



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente



# **EVALUACIÓN DEL PELIGRO POR CAÍDA DE CENIZAS DEL VOLCÁN MISTI Y AFECTACIÓN AL DISTRITO DE MARIANO MELGAR**

(Región Arequipa)

Informe Técnico N°022-2021/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima – Perú  
Agosto, 2021

**Instituto Geofísico del Perú**

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Edmundo Norabuena

**Informe Técnico**

Evaluación del peligro por caída de cenizas del volcán Misti y afectación al distrito de Mariano Melgar - Arequipa

**Autores:**

Ivonne Lazarte Zerpa  
Luisa Macedo Franco  
Katherine Vargas Alva  
John Cruz Igme

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del Perú  
Calle Badajoz 169 Mayorazgo  
Teléfono: 51-1-3172300

**EVALUACIÓN DEL PELIGRO POR CAÍDA DE CENIZAS DEL VOLCÁN  
MISTI Y AFECTACIÓN AL DISTRITO DE MARIANO MELGAR  
-AREQUIPA-**

Lima – Perú  
Agosto, 2021

## **RESUMEN**

Las simulaciones de caída de ceniza usando modelos numéricos tienen como propósito predecir las zonas que podrían ser potencialmente afectadas por caída de ceniza en una ventana de tiempo definida. En este sentido, el uso del programa Ash3d ha permitido construir escenarios de peligro de caída de cenizas para tres procesos eruptivos del volcán Misti (vulcaniano, subpliniano y pliniano) con el objetivo de evaluar el nivel de afectación al distrito de Mariano Melgar, provincia y región Arequipa.

Ante una eventual erupción del volcán Misti, en cualquiera de los tres escenarios considerados en este estudio, el distrito de Mariano Melgar, ubicado en áreas consideradas cercanas al volcán, se vería afectado por la caída de cenizas. Estas áreas se encuentran en las zonas de PELIGRO ALTO debido a que las cenizas formarían capas con espesores máximos de 5 mm, en el caso de una erupción vulcaniana, y hasta 1 m en el caso de una erupción pliniana.

Asimismo, para escenarios eruptivos de tipo subpliniano y pliniano, la dirección predominante de los vientos es hacia el SE, dirección en el cual se encuentra emplazado el distrito de Mariano Melgar; por lo tanto, sería afectado por la caída de tefras. En este escenario, la vulnerabilidad del distrito aumenta debido a múltiples factores como la fragilidad y resiliencia, los cuales generarían pérdidas humanas, de infraestructura, económicas, problemas en salud, saneamiento e higiene, entre otras.

