marchitez de la vegetación en las laderas del volcán.

##### 4. Cambio en el comportamiento de los animales.

#### **5.4.2. CAMBIOS "QUÍMICOS"**

Cuando se produce cambios en la composición química de los gases que se desprenden de las fumarolas (por ejemplo, aumento en el contenido de  $\text{SO}_2$  ó  $\text{H}_2\text{O}$ )

## **CAPITULO VI - MEDIDAS PREVENTIVAS A TOMAR EN CASO DE UNA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN EL MISTI**

### **6.1. TIPOS DE ERUPCIÓN**

La emisión de material rocoso y gases a alta temperatura es lo que se denomina una erupción volcánica. Cuando ésta es el resultado directo de la acción del magma o de gas magmático, se tiene una erupción magmática. Las erupciones pueden resultar también como efecto del resultado también como efecto del calentamiento de cuerpos de agua por magma o gases magmáticos. Cuando el cuerpo de agua es un acuífero subterráneo, la erupción generada por el sobrecalentamiento de este por efectos magmáticos, se denomina erupción freática. Este tipo de erupciones generalmente expulsa fragmentos de roca sólida "vieja" , producidos por las explosiones de vapor. En algunos casos, este tipo de erupciones pueden emitir también productos magmáticos mezclados con los de la erupción de vapor. Si este es el caso, la erupción se denomina freatomagmática.

#### **6.1.1. ERUPCIÓN EFUSIVA**

Erupción volcánica relativamente silenciosa que expulsa lava basáltica a la velocidad con la que una persona camina. La lava tiene una naturaleza fluida. La erupciones del volcán Kilauea de la isla de Hawaii son de este tipo.

#### **6.1.2. ERUPCIÓN EXPLOSIVA**

Dramática erupción volcánica que lanza por el aire material que llega a cientos de millas de distancia. La lava es baja en silicatos y puede ser muy peligrosa para la gente que se acerque. Un ejemplo es el Monte St. Helens en 1980.

#### **6.1.3. ERUPCIÓN FREÁTICA**

Erupción volcánica o explosión de vapor, barro u otro material que no está incandescente; esta forma de erupción está motivada por el calentamiento y

consiguiente expansión del agua contenida en el suelo debido a la cercanía de un fuente ígnea de calor.

## **6.2. VIGILANCIA VOLCÁNICA**

Los trabajos de vigilancia volcánica por parte del personal del IGP aplicando sistemas de vigilancia con instrumentos que aporten datos significativos antes, durante y después de la erupción.

## **6.3. VIGILANCIA SÍSMICA**

La ocurrencia de sismos superficiales frecuentes en el interior de un volcán es uno de los primeros precursores, más comunes y más fácil de detectar en una actividad que precede a una erupción. El número de sismos diarios con sus respectivas magnitudes indica la tasa de liberación de energía, la cual es un indicador de la cantidad de magma que esta haciendo presión sobre las fracturas en su camino hacia la superficie. Un cambio en el patrón de las ondas sísmicas o una disminución progresiva en las profundidades focales, pueden indicar que el magma se está aproximando a la superficie.

Existen varios tipos de temblores, los cuales se distinguen en los sismogramas, y que corresponden al fracturamiento de rocas, movimiento subterráneo del magma. La sucesión más común es que los sismos de fractura son acompañados progresivamente por eventos explosivos y finalmente por prolongados periodos de tremor armónico previos al comienzo de una erupción.

Para el monitoreo en el caso del Misti, se ha colocado una estación sísmica "telemétrica" (hacia el IGP en Cayma) de tres componentes, de banda ancha con un rango de 1 - 20 Hertz. La estación funciona desde el 15 de Noviembre de 1998 a: 16° 18' 18.77 de latitud sur, 71° 21' 55.86 de longitud oeste y a una altitud de 4468.7 m.s.n.m. Esta estación ha registrado eventos sísmicos de alta y baja frecuencia de periodo largo. En la oficina IGP-Arequipa-Cayma se utiliza un programa denominado SISMALP de Julien Fréchet et Francois Thouvenot (IRIGM, Grendle, Francia), para el procesamiento de datos.

## **6.4. MEDIDAS DE DEFORMACIONES**

Cuando el magma empuja hacia arriba en el interior de un volcán, se espera que cause algún levantamiento o inflación y deflación del edificio volcánico y en sus alrededores inmediatos. Sin embargo, los movimientos verticales asociados con erupciones son, en general, mucho más pequeños y pueden ser detectados sólo con medidas de alta precisión (microradianes). Se han desarrollado varias técnicas para medir deformaciones muy leves del suelo tanto verticales como horizontales.

Medidas de deformación utilizando equipos de Sistema de Posicionamiento Global (G.P.S.) y niveles de alta precisión permiten conocer la deformación en el edificio volcánico (Tilling, 1989).

En el caso del Misti se está utilizando este método con un G.P.S. modelo 4000 Receiver Reference de marca Trimble obteniendo información cada 10 seg. Este G.P.S. está colocado en la estación sísmica.

## **6.5. VIGILANCIA VISUAL DE LA ACTIVA FUMARÓLICA**

Las fumarolas emitidas por el Misti fueron muestreadas por Francesco Sortino para conocer el contenido químico de ellas y estas se encuentran en proceso de análisis en Italia.

## **6.6. PRECAUCIONES PARA AFRONTAR LAS ERUPCIONES VOLCANICAS**

### **6.6.1. TIPOS DE ALERTA**

#### **6.5.1.1. ALERTA VERDE**

Este color de alerta es utilizado para las zonas no susceptibles es decir a las zonas que no corren peligro.

#### **6.6.1.2. ALERTA AMARILLA**

Es utilizada para las zonas aledañas al volcán, cuando el volcán no se encuentra en actividad eruptiva propiamente dicha ya que solo ha manifestado fumarolas sin presencia de tefras ni gases nocivos, no hay actividad sísmica local. La erupción es del tipo freática.

#### **6.6.1.3. ALERTA NARANJA**

Se indica la alerta naranja cuando se inicia la erupción esto se determina cuando la presión de los gases libre aumenta para forzar un camino a través de las rocas, entonces el volcán presenta fumarolas con tefras, deformación del aparato volcánico, aumento en la temperatura de fumarolas y fuentes termales, marchites de la vegetación, actividad sísmica local con sismos de 2 a 4 grados en la escala de Richter, movimientos de fluidos en la cámara magmática, ruidos perceptibles, al indicarse la alerta naranja estamos en una situación de riesgo ya que la erupción freatomagmática puede presentarse en cualquier momento, las autoridades deben estar alertas para dar la voz de alerta para que se realice la evacuación de la población que se encuentra en las zonas en peligro (cercañas al volcán, quebradas, entre otros) ya que se puede dar la alerta roja en cualquier momento.

#### **6.6.1.4. ALERTA ROJA**

La alerta roja se indica cuando la erupción es eminente y es muy peligroso permanecer en las zonas de riesgo que ya están delimitadas en las cartas de riesgo, en este estado de alerta el volcán puede arrojar flujos de lava, flujos piroclásticos, gases venenosos, se pueden producir flujos de lodo, avalanchas entre otros, intensa actividad sísmica ya que la erupción es de tipo magmático. El área cercana la volcán queda totalmente destruida.

### **6.6.2. ANTES DE LA ERUPCIÓN**

- Las erupciones volcánicas se pueden predecir con la anticipación suficiente, para que las personas tomen medidas de seguridad, por lo tanto, no deben perder la calma y mantenerse informado sobre el desarrollo del fenómeno.

- No de crédito a versiones o comentarios de personas no autorizadas. Hay mucha tendencia a la exageración por periodistas o personas sensacionalistas que tienden a distorsionar las noticias.
- Crea únicamente en las informaciones del personal científico y de las autoridades oficiales.
- Si tiene depósitos de agua, cúbralos adecuadamente para que no se contaminen.
- Tape con cinta adhesiva las rendijas de ventanas y puertas, para evitar la filtración de ceniza a las habitaciones.
- En las zonas más cercanas al volcán, eventualmente pueden caer piedras que podrían provocar la ruptura de los vidrios. Por esta misma razón, los cuartos interiores son los más seguros para permanecer o pernoctar en ellos.
- Si las transmisiones radiales no se interrumpen, manténgase informado de las disposiciones del comité de emergencia y de los técnicos vulcanólogos.
- Si los científicos anuncian la inminencia de la erupción: ALERTA ROJA, y si usted vive en una zona de alto riesgo, usted y su familia deben evacuar. Hágalo con calma, porque tendrá el tiempo suficiente. La desesperación y desorganización congestionan las vías y pueden producirse embotellamientos y accidentes.
- Aléjese también de los valles y quebradas cercanos al volcán, en previsión de posibles flujos de lodo.
- Si va a abandonar su domicilio o su negocio, déjelos con todas las seguridades posibles, porque las condiciones son muy propicias para asaltos.

### **ARTÍCULOS QUE SE DEBE MANTENER EN RESERVA**

- Suficiente cantidad de agua potable.
- Alimentos no perecibles y enlatados para aproximadamente ocho días.



- Maletín de primeros auxilios. Ponga especial cuidado a los medicamentos para problemas bronquiales y respiratorios, use colirios o agua de manzanilla.
- Mascarillas para respirar.
- Filtros para agua.
- Vajilla desechable.
- Linternas
- Velas

### **6.6.3. DURANTE LA ERUPCIÓN**

- Cuando la erupción se inicie, no se desespere por llegar a su hogar, abandonar la ciudad, etc., ya que la caída de materiales no será inmediata. Mantenga la calma, el pánico y la desorganización, en muchos casos causan más problemas y accidentes que el fenómeno mismo.
- Reúnase con su familia para permanecer en un sitio seguro, dando especial atención a los niños, personas de la tercera edad y personas delicadas de salud, quienes son las más vulnerables en momentos de emergencia o de pánico.
- Mientras se desarrolla la erupción, manténgase bajo techo y salga solo cuando la atmósfera se muestre lo suficientemente limpia.
- Para respirar, use mascarillas. También puede usar toallas o paños humedecidos en agua o vinagre.
- Las personas que padecen de afecciones bronquiales o asmáticas, deben ser evacuadas antes de la erupción.
- Si el ambiente en el que se encuentra se ha contaminado, proteja también sus ojos y sus oídos.
- Ahorre agua en la mayor cantidad posible, ya que la escasez puede ser prolongada.

- Si la caída de ceniza es abundante, no conduzca un vehículo. La oscuridad puede ser tan acentuada, que ni siquiera con luces intensas se tiene visibilidad, a lo que se suma la ofuscación de los conductores y transeúntes, ambiente propicio para que ocurran graves accidentes.
- Si la caída de ceniza se prolonga, cada vez que las condiciones lo permitan, procure limpiar los techos, para evitar que se colapsen, especialmente si hay lluvia, pues el agua aumenta el peso de la ceniza.
- En condominios y multifamiliares, los vecinos deben organizarse para tomar las medidas de prevención antes de la erupción y, durante la erupción, ayudarse mutuamente, ahorrar agua, etc.
- Los lugares donde se encuentran calefones, o cocinas a gas deben permanecer bien aireados. Estos generan gases que pueden causar inclusive la muerte de quienes habitan el inmueble cerrado. Si ha de cerrar bien su casa, incluidos estos lugares, debe asegurarse de no usar y cerrar estos artefactos al paso del gas mientras permanezca cerrada la casa.
- Si es necesario realizar una evacuación, deben tenerse en cuenta las siguientes recomendaciones:
  - Conocer de antemano las rutas más seguras para la evacuación.
  - Tener un inventario de los lugares donde se puede albergar a los damnificados. Identificar puntos de reunión para personas que esperan ser evacuadas.
  - Seguridades y abastecimientos para las áreas de concentración de los evacuados. Organización policial para dirigir el tránsito durante la evacuación.
  - Respeto a las disposiciones de tránsito durante la evacuación (y siempre).

#### **6.6.4. DESPUÉS DE LA ERUPCIÓN**

- Continúe por algún tiempo con las precauciones para sus vías respiratorias y la vista Manténgase informado hasta que las autoridades anuncien que la actividad del volcán ha cesado.

- Siga las recomendaciones para el restablecimiento de la normalidad.
- Si se percata de la obstrucción de alcantarillas, o del represamiento de quebradas o ríos, aléjese de esos lugares e inmediatamente comuníquelo a las autoridades pertinentes.
- Si la vivienda está en una zona de riesgo de flujos de lodo, lo conveniente es evacuarla, retirándose a lugares altos. A este respecto infórmese en el "Mapa de Peligros Volcánicos..Potenciales Asociados con el Volcán Guagua Pichincha", del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional y Mapa de Peligros Volcánicos Potenciales Asociados con el Volcán Tungurahua".
- También en el caso anterior, es conveniente reforzar puertas, ventanas bajas, paredes vulnerables, etc., a fin de evitar la penetración del lodo en las construcciones.
- No regrese a la zona del desastre, hasta que los riesgos hayan desaparecido.

## **CAPITULO VII – MICROZONIFICACION DE LA CIUDAD AREQUIPA**

### **7.1. VULNERABILIDAD Y POBLACION**

Los desastres naturales son el resultado lamentable de la acción de fenómenos naturales peligrosos sobre poblaciones vulnerables. Por tanto, tan importante es estudiar, conocer, y monitorear los llamados peligros naturales, como estudiar, conocer y monitorear lo que sucede con la vulnerabilidad de nuestra población.

La vulnerabilidad en peligros naturales es consecuencia de las precarias e inadecuadas condiciones de vida en que se encuentran millones de pobres, sobretodo, en los países subdesarrollados.

La pobreza es una condición social que conlleva la carencia o insuficiencia de ingreso económico, y a su vez la falta o el difícil acceso a los recursos, bienes y servicios que existen en la sociedad para lograr bienestar.

En nuestro país la vulnerabilidad frente a fenómenos de la naturaleza ha venido creciendo en las áreas urbanas alcanzado niveles críticos en algunas ciudades. Adopta principalmente dos modalidades:

## **7.2. DETERIORO DE LAS EDIFICACIONES Y TUGURIZACION EN ÁREAS ESPECIFICAS**

Esto debido a la concentración excesiva de actividades económicas y servicios, generando una concentración de la población y una sobre demanda de vivienda en dichas áreas. Este proceso ha llevado al sobre uso de la infraestructura física, densificación alta y hacinamiento.

Ocupación de áreas periféricas que no son aptas para vivienda, no sólo por razones de seguridad, sino porque resulta caro y muy difícil invertir en la habilitación y en la construcción de los servicios básicos y otras obras urbanas.

Generalmente, la vulnerabilidad urbana se ha venido produciendo conforme avanza el proceso de urbanización en el país y se ha visto agravada por la migración interna debida a procesos de descapitalización y ruptura de los patrones tradicionales de propiedad y de producción en las zonas rurales.

Este proceso tiene las siguientes características:

- a. La pobreza en el campo obliga a la migración masiva hacia la ciudad, buscando encontrar nuevas oportunidades de trabajo y de mejorar sus condiciones de vida, pero en realidad estos contingentes de migrantes terminan trabajando mayormente en el comercio ambulatorio, o como trabajadores eventuales en actividades terciarias como transporte público, servicios, etc.. Dada su precaria economía, los migrantes se apoyan en programas de ayuda social, como los comedores populares, clubes de madres, etc. y participan de diversas estrategias de sobre vivencia.
- b. Como consecuencia de lo anterior, se producen ocupaciones espontáneas, anárquicas y muchas veces violentas del suelo urbano, dando lugar a nuevos asentamientos irregulares en condiciones de alto riesgo, debido a que generalmente se localizan en los espacios sobrantes, sin valor comercial, como

son los rellenos sanitarios, las laderas escarpadas y deleznable de los cerros, el borde de los ríos, las áreas de inundación de los ríos y quebradas. En tales condiciones, esas viviendas resultan dañadas o arrasadas por inundaciones, huaycos, o por terremotos.

- c. Estos sectores sociales no hacen uso de las técnicas constructivas ni de los procedimientos regulares legales, pues les resulta muy costoso y burocrático, optando por la autoconstrucción de sus viviendas, con los materiales disponibles y de acuerdo a su criterio. Muchas veces, sin contemplar las nuevas condiciones de clima, geografía y exigencias de la urbe, los migrantes reproducen la formas constructivas del campo, o mezclan elementos constructivos que no conjugan apropiadamente desde el punto de vista de la seguridad. Como resultado de la precariedad económica y legal tenemos: ya sea, viviendas construidas de materiales de desecho o descartables (cartón, estera, latas, etc.), viviendas de adobe tradicional sin elementos de refuerzo, o incluso viviendas de ladrillo, aparentemente resistentes pero con errores técnicos que debilitan la estructura. Todas ellas expuestas a ser dañadas por terremotos, inundaciones o erupciones volcánicas en el caso de Arequipa.

Sin embargo no podemos eximir de responsabilidad a las autoridades políticas y a los funcionarios de los municipios, de la creciente acumulación de vulnerabilidad en los asentamientos pobres de la ciudad, por no haber previsto y atendido a tiempo las crecientes demandas de vivienda de este sector social, y porque no han podido dirigir el crecimiento urbano de una manera racional y ordenada. Por ejemplo, en algunas localidades no existe ningún lineamiento ni orientación sobre del crecimiento urbano, en aquellos lugares donde sí hay planes urbanos, existen aún deficiencias e irregularidades en el manejo de los cambios de uso del suelo, de las licencias de construcción, etc., por parte de los funcionarios locales. Por otro lado, gran parte de los planes que existen no están basados en rigurosas evaluaciones geológicas y geotécnicas de los suelos, o carecen de una zonificación de los riesgos.

### **7.3. VULNERABILIDAD Y DESARROLLO**

La vulnerabilidad descrita, es evidentemente un déficit del desarrollo o mejor, es producto de este "tipo de desarrollo" que tenemos, si así puede llamarse.

En realidad, la ocurrencia de un desastre, cualquiera sea su denominación: natural, tecnológico, ecológico o ambiental, es la mejor prueba de que el desarrollo alcanzado aún presenta fallas.

En otras palabras, si el desarrollo resulta afectado y cuestionado periódicamente por los desastres que ocurren, entonces cabe preguntarnos ¿qué cambios tendríamos que hacer en el modelo de desarrollo?

La prevención de desastres exige enfocar el desarrollo con criterios de seguridad para el futuro, lo cual supone reducir la vulnerabilidad integralmente y simultáneamente, trabajar para reducir o eliminar los peligros naturales, tecnológicos, biológicos, etc.

Para finalizar esta parte es necesario agregar que el desarrollo será sostenido y seguro si se sustenta en un adecuado manejo de los recursos naturales, en la preservación del medio ambiente y de la ecología, si logra resolver el problema de la pobreza y si construimos nuestro hábitat en concordancia con el medio natural. El desarrollo debe pensarse para asegurar la sobre vivencia de las generaciones actuales y de las futuras.

### **7.4. MANEJO INTEGRAL DE LOS DESASTRES**

En realidad poco es lo que podemos hacer para evitar que se produzcan peligros naturales como terremotos, inundaciones, erupciones volcánicas, etc., o para mitigar su energía. Sin embargo, está en nuestras manos construir un hábitat más seguro, que tome en cuenta los peligros y que minimice el nivel de exposición frente a ellos.

#### **7.4.1. IMPORTANCIA DE LA PARTICIPACION DE LA POBLACION**

Hay la creencia equivocada que un estudio de riesgo es un asunto ingenieril. En realidad, un estudio de riesgo hay que manejarlo integralmente con participación multidisciplinaria.

Otro error aún vigente es pensar que un estudio de riesgo es un asunto de profesionales especialistas, donde la población no tiene nada que hacer. Esta concepción parte de un prejuicio en el sentido que la población es ignorante, no tiene conocimientos y por tanto nada que aportar.

El tiempo y la experiencia han permitido valorar cada vez más la participación ciudadana (como ahora se llama), en diversos campos de la vida. Tanto para lanzar un nuevo producto al mercado, como para tomar una decisión política importante, se sondea la opinión de la gente. Pero la mejor ganancia se obtiene cuando la población participa de una manera activa y lo más directa posible.

En el mundo moderno se está estudiando y ensayando nuevas formas de participación de la sociedad civil en la formulación de propuestas que puedan traducirse en políticas.

En realidad no hay motivo para que los profesionales obviemos a los beneficiarios en la elaboración de los planes urbanos, en la formulación de leyes y reglamentos, en los diseños de las casas, en el diseño de proyectos, etc.. En realidad, si nos proponemos siempre encontraremos formas o mecanismos de lograr su participación.

#### **7.4.2. CONSECUENCIAS DE LA NO PARTICIPACION DE LA POBLACION**

Algunas consecuencias funestas de haber marginado la participación de la población beneficiaria en los asuntos de interés público han sido:

- a) Obras de gran valor que están abandonadas, como elefantes blancos, sin ser usadas por los beneficiarios, ej. reservorios para agua, infraestructura de riego, etc.
- b) Obras que son usadas irresponsablemente, al poco tiempo se malogran, nadie asume su protección y seguridad, ni tampoco su mantenimiento, En consecuencia se deterioran y colapsan.

- c) Planes de desarrollo urbano que son buenas intenciones y utópicos deseos de los planificadores, pero que no son conocidos ni tomados en cuenta por los usuarios para la toma de sus decisiones.

Esto nos indica que debemos considerar que la población tiene sus prioridades, sus formas de hacer las cosas que forman parte de lo que llamamos cultura. Es clave conocer las características culturales para un ejercicio acertado de la profesión. Es posible que así nuestras propuestas técnicas tengan más sentido para la gente y por tanto sean mejor apreciadas.

Tendríamos que considerar también que las obras, así como los bienes, si no son propiedad de la gente, ésta no las valora ni las cuida. Consideras que una obra es parte tuya, te pertenece, cuando has contribuido a producirla.

## **7.5. LA POBLACIÓN PUEDE PARTICIPAR EN LOS ESTUDIOS DE RIESGO LOCALES**

El estudio debe centrarse en la vulnerabilidad que presenta el área, referida ésta no sólo a los elementos físicos, expuestos a peligro, sino al sistema social en funcionamiento, es decir al conjunto de personas realizando acciones diversas (actividades económicas, sociales, de vivienda, etc.). No olvidar que la vulnerabilidad física que presentan las edificaciones o la infraestructura es expresión de los procesos sociales que están en marcha. De allí también que la vulnerabilidad no es algo estático sino cambiante, muy dinámico.

Tanto al estudiar el peligro como al estudiar la vulnerabilidad, resulta muy útil la participación de la gente. Los que habitantes del área bajo estudio tienen por lo general información valiosa sobre los peligros naturales ocurridos, su periodo de recurrencia, la magnitud que tuvieron en el pasado, las áreas que mayormente fueron afectadas, etc. También son portadores de las vivencias y conocimientos acerca de la historia del pueblo, el proceso de expansión urbana, los problemas actuales organizativos, de participación, las potencialidades locales, etc.

Finalmente con los pobladores también se puede discutir las diferentes alternativas para afrontar la vulnerabilidad local y mitigar el riesgo, en la perspectiva de definir la mejor alternativa, desde el punto de vista social,



económico y político. Incluso se puede discutir con la gente las prioridades de inversión y el tipo de participación que están dispuestos a tener en la ejecución de las acciones y obras que el estudio recomendará.

El doble objetivo que se persigue con esto es que el estudio sea más cercano a la realidad y las propuestas más factibles de realizar. De otro lado, también se logra que la población local se apropie del estudio, lo cual será garantía de que se realizará y cuidará.

Un estudio realizado con participación de los beneficiarios, una vez que está terminado y aprobado, se convierte en ley, es respetado y defendido. No sucede lo mismo con aquel otro plan o estudio, donde no se conoce el contenido ni procedimiento que se siguió para elaborarlo.