## **CONTENIDO**

### **RESUMEN**

#### **1.- INTRODUCCIÓN**

##### **1.1.- Objetivos**

#### **2.- PELIGROS VOLCÁNICOS**

##### **2.1.- Caída de tefras y proyectiles balísticos**

##### **2.2.- Erupción del volcán Misti**

#### **3.- EL DISTRITO DE MARIANO MELGAR**

#### **4.- EVALUACIÓN DEL PELIGRO POR CAIDA DE CENIZAS**

##### **4.1.- Modelo Ash3d**

###### **4.1.1.- Condiciones iniciales**

###### **4.1.2.- Transporte**

###### **4.1.3.- Caída de cenizas**

##### **4.2.- Parámetros de entrada para Ash3d**

###### **4.2.1.- Configuración de red y fuentes**

###### **4.2.2.- Parámetros de fuente para cada proceso eruptivo**

###### **4.2.3.- Opciones de vientos**

###### **4.2.4.- Opciones de salida**

###### **4.2.5.- Grupos de tamaño de grano**

##### **4.3.- Parámetros de entrada para posibles escenarios eruptivos**

###### **4.3.1.- Erupción del tipo vulcaniana**

###### **4.3.2.- Erupción del tipo subpliniana**

###### **4.3.3.- Erupción del tipo Pliniana**

## **5.- RESULTADOS**

5.1.- Erupción del tipo vulcaniana

5.2.- Erupción del tipo subpliniana

5.3.- Erupción del tipo Pliniana

## **6.- GESTION DEL RIESGO VOLCÁNICO**

6.1.- Percepción del riesgo volcánico

6.2.- Mitigación y reducción del riesgo volcánico

**CONCLUSIONES**

**RECOMENDACIONES**

**AGRADECIMIENTOS**

**BIBLIOGRAFIA**

## **1.- INTRODUCCIÓN**

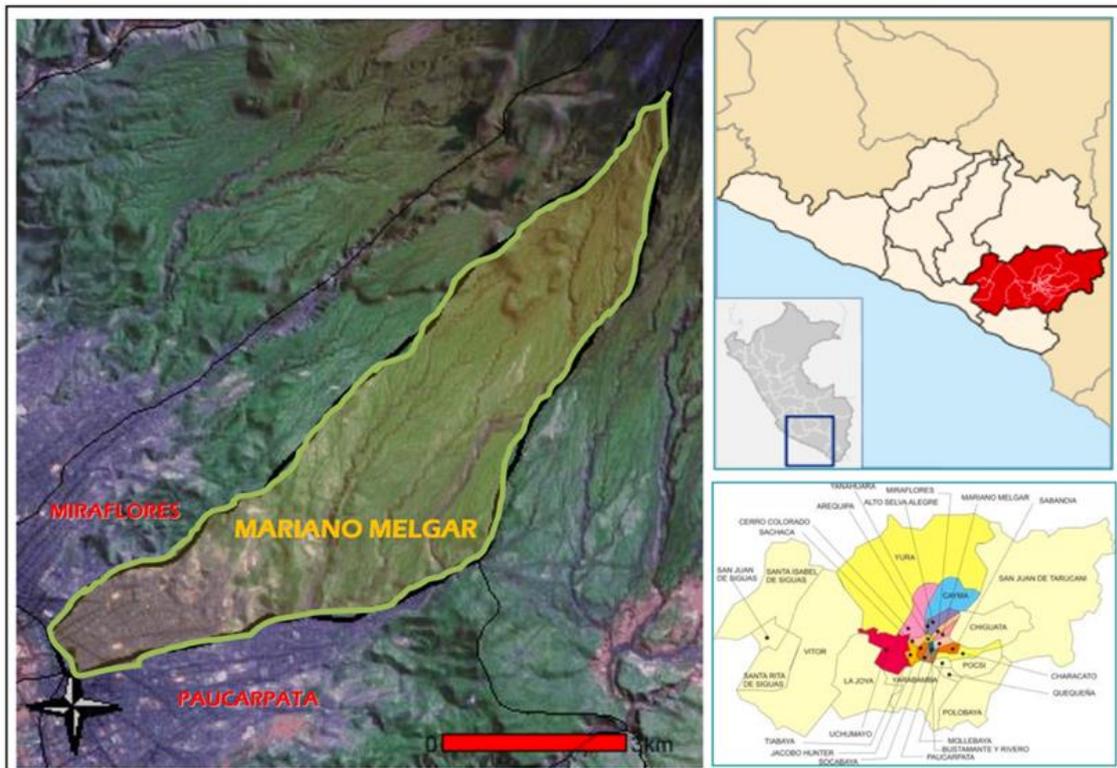
El volcán Misti, ubicado a 17 km al noreste de la ciudad de Arequipa, ha presentado durante los últimos 40 mil años actividad explosiva con erupciones que se han caracterizado por generar considerables depósitos de ceniza. En general, la caída de ceniza volcánica representa el peligro volcánico más extendido y, a su vez, el de mayor potencial de impacto económico en las comunidades cercanas a volcanes explosivos como es el caso del volcán Misti.

Durante el proceso eruptivo explosivo de un volcán, los fragmentos más grandes y pesados caen normalmente, debido a la gravedad, cerca del cráter; en cambio, la ceniza más fina puede ser arrastrada por el viento a distancias mayores afectando en gran medida a distritos ubicados dentro de un radio de 10 km. Este es el caso del distrito de Mariano Melgar.

El distrito de Mariano Melgar se encuentra ubicado al noreste de Arequipa Metropolitana, en la provincia y región de Arequipa. El distrito se sitúa entre los 2335 hasta 2480 m s. n. m (siendo el punto más bajo y el más alto, respectivamente) y limita por el norte con las estribaciones del volcán Misti (Figura 1). En el distrito residen cerca de 59 918 habitantes (datos del Censo de Población y Vivienda del Instituto Nacional de Estadística e Información-INEI de 2017), población que desarrolla sus actividades económicas en la ciudad de Arequipa y su salud se vería afectada por las cenizas volcánicas causando problemas respiratorios, síntomas oculares, irritación cutánea; además de sobrepeso en los techos de vivienda precarias que podrían llegar al colapso de los mismos.