## **7.6. LA NATURALEZA DE LA AMENAZA VOLCÁNICA**

Las erupciones volcánicas son entre los fenómenos naturales los más temidos y respetados. Abundan mitos, leyendas y crónicas como testimonio de su poder destructivo, y el registro geológico muestra que los procesos volcánicos han sido muy importantes a través de la historia de la Tierra. Estos procesos continúan en la actualidad, a menudo con profundos efectos sobre los bienes, la vida humana y su actividad.

En la figura adjunta se presenta la distribución de los volcanes en el mundo. Más de 500 de ellos estuvieron activos en épocas históricas. Pero hay muchos cientos de otros, ahora inactivos, que muestran evidencias de actividad eruptiva en el pasado prehistórico cercano. Algunos indudablemente harán erupción de nuevo; han ocurrido erupciones en volcanes que anteriormente se creían extintos. Además, de vez en cuando se forman volcanes completamente nuevos en las zonas volcánicas.

Al material fundido que se encuentra en la corteza terrestre se le llama magma. Esta es una mezcla compleja de silicatos que contienen gases disueltos y a veces minerales cristalizados en suspensión. Cuando este material se desplaza hacia la superficie, la presión confinante disminuye y permite que los gases disueltos

hagan efervescencia, empujando el magma hacia arriba a través del conducto volcánico. El grado de violencia de la erupción es determinado principalmente por la cantidad y tasa de efervescencia de los gases y por la viscosidad del magma mismo.

Las erupciones varían ampliamente en magnitud y duración, no sólo de un volcán a otro sino también en el mismo volcán. La frecuencia de las erupciones también es variable, desde volcanes que están casi en continua erupción hasta aquellos que entran en actividad en intervalos de cientos o aun miles de años.

En general, los volcanes de las grandes dorsales (incluidas la Medio Atlántica y la de África oriental o islas medio-oceánicas (tales como Hawai) producen lava de baja viscosidad que fluye fácilmente y puede esparcirse sobre grandes áreas, bien sea como láminas amplias o como coladas estrechas de considerable longitud. En contraste, los volcanes de las grandes zonas de subducción localizadas alrededor de algunos bordes de continentes, como es el caso del Misti; en su mayoría emiten lavas de alta viscosidad que tienden a sobreponerse unas a otras para formar domos, o flujos relativamente cortos pero espesos. Además, la alta viscosidad del magma en este tipo de volcán permite que se acumulen altas presiones de gas, de tal manera que cuando estas son finalmente liberadas, el gas se expande de manera explosiva y arrastra grandes cantidades de lava fundida o sólida en suspensión. Se observan todos los tipos de erupción, desde la apaciblemente efusiva hasta la violentamente explosiva, dependiendo principalmente de la composición del magma y su contenido de gas.

Los volcanes afectan a las vidas de las personas en sentido tanto positivo como negativo. Cualquier erupción volcánica, sea cual fuere su grado de violencia, puede ser peligrosa para las personas que se hallan en sus cercanías. Sin embargo, durante sus períodos de inactividad, los volcanes atraen a las comunidades debido a la fertilidad de los suelos volcánicos y a la espectacular belleza de su paisaje. Tal como ocurrió después de la erupción del Misti en 1440. Por lo tanto, gran número de personas y enormes inversiones económicas corren riesgos cuando ocurre una erupción.

La mayoría de las erupciones están precedidas por signos premonitorios, los cuales, si son reconocidos y atendidos, pueden avisar con tiempo los eventos inminentes. No obstante, estos signos pueden ser sutiles o complejos, y que requieran de un estudio detallado y cuidadoso antes de que sean interpretados correctamente. Algunas de las mayores catástrofes de la historia han sido causadas por erupciones cuyos primeros indicios fueron desconocidos, ignorados o mal interpretados.

No se puede abandonar o prevenir todo asentamiento en las áreas sujetas a amenazas volcánicas; lo importante es aprender a vivir con estos riesgos de la manera más segura posible. Para ello, es esencial conocer la historia propia de cada volcán, (capítulo III). la frecuencia y carácter de sus erupciones y comprender los procesos que las preceden.

Los principales productos de las erupciones volcánicas pueden agruparse en varias categorías según el tipo de material eyectado y su medio de transporte desde el cráter al sitio de depósito. Estos son: caídas de cenizas, flujos piroclásticos, flujos de lava y emisiones de gas.

Otros fenómenos peligrosos asociados con erupciones volcánicas son: agrietamiento del suelo, subsidencia (súbita o gradual), avalanchas de escombros, flujos de lodo («lahares »), fusión de glaciares, terremotos volcánicos y maremotos. Los sismos volcánicos que frecuentemente preceden o acompañan a las erupciones, casi nunca alcanzan magnitudes o intensidades que causen daños severos. El hambre ha hecho estragos algunas veces como consecuencia de la destrucción de cosechas por caídas de cenizas o la muerte de animales debido a gases o depósitos tóxicos.

## **7.7. EVALUACIÓN Y PREDICCIÓN DE LA PELIGROSIDAD**

Para la planificación a largo plazo de los asentamientos humanos y de las inversiones en áreas volcánicas, es necesario, y de hecho indispensable, tener algún conocimiento del riesgo volcánico, es decir, la posibilidad de que un área en particular pueda ser afectada por uno o más fenómenos destructivos de los descritos anteriormente.

Tal conocimiento se obtiene mediante estudios geológicos sobre los antecedentes de cada volcán. Cada erupción deja sus propias huellas en forma de capas de lava, depósitos estratificados de cenizas y escoria, etc., que pueden ser expresados en un mapa. Cada depósito se puede relacionar con un tipo particular de erupción, y en algunos casos su edad se puede determinar con gran precisión. La frecuencia de las erupciones pasadas y la extensión de las zonas devastadas por ellas pueden ser reconstruidas de esta manera.

Se pueden entonces preparar mapas de zonas peligrosas que muestren las áreas en las cuales existen riesgos para la vida y los bienes alrededor de cada volcán, y pudiendo estimarse la probabilidad de que un área en particular sea afectada por una erupción en un período de tiempo dado. Por tal motivo se ha preparado mapas de riesgo para los diferentes elementos arrojados por el Misti en erupciones pasadas, de tal manera que nos sirva de guía para una posible erupción teniendo en cuenta su comportamiento pasado de tal forma que se llegue a predecir la magnitud, tiempo de iniciación y duración de un fenómeno futuro, y además el área que va a ser afectada.

Como se vio en el anteriormente, hay distintos productos en las erupciones volcánicas: flujos y oleadas piroclásticas, flujos de lodo, caídas de ceniza, flujos de lava, etc. Durante una erupción no se observan todos estos fenómenos. Cada volcán se puede comportar de distinta manera en diferentes eventos, pero en general sus erupciones caen dentro de uno u otro patrón distinto identificable de acuerdo con la naturaleza de erupciones anteriores. Cuando no se dispone de información más específica, es razonable suponer que las erupciones futuras de cualquier volcán van a ser del mismo tipo que las ocurridas en el pasado, tal como lo revelan los estudios geológicos de los depósitos producidos por ellas.

Como se podría esperar, un fenómeno de la magnitud y violencia de una erupción volcánica no ocurre espontáneamente, sino que es la manifestación final de un proceso que se ha estado dando por un largo período de tiempo dentro de la corteza terrestre: el ascenso del magma a la superficie. Este proceso tiene ciertos efectos químicos y físicos en la corteza que pueden ser detectados por las

técnicas apropiadas, y que aunque ellos mismos no son causa directa o inmediata de una erupción, pueden sin embargo servir de indicadores de que el proceso que conduce a una erupción se está llevando a cabo. Detectando y midiendo estos efectos premonitorios, descubriendo las relaciones entre su ocurrencia y la posterior ocurrencia de una erupción en un volcán determinado, es posible establecer métodos empíricos para predecir erupciones.

### **7.7.1. FENÓMENOS PREMONITORES**

Antes de las erupciones se han observado en las cercanías de los volcanes algunos fenómenos físicos y químicos tales como:

*a) Actividad sísmica:*

Aumento en la actividad sísmica local;

Ruidos audibles

*b) Deformación del suelo:*

Expansión o levantamiento del edificio volcánico; Cambios en la pendiente del suelo cerca del volcán.

*c) Fenómenos hidrotermales:*

Aumento de caudal en las fuentes termales;

Aumento de la descarga de vapor de las fumarolas;

Aumento en la temperatura del agua en fuentes termales y en el vapor de las fumarolas;

Aumento de temperatura en los lagos de cráter; si lo tuviese,

Fusión de hielo o nieve en el volcán;

Marchites de la vegetación en las laderas del volcán.

*d) Cambios químicos:*

Cambios en la composición química de los gases que se desprenden de las fumarolas (por ejemplo, aumento en el contenido de  $\text{SO}_2$  o  $\text{H}_2\text{S}$ ).

Todos los fenómenos anteriormente enunciados se han observado en un momento u otro antes de erupciones individuales. Desafortunadamente para efectos de predicción, tales fenómenos no han ocurrido *siempre* antes de las erupciones, ni han ocurrido erupciones cada vez que han sido observados. Por consiguiente, no se conoce todavía ningún indicador perfectamente seguro de una erupción inminente. Sin embargo, la detección de tales posibles precursores es valiosa, porque permite estimar la probabilidad de que ocurra una erupción, por comparación con experiencias pasadas, y de esta manera formular predicciones del tipo descrito en la sección anterior.

### **7.7.2. ACTIVIDAD SÍSMICA**

La ocurrencia de sismos superficiales frecuentes en el interior de un volcán es uno de los primeros precursores, más comunes y más fácilmente detestables de una erupción. Entonces, la manera más elemental para un monitoreo continuo, es la de mantener un solo sismógrafo en el volcán, o tan cerca como sea posible. La señal de este instrumento debe ser transmitida a un registrador (generalmente a través de una señal de radio), el cual puede ser observado varias veces al día por una persona competente. Es aconsejable también adaptarle un sistema de alarma nocturno que sea disparado por sismos anormalmente fuertes o frecuentes. La presencia de un sismógrafo es suficiente para detectar el comienzo de una actividad sísmica anormal. Tan pronto como ésta ocurra, es necesario instalar una red de por lo menos cuatro sismógrafos alrededor del volcán con el fin de determinar el punto de origen y la magnitud de cada sismo local. El número de sismos diarios con sus respectivas magnitudes indica la tasa de liberación de energía, la cual es un indicador de la cantidad de magma que está haciendo presión sobre las fracturas en su camino hacia la superficie. Un cambio en el patrón de las ondas sísmicas o una disminución progresiva en las profundidades focales, puede indicar que el magma se está aproximando a la superficie. Existen varios tipos de temblores, los cuales se distinguen en los sismogramas, y que corresponden al fracturamiento de las rocas, movimiento subterráneo o efervescencia del magma, explosiones dentro de un lago de cráter, etc. En algunos casos se presenta un cambio en el tipo de sismos locales durante los días

u horas que preceden a un nuevo período eruptivo. La sucesión más común es que los sismos de fractura son reemplazados progresivamente por eventos explosivos, y finalmente por prolongados períodos de tremor armónico previos al comienzo de una erupción.

El nivel de la actividad sísmica local durante los períodos de inactividad volcánica varía ampliamente de un volcán a otro. Por lo tanto, es fundamental mantener por lo menos un sismógrafo en operación continua en cada volcán potencialmente peligroso, para poder así establecer el nivel de actividad normal. Más que todo es la tasa de aumento de la actividad sísmica sobre el nivel normal lo que indica el aumento del peligro volcánico.

Casi todas las erupciones, y especialmente las mayores, están precedidas por un nivel anormal evidente de la actividad sísmica local. En muchos casos éste ha sido detectado muchos meses antes del inicio de una erupción (por ejemplo, Guadalupe, 1976; San Vicente, 1979). En otros casos (Santa Elena, 1980; Kliuchevskoi, 1960), la actividad sísmica local se detectó sólo unos pocos días antes de que explosiones a pequeña escala comenzaran. Durante el período previo a la erupción, la actividad sísmica local a menudo fluctúa considerablemente y se pueden presentar «enjambres» de eventos, que se prolongan por algunas horas o días, dando origen a falsas alarmas. A las dificultades de predicción en muchos volcanes, se puede sumar el hecho de que por cada crisis sísmica local (que podría tardar días, si no meses) seguida por una erupción, ha habido varias que terminaron sin erupción.

En conclusión, se puede afirmar que en la mayoría de los casos, las grandes erupciones están precedidas por sismos locales anormales que continúan durante días o meses antes de que comience la erupción y con frecuencia muestran un aumento dramático en las horas que preceden a una actividad explosiva importante o emisión de lava. Cuanto más detallado y largo sea el registro de la sismicidad de un volcán, mayor es la posibilidad de que se puedan hacer pronósticos fiables.

### **7.7.3. DEFORMACIÓN DEL SUELO**

Cuando el magma empuja hacia arriba en el interior de un volcán, se espera que cause algún levantamiento o inflación del edificio volcánico y sus alrededores inmediatos, hecho que ha podido observarse en muchos volcanes.

Un levantamiento espectacular ocurrió en el volcán Usu en Japón en 1944-1945. Un área de un kilómetro de diámetro subió 200 metros en once meses, hasta que finalmente fue perforada por una extrusión de lava viscosa que formó un domo de 300 metros de diámetro y 150 metros de altura. Una inflación local ocurrió durante un período de por lo menos cuatro semanas antes de la devastadora erupción del Santa Elena, Estados Unidos, en 1980: un sector de más de un kilómetro de diámetro en la parte superior del volcán se hinchó a una tasa media superior a un metro por día.

Sin embargo, los movimientos verticales asociados con erupciones son, en general, mucho más pequeños y pueden ser detectados sólo con medidas de alta precisión. Se han desarrollado varias técnicas para medir deformaciones muy leves del suelo tanto verticales como horizontales. Los movimientos verticales pueden medirse, ya sea a través de nivelación óptica usando instrumentos de vigilancia corrientes, o por medio de inclinómetros que registran los pequeños cambios en la pendiente. Los inclinómetros acuatabulares o de mercurio son extremadamente sensibles, pero en vista de que sólo pueden registrar cambios de las pendientes en distancias relativamente cortas, siempre queda la posibilidad de que su reacción se deba puramente a influencias locales. Las nivelaciones ópticas repetidas y efectuadas con las técnicas convencionales pueden abarcar áreas más grandes, siendo éstas más flexibles en operación, aunque menos precisas. Ambos métodos han sido utilizados en Hawai en los volcanes Kilauea y Mauna Loa con bastante éxito en la predicción de sus erupciones.

Desplazamientos horizontales relativos entre puntos fijos pueden ser rápidamente detestables con técnicas electrónicas de medición de distancia. Se puede, asimismo, usar la triangulación óptica pero es un tanto imprecisa. El establecer una red de dos dimensiones para medir sistemáticamente distancias entre puntos



escogidos a través y alrededor del volcán, permite identificar las deformaciones del suelo y determinar sus tasas. Estas técnicas han sido importantes para el monitoreo volcánico en Hawai, en el Santa Elena y en otros lugares.

#### **7.7.4. FENÓMENOS HIDROTERMALES**

Aunque la temperatura y tasa de emisión de agua y vapor de las fuentes termales y fumarolas son los indicativos del estado térmico del volcán más obvios y fáciles de medir, son muy difíciles de interpretar. Esto se debe a que ellos dependen no sólo del estado mismo del volcán, sino también de la manera en que el agua circula dentro del edificio volcánico, además de otros factores, especialmente las lluvias. La observación visual de las emisiones de vapor puede ser equívoca, ya que el tamaño y densidad aparente de la columna de vapor depende también de la velocidad del viento, la humedad relativa del aire, la iluminación, etc.

En general, los cambios en el régimen hidrotermal son el resultado de cambios complejos que tienen lugar en los niveles superiores del volcán y dan sólo evidencia indirecta de lo que está ocurriendo en su interior.. Sin embargo, pueden dar alguna indicación de la probabilidad de una erupción freática, es decir, una erupción causada por el contacto de agua subterránea con magma o rocas candentes dentro del edificio volcánico.

Los cambios en la temperatura de los lagos del cráter, cuando éstos existen, son de mayor trascendencia. Por ejemplo, la temperatura anual media en el lago del cráter del volcán Taal en las Filipinas permaneció constante desde 1961 hasta mediados de 1965, oscilando entre 32,5 y 33 °C solamente. A fines de junio de 1965 empezó a aumentar, alcanzando 45 °C a finales de julio, después de lo cual comenzó a bajar lentamente hasta 43 °C el 28 de septiembre, cuando ocurrió una violenta explosión. Durante el período precedente a la erupción, el nivel del agua en el lago también se había comportado de manera anormal, aumentando en mayo y junio, contrariamente a la tendencia estacional usual.

Dieciocho meses antes de la erupción de 1977 del volcán Usu en el Japón se registraron incrementos notables en la temperatura de las fuentes termales, los

cuales mostraron estrecha relación con la sismicidad local. Ambos fenómenos se incrementaron inmediatamente antes de la erupción.

### **7.7.5. CAMBIOS QUÍMICOS**

Muy pocos volcanes permanecen totalmente inactivos durante los intervalos entre las erupciones. Los gases desprendidos del magma subyacente continúan subiendo a la superficie a través de conductos en el cráter o las laderas, y estos gases traen consigo valiosa información de lo que sucede debajo, que se puede revelar mediante análisis químicos.

Los principales constituyentes de los gases volcánicos, aparte del vapor de agua ( $H_2O$ ), son el dióxido de azufre ( $SO_2$ ), ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), ácido clorhídrico ( $HCl$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ). A medida que estos gases suben a la superficie, se enfrían gradualmente y se produce una cierta diferenciación, de tal modo que la temperatura y composición de la mezcla de gases que llega a la superficie da información de la profundidad del magma que se encuentra debajo. Los cambios en las concentraciones relativas, y particularmente un aumento en la relación azufre / cloro, se pueden interpretar como ascenso del magma alcanzando la superficie. Por ejemplo, la relación S/Cl en las emisiones de gases de las fumarolas se incremento por un factor de tres durante los meses anteriores a las erupciones explosivas del Asama (Japón) en 1958 y del Kliuchevskoi (Kamchatka) en 1951. Sin embargo, tal efecto no se ha observado antes de las erupciones del Kilauea (Hawai).

La interpretación de los cambios en la composición química de los gases de las fumarolas es bastante difícil, primero por la variedad de factores que pueden afectarlos durante su trayecto hacia la superficie, y segundo porque no se puede estar siempre seguro de que cualquier muestra de gas es representativa de las condiciones del volcán como un todo. A menudo se pueden observar diferencias sustanciales entre muestras tomadas con poco tiempo o espacio entre ellas. Las técnicas de vigilancia continua, tales como las desarrolladas para  $SO_2$  o  $H_2S$ , permiten estudiar las fluctuaciones rápidas en estos gases.

Los análisis químicos de los gases y aguas volcánicas no han aportado todavía una base para identificar precursores inmediatos de actividad volcánica. Sin embargo, pueden dar indicaciones valiosas del estado general del volcán y de cualquier tendencia de actividad.

#### **7.7.6. REQUISITOS PARA UNA PREDICCIÓN**

Para que una predicción sea beneficiosa, debe cumplir con los siguientes requisitos:

- a) *El anticipo* de la predicción, es decir el tiempo que se espera que transcurra entre el anuncio de la predicción y el comienzo del fenómeno predicho, debe ser *más largo* que el tiempo necesario para llevar a cabo las medidas de protección adecuadas;
- b) *La ventana de tiempo* de la predicción, es decir el lapso de tiempo durante el cual se espera que el fenómeno predicho ocurra, debe ser *tan corto* como sea posible.
- c) La predicción debe ser *segura*, en el sentido de que la probabilidad de que se convierta en una falsa alarma esté dentro de los límites aceptables por la comunidad involucrada; por otra parte, la posibilidad de fallar en predecir una erupción destructiva debe ser la mínima posible.

Es importante que los científicos tengan estos criterios en cuenta al decidir cuándo y en qué forma comunicar sus conclusiones a las autoridades civiles o al público.

### **7.8. MEDIDAS DE PROTECCIÓN**

El propósito de este capítulo es describir las medidas que se pueden tomar para dar protección permanente o temporal contra los diversos fenómenos destructivos que acompañan a las erupciones volcánicas.

#### **7.8.1. PROTECCIÓN CONTRA CAÍDAS DE CENIZA**

Los efectos principales de las lluvias o caídas de ceniza son:

- a) Oscuridad completa;

- b) Enterramiento de estructuras bajas;
- c) Sobrecarga de los techos, y
- d) Recubrimiento de vegetación y cosechas.

Las caídas espesas de ceniza viento abajo del volcán durante erupciones de gran magnitud pueden causar oscuridad completa y reducir la visibilidad a tal punto que aun luces poderosas no son visibles sino a unos cuantos metros.

Muchas veces, equipos indispensables como hidrantes quedan enterrados por espesos mantos de ceniza, de tal manera que son difíciles de encontrar cuando se necesitan para atender fuegos causados accidentalmente o por caída directa de material candente del volcán. Este problema se puede superar manteniendo las mangueras conectadas bajo presión constante y convenientemente alejadas del suelo.

La principal causa de averías se debe al depósito de cenizas sobre los techos de los edificios, que se desploman debido a la sobrecarga, especialmente si la ceniza está húmeda. En áreas expuestas a caídas espesas de ceniza, se debe tener preparado un plan y equipos listos para su remoción. Se debe, además, hacer un inventario en la región sobre la resistencia de los techos y el espesor máximo de ceniza que puedan soportar, teniendo en cuenta que la ceniza volcánica seca tiene un peso específico de 0,5 a 0,7 ton/m<sup>3</sup>, pero cuando se humedece puede alcanzar 1,0 ton/m<sup>3</sup>.

Durante las fuertes caídas de ceniza sobre el pueblo de Vestmannaeyjar en 1973, casas cuyos techos tenían una inclinación superior a 20° no sufrieron daños, mientras que los que tenían menores inclinaciones sufrían colapso si no se les hacía limpieza frecuente. Los techos de fuerte inclinación contruidos en cinc o lámina no retienen la ceniza y además no se inflaman con los fragmentos de lava caliente. En las regiones donde las caídas de ceniza son una amenaza importante, la vigencia de códigos de construcción y prácticas adecuadas pueden reducir considerablemente el riesgo de daños.

Las caídas de ceniza pueden tener algunos efectos indirectos importantes. La ceniza puede contener componentes volátiles tales como flúor, que es altamente tóxico. Otra amenaza resulta de los fuertes campos eléctricos generados por las nubes de ceniza, con las consiguientes descargas eléctricas y fuertes relámpagos, que interfieren las ondas de radio y a veces dañan instalaciones eléctricas o provocan incendios en edificios o vegetación. Estos efectos se deben tener en cuenta al planificar operaciones de ayuda o rescate.

Cuando ocurre una caída espesa de ceniza volcánica, es posible encontrar dificultades para brindar protección a todos los individuos que habitan áreas densamente pobladas. No obstante, un programa de información masiva puede jugar un papel importante para ayudar a las personas a tomar mejores decisiones en el momento de la emergencia. Cuando las nubes de ceniza viajan largas distancias a favor del viento, es posible que su ubicación pueda ser predicha con los informes meteorológicos normales. Las transmisiones de radio pueden informar sobre las rutas más aconsejables para evacuar un área sujeta a caídas de ceniza (por ejemplo buscando una dirección perpendicular al viento), sobre cómo se puede evitar la inhalación de polvo fino utilizando filtros de tela húmedos sobre la boca y la nariz, o cómo protegerse la cabeza y los hombros utilizando sombreros y capas gruesas; además, pueden prevenir contra la acumulación de ceniza en los techos.