A fin de cuantificar el peligro de cenizas para el distrito de Mariano Melgar, en este estudio se generarán simulaciones numéricas para conocer de altura de las nubes de cenizas y sus distancias de dispersión durante una

posible erupción del volcán Misti considerando tres escenarios: erupción vulcaniana (VEI-2), subpliniano (VEI 3-4) y pliniano (VEI 5). Estas simulaciones se realizaron con apoyo del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), a través de su programa Volcano Disaster Assistance Program (VDAP), como parte del convenio de cooperación interinstitucional vigente entre el IGP y dicha institución.



**Figura1.-** Mapa de ubicación geopolítica y límites del distrito de Mariano Melgar (Fuente: Municipalidad Distrital de Mariano Melgar).

La presente investigación está enmarcada en el proyecto “Dinámica de los productos volcánicos del Misti y análisis de la exposición y afectación en la población de la ciudad de Arequipa” y los resultados obtenidos serán de mucha importancia para el distrito de Mariano Melgar, debido a que contarán con insumos para la elaboración de sus planes de gestión de riesgo volcánico y atención de crisis volcánica asociadas al volcán Misti

## **1.1.- Objetivos**

El objetivo del presente estudio es la elaboración de tres escenarios de peligro por caída de ceniza ante una posible erupción del volcán Misti para el distrito de Mariano Melgar:

- Peligro por caída de ceniza del volcán Misti considerando una erupción tipo vulcaniano (VEI 1-2).
- Peligro por caída de ceniza del volcán Misti considerando una erupción tipo subpliniano (VEI 3-4)
- Peligro por caída de ceniza del volcán Misti considerando una erupción tipo pliniano (VEI 5).

Del mismo modo, se genera información para la evaluación del peligro alto, moderado y bajo debido a la ocurrencia de caída de cenizas provenientes del volcán Misti al distrito de Mariano Melgar. Esta información será de utilidad para las autoridades en la toma de decisiones y la elaboración de planes de contingencia.

## **2.- PELIGROS VOLCÁNICOS**

En general, los peligros volcánicos directos, desde el interior de un volcán son, las corrientes de lava, los domos de lava, las corrientes piroclásticas, las bombas volcánicas, las cenizas volcánicas, las emisiones de gases y los penachos. Desde la superficie del volcán, las corrientes de lodo y colapso del domo de lava. De presentarse una erupción del volcán Misti, las cenizas pueden alcanzar grandes distancias representando un peligro latente para cualquier área urbana, tal es el caso del distrito de Mariano Melgar.

### **2.1.- Caída de tefras y proyectiles balísticos**

Las tefras están constituidas por fragmentos de roca y lava que han sido expulsadas hacia la atmósfera y que ascienden por convección hasta que su densidad sea igual al de la atmósfera circundante, tras lo cual caen nuevamente sobre la superficie terrestre. Las tefras pueden alcanzar grandes distancias dependiendo de la dirección y la fuerza del viento (Tilling, 1989).

Las tefras varían de tamaño, desde cenizas (<2 mm) y lapilli (2-64 mm), hasta bloques y bombas (>64 mm) que pueden alcanzar diámetros de varios metros (Fisher, 1961). Con respecto a su densidad, esta puede variar desde pómez y escorias de baja densidad hasta cristales y fragmentos líticos muy densos (Tilling, 1989).