El personal dedicado al rescate y socorro ubicado en áreas de caída fuerte de cenizas debe protegerse con cascos provistos de viseras y capas resistentes al calor que protejan el cuello y los hombros. Se requieren máscaras antigás en caso de que se detecten gases tóxicos.

En la vecindad inmediata al sitio de la erupción, la caída de ceniza incandescente puede causar incendios, y si los fragmentos tienen suficiente tamaño, pueden romper ventanas e incendiar cortinas y muebles en el interior de las casas. Durante la erupción en Heimaey, 25 casas se incendiaron por esta causa, pero daños posteriores se pudieron prevenir protegiendo techos y ventanas del lado del

volcán con hojas metálicas. Los tanques de combustible se protegieron colocándoles mallas finas de alambre sobre los tubos de ventilación.

Para el caso de la ciudad de Arequipa se ha calculado por los antecedentes ocurridos en el pasado histórico del Misti, que la dirección del viento podría dirigir la ceniza hacia la ciudad, teniendo que tomar en cuenta las observaciones dadas anteriormente, especialmente se recomienda para las nuevas construcciones, que los techos sean de dos aguas para evitar la acumulación de tefras y posterior colapso de los mismos ya que es muy probable que de ocurrir una erupción esta presente gran cantidad de este material. Ver fotografías y mapas adjuntos.

### **7.8.2. PROTECCIÓN CONTRA EXPLOSIONES VOLCÁNICAS Y FLUJOS PIROCLÁSTICOS**

En áreas sujetas a tipos de erupción más violentos tales como flujos piroclásticos y explosiones dirigidas horizontalmente, la destrucción de edificios normales puede ser casi total. La única estructura capaz de dar protección contra éstos es un refugio subterráneo con paredes y techo reforzados, ventanas y puertas herméticamente selladas, como los que se construyen en algunos países en caso de ataque nuclear. Sin embargo, en la mayoría de los países con altos riesgos volcánicos, el costo de tales refugios va más allá de los medios económicos privados y aun del propio Estado.

No obstante, se podría justificar la construcción de estos refugios en los observatorios vulcanológicos, la policía u otras entidades oficiales que estén encargadas de mantener los servicios esenciales en las áreas evacuadas. Costosas e importantes instalaciones, tales como plantas eléctricas, centros de comunicación o archivos importantes que estén localizados en zonas de alto riesgo, justifican una protección similar. Con el incremento gradual en el uso de concreto reforzado en los países en desarrollo, se pueden diseñar modificaciones simples a puertas, ventanas y ventiladores de sótanos o garajes subterráneos para hacerlos convertibles de manera instantánea en refugios contra erupciones volcánicas.

Un nivel menor de protección pero a menudo adecuado podría ser simplemente el de establecer para los grandes edificios públicos (especialmente los futuros proyectos de construcción) la dotación de puertas y ventanas que puedan ser selladas completamente y resistan las nubes calientes que se desprenden de los bordes de los flujos piroclásticos, las cuales en muchas erupciones han penetrado en las casas y asfixiado a sus ocupantes aunque las estructuras quedan intactas.

### **7.8.3. PROTECCIÓN CONTRA LOS FLUJOS DE LODO**

Los flujos de lodo pequeños se pueden desviar con barreras o encauzar por medio de canales artificiales para proteger tierras o propiedades valiosas, pero en la mayoría de los casos el volumen y la fuerza del lodo es tal, que no se pueden controlar.

Por regla general es imprudente construir cualquier población permanente en una área donde se sabe que ha sido afectada por flujo de lodo en un pasado reciente. Sin embargo, la ignorancia de este principio ha resultado funesta en muchas poblaciones localizadas en o cerca de volcanes que están expuestos a este riesgo. En estos casos la única protección posible es la evacuación del área con tiempo suficiente, cuando una erupción amenaza o comienza, ya que los flujos de lodo son muy probables.

Cada vez que un volcán entre en erupción y se aprecien grandes cantidades de cenizas acumuladas en sus flancos, todos los asentamientos humanos localizados en los valles alrededor del volcán deben ser evacuados como medida de precaución, especialmente aquellos en los que se tiene conocimiento de flujos de lodo anteriores.

Se puede permitir el acceso a la zona de peligro siempre y cuando exista un sistema de alarma efectivo que permita evacuarla tan pronto como se detecte o espere un flujo de lodo.

Tales sistemas de alarma tienen que ser cuidadosamente instalados y realizados, puesto que estos flujos pueden alcanzar altas velocidades (superiores a los 100

km/hora), lo cual implica que las personas tienen pocos minutos para llegar a lugares más altos.

Se recomienda que para el caso de la ciudad de Arequipa se deben instalar por lo menos tres sistemas de alarma, una en la represa de Aguada Blanca, otra en la Hidroeléctrica de Charcani VI y la última podría ser en la hidroeléctrica de Charcani I.

#### **7.8.4. PROTECCIÓN CONTRA FLUJOS DE LAVA**

El primer intento de desviar un flujo de lava se hizo en Sicilia en 1669 cuando un gran flujo del Etna avanzaba hacia la ciudad de Catania.

Varias docenas de hombres de esta ciudad se cubrieron con pieles de vaca húmedas como protección contra el calor, y provistos de barras de hierro lograron abrir una brecha en el flanco del flujo que permitió salir a la lava líquida en esta nueva dirección. Desafortunadamente el nuevo flujo amenazó la aldea de Paterno, cuyos habitantes, enojados, suspendieron la operación. Una vez taponada la salida lateral, el flujo principal continuó hasta entrar en la ciudad de Catania.

A partir de esta época se han utilizado otros métodos para desviar los flujos de lava tales como:

##### **7.8.4.1. BOMBARDEO**

Flujos de lava basáltica de baja viscosidad han sido bombardeados desde aviones con el fin de abrir canales nuevos, interferir o crear represamientos para proteger propiedades valiosas. Por ejemplo, durante la erupción del Mauna Loa, Hawái, en 1942, se bombardeó un flujo de lava en la parte alta, cercana al volcán. El frente del flujo, 20 km adelante, dejó de avanzar poco después; sin embargo, la intensidad de la erupción disminuyó al mismo tiempo de tal manera que no se pudo comprobar si fue en realidad el bombardeo el que detuvo el flujo de lava.

El bombardeo desde aviones puede intentarse solamente con buenas condiciones atmosféricas pues a menudo la visibilidad es poca y las turbulencias violentas de aire pueden hacer peligrosa la operación. Los misiles aire-tierra podrían dar mejores resultados pero todavía no se han utilizado.



Incluso en las mejores condiciones, el bombardeo desde el aire no es lo suficientemente preciso y se corre el riesgo de que una bomba caiga en el sitio errado y aumente el flujo en dirección equivocada. Es dudoso que un bombardeo tenga efectos significativos sobre flujos de espesor considerable. Una alternativa usada en el Etna en mayo de 1983 consistió en colocar explosivos manualmente en huecos poco profundos para abrir zanjas y entorpecer el flujo de lava.

#### 7.8.4.2. BARRERAS DE DESVIACIÓN

Mucho se ha discutido sobre la posibilidad de construir barreras de desviación para reorientar flujos de lava. En 1881, W. R. Lawrence propuso la construcción de una barricada para frenar un flujo del Mauna Loa que se acercaba a la ciudad de Hilo, pero la erupción cesó antes de concluir el trabajo.

Se ha observado en varias ocasiones que la lava tiende a fluir alrededor de obstáculos tales como casas o muros de piedra en vez de derrumbarlos. Durante la erupción del Vesubio en 1906, la lava fluyó por las calles de Bosco Trecase sin destruir edificios. Sin embargo, lava más viscosa, como la producida por el Etna en 1983, derribó casas de mampostería.

En el área de Krafla, al norte de Islandia, donde la lava es muy fluida, se han construido dos barreras, una para proteger un poblado de 200 habitantes y la otra para una fábrica de diatomitas. Se niveló una pequeña colina sobre el terreno por medio de buldócer para desviar los flujos de lava lejos de las poblaciones. Ninguna erupción ha ocurrido desde que el trabajo fue terminado. Por consiguiente, no se puede saber aún si el resultado será efectivo.

En el Etna en 1983, se construyeron barreras a un costo considerable utilizando buldóceres y camiones, los cuales exitosamente lograron desviar el flujo de lava que amenazaba un hotel y un área de recreación.

#### 7.8.4.3. ENFRIAMIENTO POR ROCIADORES DE AGUA

La idea de enfriar los flujos de lava rociando sobre ellos gran cantidad de agua ha sido discutido por mucho tiempo y se ensayó a pequeña escala en 1960, cuando

el Departamento de Bomberos de Hawai regó con agua de dos mangueras un frente de lava y se cree que contribuyó a disminuir su velocidad por algún rato.

El primer intento a gran escala para desacelerar un flujo de lava por riego de agua se hizo en Heimaey, Islandia, en 1973. La lava se acercaba al pueblo de Vestmannaeyjar y su puerto, vital para la subsistencia de la población de la isla.

Aproximadamente dos semanas después de dar comienzo la erupción, y cuando el frente de lava se acercaba a la entrada del puerto, se instalaron bombas del Departamento de Bomberos, la Defensa Civil y otras organizaciones, las cuales regaron con cerca de 100 litros de agua por segundo el frente de lava a lo ancho de unos 500 metros. Poco después de comenzar el bombeo se notó que el frente de lava se apilaba sobre la parte regada, alcanzando unos 20 metros de altura y había sido detenida parcialmente, mientras que en ambos lados del área enfriada la lava continuaba su avance a la misma velocidad inicial. Se decidió entonces aumentar la capacidad de bombeo mediante un barco bombero para que sacara agua del mar desde el puerto hasta el frente de lava, alcanzando los 400 litros/segundo y posteriormente hasta 1.200 litros/segundo. Se estima que durante los 150 días que duró la operación, se regaron 6,2 millones de metros cúbicos de agua sobre la lava.

Una vez terminada la erupción, se sondeó dentro de la lava para poder evaluar el efecto del rocío de agua. En los sitios donde no hubo regadío se alcanzó una temperatura de 500-700 °C a una profundidad de 5-8 metros bajo la superficie de la lava, pero en las áreas rociadas no se encontraron las mismas temperaturas hasta los 12-16 metros de profundidad.

Se ha debatido de si la operación valió la pena, ya que el costo total del rociado se estimó en 1,6 millones de dólares. Pero puesto que cada metro que el frente de lava avanzaba significaba la destrucción de propiedades, cualquier desaceleración del flujo implicó el salvamento de pérdidas valiosas. Es imposible decir cuántos metros más pudo haber avanzado la lava si no hubiera sido enfriada, pero si es cierto que salvó las instalaciones del puerto, el costo del bombeo fue completamente justificado.

Según muestras tomadas en los alrededores del volcán Misti se ha llegado a la conclusión que se trata de una lava andesítica, es decir, de una composición intermedia con un avance de 7 a 9 Km de distancia desde su punto de emisión, entonces se presume que de ocurrir este fenómeno no afectaría la ciudad de Arequipa de manera directa, pero si afectaría gravemente las hidroeléctricas de Charcani ubicadas a lo largo del cauce del río Chili al Oeste del Misti a una distancia de 6 Km aproximadamente en línea recta desde el cráter del volcán.

Por lo tanto no se puede considerar los anteriores métodos de protección contra los flujos de lava por no contar con el espacio suficiente para el bombardeo sin llegar a afectar las hidroeléctricas y/o la represa de Aguada Blanca que es la principal fuente de agua y energía eléctrica con la que cuenta la ciudad de Arequipa, tampoco se podría construir las barreras de desviación por el motivo anterior, y por el método de enfriamiento nos resulta imposible ya que la ciudad de Arequipa se encuentra a 240 km del mar y no se cuenta con las aguas del río Chili ya que es un punto vulnerable, en conclusión en caso de una erupción con lava Arequipa se quedaría desprovista de energía eléctrica y agua potable.

## **7.9. EL DESARROLLO DE LOS PLANES DE EMERGENCIA VOLCÁNICA**

Podemos asumir:

- a) Que en cualquier comunidad expuesta al peligro volcánico hay una conciencia general del riesgo para la vida y los bienes, así como el deseo de una participación colectiva para reducirlo;
- b) Que exista una estructura legislativa dentro de la cual sea posible planificar, organizar y llevar a efecto, tanto a nivel nacional como local, las medidas apropiadas de protección, incluyendo si es necesario la evacuación de las áreas amenazadas y asistencia para los evacuados;
- c) Que el conocimiento científico de los volcanes potencialmente peligrosos sea lo suficientemente avanzado que permita elaborar «escenarios» de las erupciones posibles, de sus efectos destructivos y de las consecuencias económicas y sociales; para el caso del volcán Misti se ha llevado a cabo

mediante estudios de tesis para optar el título de ingenieros con participación de científicos y entidades extranjeras como son ORSTOM, Naciones Unidas, entre otras.

- d) Que sea posible tener algún sistema de alerta para las erupciones inminentes, bien sea a partir de signos visibles de actividad volcánica o de monitoreo científico de los volcanes, y que esta alarma se dé con el tiempo suficiente para permitir que se ejecuten las acciones apropiadas; para tal caso se cuenta con sismógrafos instalados por el Observatorio de Characato (UNSA) y por el Instituto Geofísico del Perú.
- e) Que si las consideraciones anteriores han sido realizadas, se prepare un plan de emergencia para cada volcán potencialmente peligroso. Un resumen de todos los requisitos generales de planificación, incluyendo su secuencia cronológica e indicando las responsabilidades de las autoridades de planificación y de los vulcanólogos, respectivamente.

### **7.9.1. ELEMENTOS BÁSICOS DEL PLAN PARA LA CIUDAD DE AREQUIPA**

El plan de emergencia para el volcán Misti contiene los siguientes elementos:

- Se ha Identificado y cartografiado las zonas amenazadas y se cuenta con el censo de población del año 1993, (ver cuadro de población) calculándose un aproximado de un millón de habitantes.
- Se han identificado las zonas de refugio seguras adonde la población pueda ser evacuada en caso de una erupción peligrosa; Tentativamente se ha considerado como zonas de refugio en las localidades de Yura, Hunter, Sachaca, Estadio Mariano Melgar, Socabaya, Hipódromo de Porongoche, Coliseo Arequipa, Sabandía, Characato.
- Para el caso de rutas de evacuación se ha considerado para el caso de los distritos de Cayma, Yanahuara, Cerro Colorado, Zamácola, que se encuentran al lado Oeste del río Chili, se les recomendaría evacuar por la Av. Ejército siguiendo por la Av. Aviación hacia el Cono Norte de la ciudad dirigiéndose

- A la población que se encuentra en los distritos de Mariano Melgar, Miraflores, Alto Selva Alegre, Paucarpata, José Luis Bustamante y Rivero toma como vía de evacuación las avenidas Independencia, Venezuela, Goyeneche, hacia la Avenida Parra y dirigirse hacia el distrito de J. Hunter.
- Para el caso de Tiabaya, Arancota, se recomienda quedarse en sus domicilios reforzándolos con las indicaciones dadas en los puntos anteriores.
- Del mismo modo para los distritos de Sabandía, Characato, Socabaya, se les recomienda quedarse en sus hogares reforzándolos y aquellos que viven en cercanías a ríos o quebradas se les recomienda alejarse de ellas y refugiarse en los centros que se les indicaría oportunamente.
- Los medios de transporte con los que cuenta Arequipa, son aéreos, férreos, y carreteras asfaltadas como también afirmadas (ver mapa).
- Se debe considerar el alojamiento y facilidades en las zonas de refugio;
- Se debe hacer un Inventario del personal y equipo para misiones de búsqueda y rescate; Hospitales y servicios médicos para atender heridos;
- Se debe dar seguridad en las áreas evacuadas;
- Se debe informar sobre los procedimientos de alerta; y dar la información por los medios de comunicación.
- Se debe revisar periódicamente la posibilidad de revisar y actualizar el plan.

### **7.9.2. ESCALAS DE TIEMPO**

Un punto importante que debe ser considerado desde un principio, es la relación entre la escala del tiempo de los eventos volcánicos y el tiempo necesario para llevar a efecto las diferentes medidas de protección (por ejemplo, protección en el sitio o evacuación).

La experiencia ha mostrado que el intervalo entre el inicio de una erupción, o de los fenómenos precursores importantes, y el clímax violento puede variar entre unas pocas horas y varios días, semanas o meses. Por otra parte, el tiempo necesario para dar a cabo medidas de protección de emergencia depende del tamaño del área de riesgo, la densidad de población y asentamientos, el grado de movilización de la población, la disponibilidad de comunicaciones y transporte, y en general el nivel de desarrollo tecnológico. Puede ser estimado generalmente en horas o días.

En la práctica es apropiado prepararse para dos tipos de acción:

#### 7.9.2.1. RESPUESTA MEDIATA

Para una crisis volcánica que se desarrolla gradualmente, durante la cual se pueden esperar pronósticos de erupciones peligrosas por lo menos 24 horas antes de ocurrir;

#### 7.9.2.2. RESPUESTA INMEDIATA

Para una situación que requiere la evacuación inmediata de las personas por cualquier medio disponible.

Cuanto más se conozca sobre el volcán y mayores sean los esfuerzos que se hayan dedicado a los estudios científicos y al monitoreo de su comportamiento, más precisas serán las estimaciones del tiempo disponible para tomar medidas efectivas de protección cuando ocurre la erupción.

### **7.9.3. IDENTIFICACIÓN DE ZONAS PELIGROSAS**

El primer elemento para un plan de emergencia es un mapa que muestre las zonas peligrosas alrededor del volcán que pueden estar afectadas por uno o más fenómenos destructivos (flujos piroclásticos, flujos de lodo, derrames de lava, caídas fuertes de ceniza, etc.) durante una erupción. Tal es así que se han confeccionado mapas para los diferentes elementos volcánicos que podrían afectar la ciudad de Arequipa, estos incluyen la subdivisión del área expuesta a cada tipo de amenaza en dos o tres zonas correspondientes a erupciones de distintas magnitudes.

El mapa de zonas peligrosas estará basado en mapas elaborados por vulcanólogos mostrando las zonas afectadas por erupciones previas (históricas, o prehistóricas reconstruidas geológicamente). Se han empleado métodos elaborados por vulcanólogos japoneses por la Agencia Nacional de Tierras del Gobierno de Japón, Cabe notar que estos mapas están basados puramente en criterios geológicos. Por razones prácticas, en la elaboración de planes de evacuación, etc., las autoridades responsables del manejo de emergencias se podrían ver obligadas a extender el ámbito de algunas zonas para tener en cuenta rutas de evacuación, límites de áreas pobladas, etc.

Para la ciudad de Arequipa, se han reconocido como zonas peligrosas: La Represa de Aguada Blanca, Hidroeléctricas de Charcani a lo largo del río Chili, y especialmente los asentamientos humanos ubicados muy cerca al volcán Misti como son: P.J. Independencia, Miguel Grau, Asunción, Alto Selva Alegre, además de las viviendas ubicadas a lo largo de las diferentes quebradas, que en algunos casos las han represado y en otros las han desaparecido para construir en el mismo cause de ellas.

#### **7.9.4. CENSO DE POBLACIÓN E INVENTARIO DE PROPIEDADES**

Para planificar la evacuación es necesario compilar un censo de población en las zonas peligrosas y actualizarlo por lo menos cada cinco años o cuando haya indicios de actividad volcánica anormal. Este censo debe incluir no sólo a las personas que residen permanentemente, sino también a aquellas que habitualmente la visitan, por ejemplo para su trabajo diario. También puede ser útil el hacer un inventario de los animales domésticos y ganado en cada zona, de tal modo que se pueda programar su evacuación si el tiempo disponible y el estado de actividad del volcán lo permiten.

Se debe tomar nota especial de cualquier propiedad o servicios cuya pérdida pueda tener efectos inmediatos en otros lugares (por ejemplo, plantas eléctricas de Charcani, Represa de Aguada Blanca, repetidoras telefónicas, acueductos, etc). Para el caso de Arequipa, se cuenta con los datos proporcionados en el censo de 1993, y se asume que a la fecha por el alto crecimiento de la población

se cuenta con un millón de habitantes aproximadamente, se recomienda efectuar otro censo para actualizar dichos datos.

#### **7.9.5. IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS DE TRANSITO Y ZONAS DE REFUGIO SEGUROS**

Para que la evacuación de una zona peligrosa se realice de manera ordenada, es esencial que cada persona en el área sepa adónde tiene que ir cuando comience la evacuación.

Para cada zona peligrosa (o parte de cada una), se debe identificar el punto más cercano de fácil acceso fuera de la zona adonde las personas puedan dirigirse o puedan ser transportadas tan pronto como sea posible, y donde se puedan reunir en seguridad mientras se alista su acogida en la zona de refugio.

En cada uno de estos puntos de tránsito se debe hacer un control de las personas evacuadas de tal manera que se puedan identificar aquellas que no están presentes, y poder organizar su búsqueda. Asimismo, deben existir en estos puntos facilidades tales como teléfono o radio que les permitan comunicarse entre sí. Todos los evacuados, incluyendo aquellos que van hacia sus propios sitios provisionales de vivienda en áreas seguras, deben registrar su salida de la zona peligrosa en alguno de los puntos de tránsito.

Estos puntos tendrán probablemente sólo las mínimas facilidades de socorro y alimentación para los evacuados. Sin embargo, deben seleccionarse basándose en la inspección que se haga de las construcciones localizadas fuera de la zona peligrosa de fácil acceso para dar temporalmente la mejor protección posible al mayor número de personas por evacuar. En erupciones volcánicas, las carpas no son apropiadas como refugio temporal, especialmente si están localizadas cerca de zonas de alto peligro, ya que pueden ser fácilmente deterioradas por cenizas o fragmentos de lava. Las escuelas, centros comunales, depósitos y otros edificios grandes son preferibles.

El plan debe especificar también los procedimientos para poder llevar los evacuados lo más rápidamente posible de los puntos de tránsito a las zonas de refugio.



### **7.9.6. IDENTIFICACIÓN DE LAS RUTAS DE EVACUACIÓN**

El siguiente punto en la planificación de la emergencia es el de evaluar el número de personas que deben ser evacuadas, el número de vehículos (y si es del caso, botes o aviones) disponibles, y la posibilidad y capacidad de tráfico de cada una de las carreteras que salen de las zonas por evacuar. Debe haber varias alternativas, según la localización, tipo y magnitud de la erupción y la dirección del viento. El principal objetivo evidentemente es distribuir el tráfico, de tal manera que todas las rutas permanezcan abiertas. Bajo este aspecto es aconsejable considerar la vulnerabilidad de cada ruta no sólo en cuanto a cenizas, flujos piroclásticos, flujos de lodo o lava que vengan del volcán, sino también los derrumbes o daños a puentes y túneles que puedan ser ocasionados por temblores locales fuertes. La ceniza fina, aunque sea de sólo unos pocos centímetros de espesor, puede hacer que el asfalto se vuelva resbaladizo, causando congestión del tráfico en pendientes fuertes o accidentes en las esquinas e intersecciones. Cada una de las rutas de escape necesita examinarse y se deben tomar medidas en cuanto sea posible para mantener y controlar el flujo de tráfico en los puntos supuestamente peligrosos.

Es necesario recalcar que aunque la primera consideración para seleccionar las rutas de escape debe ser la de evacuar a la gente tan pronto como sea posible de las zonas de peligro inmediato, es aconsejable también llevarla sin demora a aquellas áreas seguras donde hay facilidades de alojamiento. Se ha propuesto en puntos anteriores tentativamente algunas rutas de evacuación.

### **7.9.7. MEDIOS DE TRANSPORTE, CONTROL DE TRAFICO**

Como ya se ha mencionado, el plan para transportar a la gente y sus bienes fuera de las zonas de peligro debe estar concebido para dos niveles de emergencia, mediato e inmediato. En una evacuación mediata, cuando hay tiempo suficiente entre la orden oficial de evacuación y el inicio de erupción destructivo, se supone que las personas que poseen vehículo propio cuidarán de sí mismas y de vecinos con los cuales tengan un acuerdo previo. Todas las otras personas a evacuar serán recogidas por transporte público en los sitios acordados anteriormente.

Cada conductor debe estar enterado de los puntos exactos donde tiene que recoger a las personas (y no en cualquier parte). Todos los conductores de servicio público y privado deben estar informados de las rutas de escape disponibles y de cuándo salir. El transporte público continuará efectuando viajes de ida y vuelta mientras las carreteras lo permitan o hasta que todos los evacuados y bienes posibles hayan sido transportados.

En el caso inesperado de un rápido aumento de la actividad destructiva, el transporte será todavía más difícil de controlar (debido al impulso de la gente por abordar los camiones o buses más cercanos), y el movimiento de tráfico en las rutas de escape hacia las afueras de las áreas urbanas puede volverse imposible debido al gran número de personas que se encontrarán viajando a pie. En un caso como éste, se debe abandonar el plan inicial y adoptar uno «de choque» permitiendo que cualquier vehículo que ingrese en la zona de riesgo pueda recoger peatones a lo largo de las rutas de escape (preferiblemente bajo control de la policía o defensa civil).

Para preparar un plan detallado de transporte para la evacuación es necesario:

- Saber cuántas personas tienen vehículos privados y designar las rutas que deben seguir;
- Hacer un inventario del número y localización de personas que necesitan transporte público;
- Asignar puntos de recogida para transporte público;
- Hacer inventario del transporte público disponible y conductores, y asignar puntos específicos a cada uno;
- Hacer los trámites para requisar y abastecer a los camiones privados y buses, dar incentivos indispensables a aquellos que se encuentran normalmente fuera de la zona amenazada para que presten su colaboración. Podría juzgarse necesario o apropiado, por ejemplo, que el gobierno corra con los costos de daños ocasionados a vehículos privados solicitados para colaborar en la evacuación.

### **7.9.8. ALOJAMIENTO EN LAS ZONAS DE REFUGIO**

Una vez que los evacuados lleguen a las zonas de refugio, los problemas de albergue, alimentación, higiene y moral serán similares a los que se encuentran en cualquier otro tipo de desastre, por lo que no merecen discusión especial en este texto. Sin embargo, hay un factor adicional en el caso de los volcanes que no se da en los terremotos, ciclones o inundaciones, y es que el fenómeno de erupción puede continuar por varios meses con paroxismos destructivos repetidos (posiblemente superando la escala -del primero) y que no es seguro permitir la entrada o retorno de los evacuados, o comenzar la rehabilitación o reconstrucción hasta después de varios meses del evento destructivo inicial. Las evacuaciones debidas a erupciones suelen ser más largas que las ocasionadas por otros tipos de fenómenos naturales.

### **7.9.9. RESCATE, PRIMEROS AUXILIOS Y SERVICIOS HOSPITALARIOS**

Durante la evacuación o después de ella, puede que algunas de las personas que se sabe que viven en la zona amenazada no aparezcan en los puntos de tránsito o zonas de refugio y que sea necesario organizar su búsqueda.

Puede haber también personas aisladas en áreas seguras pero cuyas rutas de acceso están bloqueadas por flujos piroclásticos, de lava o de lodo. En este caso debe hacerse un reconocimiento aéreo tan pronto como las condiciones sean favorables, bien sea para llevar provisiones o para su rescate. Es indispensable planificar el equipo necesario disponible y cómo van a llevarse a cabo los reconocimientos.

Los primeros auxilios y hospitalizaciones son requeridas principalmente para tres tipos de lesiones:

- a) Problemas respiratorios en personas que han inhalado aire cargado de polvo fino con silicato que pueda contener niveles peligrosos de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), dióxido de azufre ( $SO_2$ ) u otros gases volcánicos;
- b) Fracturas, lesiones y golpes resultantes del impacto de fragmentos de roca o pedazos de lava caldos de gran altura;

c) Quemaduras de la piel (primero a tercer grado) o quemaduras en las vías respiratorias o pulmonares como resultado de la exposición al vapor o nubes de polvo calientes, especialmente las que se desprenden de los flancos de flujos piroclásticos. En este último caso probablemente las quemaduras severas en gran parte del cuerpo produzcan estados críticos.

Además de lo anterior, puede haber víctimas por gases tóxicos como monóxido de carbono (CO) o Personas sofocadas por gases densos como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que se acumulan en sótanos de casas, fondo de valles u otros lugares bajos. Posteriormente, pueden surgir problemas sanitarios derivados de la ingestión de agua proveniente de represas o tanques contaminados por sustancias tóxicas.

#### **7.9.10. SEGURIDAD EN ZONAS EVACUADAS**

A menos que el peligro de perder la vida sea inmediato y evidente, la gente estará renuente a abandonar sus casas sin tener la seguridad de que son protegidas contra robo o saqueo durante su ausencia. Hay que tomar las precauciones adecuadas para restringir la entrada de personas no autorizadas a las zonas evacuadas y debe mantenerse un patrullaje policial, mientras éste no implique un peligro para las unidades de policía.

#### **7.9.11. PROCEDIMIENTO DE ALERTA DENTRO DEL GOBIERNO**

A diferencia de otros riesgos naturales, los riesgos volcánicos son fuertemente localizados, con los efectos más destructivos limitados a áreas de algunas decenas de kilómetros alrededor del volcán. La responsabilidad principal para llevar a cabo las medidas descritas anteriormente incumbe normalmente a las autoridades locales o provinciales, más bien que a las nacionales, excepto cuando la magnitud del desastre es tal que el gobierno local sea incapaz de manejarla.

El plan de emergencia definirá las responsabilidades de los diferentes departamentos del gobierno que tengan que ver con la situación y los procedimientos para que se pongan en ejecución los diversos elementos del plan cuando éste sea necesario.

La responsabilidad global se debe confiar a un comité interinstitucional de las entidades relacionadas con el caso, presididas por un representante nacional, departamental o municipal. Cada entidad representada en el comité debe preparar sus propios planes de acción para responder a la emergencia, de acuerdo con las directivas del comité.

En general, es posible definir varios grados de alerta que correspondan a distintos niveles de riesgo como lo determina el equipo científico encargado del monitoreo de la actividad volcánica. Un ejemplo se da en el cuadro 3.

La responsabilidad directa para decretar los grados de alerta recaerá en un oficial designado, quien actuará basándose en la información suministrada por el equipo científico que monitorea el volcán. Siempre habrá un elemento de juicio personal en la interpretación que se da a los fenómenos premonitorios observados, que depende del conocimiento de la historia de cada volcán en particular. En la práctica, la decisión sobre el grado de alerta que se debe declarar, no dependerá tanto de la probabilidad estimada de una erupción violenta, sino más bien del número de alarmas falsas que se puedan permitir sin que se pierda la confianza de las autoridades civiles y del público en general.

## **7.10. ESTADOS DE ALERTA PARA ERUPCIÓN VOLCÁNICA**

### **7.10.1. FORMULACIÓN Y COMUNICACIÓN DE ALERTAS PUBLICAS**

Puesto que las medidas tomadas para proteger la vida y los bienes durante una erupción volcánica afecta en mayor o menor grado a toda la población, es de vital importancia mantener a la comunidad informada de lo que se está haciendo (y lo que tienen que hacer) para su protección. Esto, inevitablemente, implica cierto grado de control sobre la información transmitida por los medios de comunicación locales, que se puede ejercer por un responsable en nombre del gobierno.

Para evitar el pánico u otras reacciones adversas a la situación, se recomienda, en cuanto sea posible, decidir previamente el contenido y forma de los comunicados, asegurándose de que el público los pueda comprender y se prepare para lo que se espera. Los detalles de estos arreglos variarán de un lugar a otro de acuerdo

con la estructura social y los medios técnicos disponibles; por esto, es difícil establecer reglas detalladas para la información y alerta del público. Sin embargo, se presentan aquí unos textos modelos para anunciar por radio los dos niveles de máxima alerta:

## ERUPCIÓN VOLCÁNICA - ALERTA NARANJA

Borrador para el primer boletín radiado

*[para ser transmitido en todos los noticieros]*

*Locutor.-*

El gobierno ha emitido un aviso de probable erupción volcánica. Les presento..... al (título y nombre), (cargo que desempeña).

*(La declaración debe ser leída por un alto funcionario del gobierno, ya sea personalmente o en una cinta grabada anteriormente, sin ninguna revisión.)*

«El gobierno ha declarado la *Alerta Naranja* por posible erupción del volcán...

»Esto significa que a pesar de no haber peligro inminente para la vida y los bienes de los ciudadanos, hay un grave riesgo de erupción que puede ocurrir dentro de varios días o semanas. El gobierno está tomando todas las medidas de precaución necesarias y por lo tanto algunos servicios normales tendrán que ser suspendidos. Se están circulando mapas de las áreas potencialmente peligrosas y colocándolos además en lugares públicos.

»Todavía no es necesario que las personas abandonen las áreas de peligro. Se les estará informando con frecuencia por radio sobre la situación, estén atentos a ella. Si el riesgo aumenta y el gobierno considera que la evacuación es necesaria, se declarará la *Alerta Roja* con el tiempo suficiente para que todas las personas se dirijan a las áreas de seguridad antes de que ocurra una erupción violenta. Por ahora no es necesaria una evacuación masiva.

»Si se encuentran trabajando, no hay necesidad de regresar a casa inmediatamente; a menos que sus superiores lo dispongan de otra manera, deben continuar asistiendo a su trabajo normalmente hasta nuevo aviso.

»No llamen a las autoridades encargadas de la emergencia para no congestionar las líneas telefónicas. La mejor forma de ayudarse a sí mismo y a las autoridades es escuchando los boletines informativos oficiales en la radio.

»Asegúrese de que sus vecinos están enterados de esta alerta.»

(Posteriormente pueden darse instrucciones suplementarias en cuanto al cierre de escuelas, reuniones o movilización del personal encargado del manejo de la emergencia, otras medidas de precaución necesarias a nivel familiar, riesgos específicos en áreas particulares, etc).

*Locutor.-*

Este boletín se repetirá a las ... (repetirlo por lo menos en dos noticieros adicionales).

#### ERUPCIÓN VOLCÁNICA - ALERTA ROJA

Borrador del boletín oficial para la radio

*[para ser transmitido como noticia urgente (interrupción del programa normal)]*

*Locutor.-*

Interrumpimos el programa para anunciar una posible erupción violenta del volcán ... Les presento al ... (título y nombre), (cargo que desempeña).

*(El entrevistado había personalmente o en una cinta grabada anteriormente, sin ninguna revisión.)*

«En anteriores boletines se había informado de la posibilidad de una erupción destructiva del volcán... La situación se ha vuelto más seria y se espera que ocurran explosiones violentas dentro de algunos días o aun horas. Por lo tanto se ha decidido declarar la *Alerta Roja* y ordenar la evacuación de las áreas mostradas en los mapas de evacuación (especificar el color) puestos en circulación y en lugares públicos.

»Si usted vive en el área de color (especificar) debe salir tan rápidamente como sea posible, llevando consigo los bienes que les hemos sugerido. Si tiene

transporte propio utilícelo; si necesita transporte público acuda al punto de recogida más cercano, que ha sido indicado en los mapas de evacuación.

»Todos los vehículos y maquinaria particular inscritos para la emergencia se deben reportar inmediatamente tal como se les instruyó. Todas las carreteras excepto (especificar cuáles) están abiertas al tráfico. Tome las direcciones indicadas en el mapa de evacuación o siga las instrucciones de la policía. Si tiene su propio medio de transporte y tiene a donde ir en una zona segura, diríjase hacia allí rápidamente. Todas las demás personas diríjense al centro de tránsito más cercano.

»No se estacione en las carreteras, para no obstruir la circulación. No llame a las autoridades encargadas de la emergencia para no congestionar las líneas.

»Siga escuchando esta estación para información de última hora y nuevos avisos. Esta estación permanecerá difundiendo las 24 horas del día.

»Asegúrese de que sus vecinos están enterados de este boletín.»

#### *Locutor*

Este boletín se repetirá a las ... (repetirlo por lo menos cuatro veces con intervalo de una hora).

### **7.10.2. REPASO Y REVISIÓN DEL PLAN**

Ningún plan de este tipo es válido indefinidamente y es aconsejable prever su revisión, con la debida publicidad, a intervalos regulares como de dos o tres años.

Los cambios pueden ser necesarios por:

- A) Progreso del conocimiento científico del volcán que puede dar lugar a redefinición de las zonas de peligro;
- B) Cambios en el patrón de uso del suelo alrededor del volcán, en la red de carreteras, medios de comunicación u otros cambios técnicos que puedan modificar los procedimientos de alerta y de evacuación;
- C) Cambios en la estructura administrativa del gobierno local o nacional.



Además, el plan tiene que ser revisado después de cada erupción a la luz de la experiencia adquirida. Algunas imperfecciones del plan se pueden revelar en la emergencia real, por mucho tiempo que se hubiera dedicado a pensarlo y planearlo de antemano. Esto implica que deben existir organizaciones permanentes dentro del gobierno nacional o local cuya responsabilidad sea preparar y efectuar planes de emergencia para volcanes u otros desastres.

## CONCLUSIONES

- La ciudad de Arequipa está asentada sobre abanicos compuestos de flujos piroclásticos, lahares y aluviones, que han descendido desde el Misti durante los últimos 10,000 años. Solamente 7 km de distancia separa el pie de cono y el límite de los sectores poblados. El flujo piroclástico más reciente parece haber sucedido hace solamente dos mil años. Si este fenómeno volviera a ocurrir hoy, afectaría severamente a una población de decenas de miles de personas.
- Dado que el río Chili discurre al pie norte y oeste del cono volcánico y es la única fuente de agua potable de la ciudad, así como la sede de una serie de 5 plantas hidroeléctricas que suministran electricidad a la ciudad y es fuente principal de agua de riego de la región, los productos eruptivos de futuras erupciones llegarán fácilmente a dicho río y podrán destruir o dañar severamente la mencionada infraestructura con las obvias consecuencias socio económicas para Arequipa.
- El actual Misti se encuentra constituido por dos edificios volcánicos, a) un estrato volcán antiguo que colapso hacia el flanco Suroeste y Este del Misti originando depósitos de avalanchas de escombros, b) un estrato cono moderno al Este del estrato volcán antiguo cubriéndolo parcialmente.
- El estrato cono moderno del Misti representa dos conos, dos calderas y ha sido construido en base a siete grupos, individualizados por sus diferentes características litológicas.

- Flujos de Lava: Si se comportan en el futuro igual a lo pasado, no representan peligro a la ciudad directamente, sin embargo podrían llegar al río Chili fácilmente, destruyendo cualquier obra ingenieril que se encuentre a su paso y represar el río con una presa de lava de composición intermedia (andesita).
- Flujos Piroclásticos: Durante el holoceno estos flujos han descendido varias veces por las Qdas. San Lázaro, Huarangal, Santo Domingo, Santa Luisa, Chilina y la del Convento Chilina, formando abanicos que figuran hoy como suelos de cimentación de varios pueblos jóvenes de Arequipa (independencia, Apurimac, Alto Selva Alegre, Gráficos, Alto Misti, Miraflores, Mariano Melgar, Alto San Martín, Miguel Grau, Jorge Chávez Ciudad Blanca y Chilina). Por la quebrada de Agua Salada y otras, tales flujos podrían afectar la zona de Chiguata situada al SE del volcán.
- Lahares: Se han producido muchas veces durante la historia reciente del Misti, han seguido las mismas rutas de los flujos piroclásticos y sus depósitos se encuentran hoy en día subyaciendo los mismos barrios descritos en el problema de los flujos piroclásticos. Futuras erupciones, si estuvieran acompañados de aguaceros o simplemente lluvias torrenciales podrían generar dichos lahares. Afortunadamente el volcán Misti carece de un casquete glacial, pero durante el invierno (Mayo a Octubre) cuenta con una cobertura de nieve en las partes altas.
- Se agrava el problema, por los cauces que cruzan a la ciudad, que deben servir como desagües principales para cualquier inundación o cualquier tipo de flujo proveniente de activación del Misti, sin embargo, actualmente se encuentran invadidos con construcciones, muros, basurales y han sido estrangulados de tal manera que dificulta el drenaje de los flujos, por no poder seguir fácilmente estos cauces, tales quebradas o torrenteras van a desbordarse y ocasionar inundaciones.
- Caída de piroclastos: En el pasado reciente el área de la ciudad ha sido afectada por caída de cenizas y lapilli de pómez, por ejemplo, la erupción del Huaynaputina en 1600 DC dejó unos 12 cm de ceniza de color blanco, la del

Misti de 1430 DC dejó unos 3 a 10 cm de ceniza negra y otra del Misti hace mil años dejó 50 cm de pómez, todas ellas depositadas en la ciudad y sus cercanías.

- **Avalanchas de escombros:** Generalmente asociados con el colapso o derrumbe del cono, han sucedido en la historia antigua del Misti, sin embargo todavía falta trabajo para confirmar si tales depósitos se originaron en el volcán Misti. No obstante el gran relieve topográfico del cono, casi 4000 m con respecto a la ciudad, es claro que este tipo de amenaza sea real y se debe intentar estimar su probabilidad aunque sea remota.
- **Gases Volcánicos:** Dada la gran altura del cráter y los vientos fuertes a esa altura (5,825 m.s.n.m), no representan mayor peligro porque serían dispersos rápidamente. Los constituyentes comunes investigados incluyen HCl, SH<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, entre otros.
- La ciudad de Arequipa, no se encuentra preparada en caso de ocurrir una erupción volcánica, no cuenta con calles o avenidas que permitan una rápida evacuación.

## **RECOMENDACIONES**

- Instalar una red telemétrica en el volcán Misti para detectar cualquier anomalía que pudiera presentar, de tal manera que de ocurrir una reactivación del mismo, los científicos den la voz de alarma a la población oportunamente.
- Instalar alarmas que indiquen la ocurrencia de flujos de lodo o de otro tipo de flujo, a lo largo del río Chili, una alarma podría ser en la Represa de Aguada Blanca, otra en la Hidroeléctrica de Charcani Vi, y la otra en la Hidroeléctrica de Charcani I.
- Se recomienda para la construcción de nuevas viviendas, los techos de dos aguas, para que tanto en épocas de lluvias y si ocurriera caída de tefras, estos caerían fácilmente evitando la acumulación y por consiguiente el colapso de los mismos.

- Es importante que la población este conciente del riesgo que corre al vivir en una zona volcánica, es decir que es necesario la preparación de la gente como se da en casos de sismos. (simulacros, etc).
- Se debe marcar las zonas aptas para la expansión urbana, ya que a la actualidad existen viviendas asentadas en los mismos causes de los ríos y quebradas, que durante el año se encuentran secos , pero en épocas de lluvia representan un gran riesgo de inundación, y peor aun si se trataría en caso de erupción volcánica ya que son las vías de flujo de los diferentes elementos volcánicos.
- Periódicamente se deben hacer monitoreos de las fumarolas del Misti y de las aguas termales ubicadas en las faldas del Misti por la Hidroeléctrica de Charcani II.
- Se debe revisar del plan de emergencia periódicamente, teniendo la participación de autoridades y científicos encargados.
- Las precauciones para afrontar antes, durante y después de la erupción volcánica deben ser difundidas a la población.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Agencia Nacional de Tierras del Gobierno del Japón, 1992, Guía Para Preparar Mapas de Peligro Volcánico.
- Ballón T., 1900, El Misti, Primer Festival del Libro Arequipeño.
- Ballón T., 1972, Paleomagnetismo de las Rocas volcánicas de Arequipa. Tesis de grado UNSA.
- Barriga, V., 1951, Los Terremotos de Arequipa (1582 – 1868) Editorial La Colmena S.A.
- Cárdenas A., 1972, Rocas Neovolcánicas de Arequipa. Tesis de grado UNSA.
- Chávez, J., 1992, La erupción del Volcan Misti. Pasado Presente y Futuro. Imprenta Zenit Arequipa.

- Corrales, L., 1902, El Clima y los Nevados de Arequipa. Imprenta San Pedro Lima.
- Espinoza F., 1986, Visita del Intendente Don Antonio Álvarez y Jiménez. Una Fuente Para la Historia de Arequipa. Tesis de grado UNSA.
- Flores A., 1977, Arequipa y El Sur Andino; Ensayo de la Historia Regional Siglos XVII-XX Editorial Horizonte Lima.
- García Z., Fredy, Baudemont, F. Chorwicz, J. Huaman, D. Parrot, J., 1997. Morfología cuantitativa y Morfo-estructural del Volcan Misti, Una Aplicación de la Topografía Digital a los Riesgos de Inestabilidad Volcánica (sur del Perú).
- Guevara C., 1969, Geología del Cuadrángulo de Characato. Boletín del Servicio de Geología y Minería, Bol. 23 Lima.
- Gutiérrez R., 1992, Evolución Histórica Urbana de Arequipa 1540 1990 Editorial Basco Arequipa.
- Hantke, G., and Parodi A., 1966, Catalogue of the Active Volcanoes of the World. Part. XIX: Colombia, Ecuador and Perú IAVCEI, Naples.
- Jenks W. 1948, Geología de la Hoja de Arequipa 1:200 000.
- Legros F., 1994, Evaluation des Riques éruptifs Application au Volcan el Misti (Axe Volcanique Sud-peruvien), Memorie de Deam Sciences de la Terre et de L'Atmosphere, Universite Blaise-Pascal.
- Legros F., 1996, Volcanes Activos del Perú. Editorial Colmena.
- Legros Francois, 1998. Tephrostratigraphic du Volcan Misti (Perou) et modelization des Ecoulements Pyroclastiques. Tesis de grado Universite Blaise Pascal (Clermont Ferrand II).
- Macedo, Luisa, 1994, Peligro volcánico Potencial del Misti. Convenio DHA-UNDRO/UNSA. Tesis de grado UNSA.
- Masias P., 1997, "El Misti", Biografia de un Volcan.

- Mendivil S., 1965, Geología de los Cuadrángulos de maure y Antajave. Comisión Carta Geológica Nacional, Boletín N° 10 (INGEMMET).
- Navarro C., Pedro, 2000. Cartografía Geológica, Histórico Eruptiva y Evaluación de las Amenazas volcánicas del Estrato-volcan Misti. Tesis de grado UNSA.
- Organización Local Para Situaciones de Emergencia, Centro de Colaboración Para Situaciones de Emergencia OMS-DGCS Roma 1991
- Parodi A., 1965, Volcanes: Revista de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Romero Z. Gilberto, Participación de la Población en la Prevención de Desastres, PREDES 1995.
- Suni Ch., Jaime, 1999. Estudio Geológico y Vulcanológico del volcan El Misti y sus alrededores. Tesis de grado UNSA.
- Thoured J., Legros F., Gourgaud A., Salas G., Juvigne E., Gilot E., Uribe M., Rodriguez A., 1995, Un Exemple de Prevision des Risques Volcaniques au Perou Meridional (Region d'Arequipa), Fonde sur L'etude de L'Activite Eruptive Recente du Estrato Volcan El Misti,
- Thoured J., Legros F., Navarro T., Suni J., Eissen J., 1997. Estratigrafía e Historia Eruptiva Reciente del Volcan Misti (sur del Perú), Aplicación a la Evaluación de las Amenazas volcánicas en el Área de Arequipa.