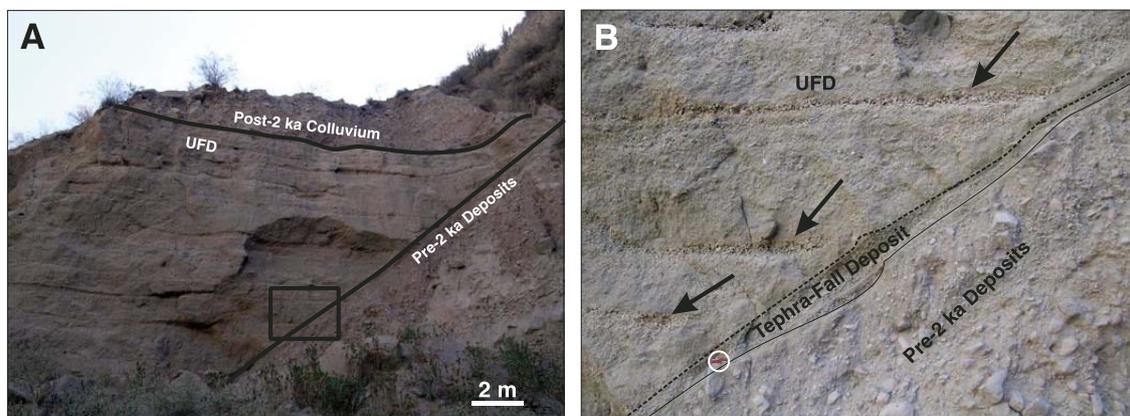
Asimismo, los depósitos de caída de tefras pueden variar según los tipos de erupciones volcánicas. Por ejemplo, durante grandes erupciones, las superficies pueden quedar cubiertas con una capa de ceniza de <10 cm; en tanto, la ceniza más fina puede ser arrastrada sobre áreas más extensas y distales del cráter del volcán. Como resultado, al incrementarse la distancia desde el centro de emisión, las tefras o cenizas presentan una disminución

en el tamaño de sus granos y la formación de depósitos más sesgados (Newhall, 1982).

Por otro lado, los proyectiles balísticos pueden ser expulsados del cráter a velocidades que pueden variar desde las decenas hasta las centenas de metros por segundo. Normalmente, los proyectiles están restringidos dentro de un radio de 5 km del centro de emisión (Blong, 1984).

## 2.2.- Erupciones del volcán Misti

El volcán Misti es uno de los 10 volcanes activos del Perú. Su cráter está ubicado a 17 km al noreste del centro histórico de la ciudad de Arequipa, donde habitan cerca de 1.1 millón de personas (INEI 2018). Durante los últimos 40 mil años, el volcán Misti ha presentado distintas erupciones explosivas que generaron considerables emisiones de ceniza (Figura 2).

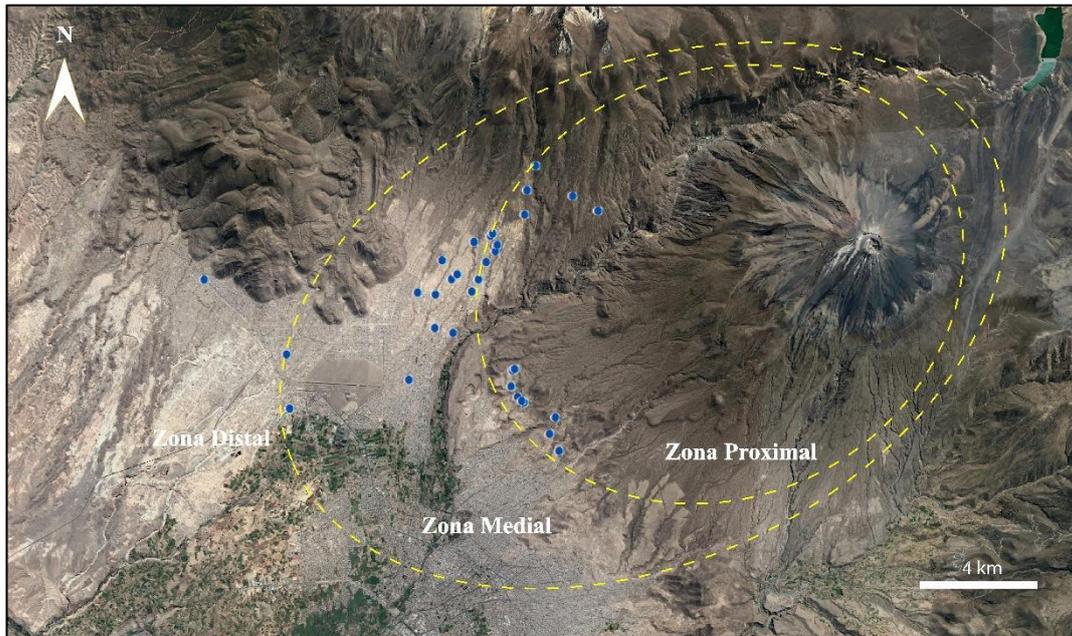


**Figura 2.-** Afloramientos de piedra pómez y cantos rodados a cielo abierto en la quebrada San Lázaro. A) Los contactos del lecho están delimitados por piedra pómez y guijarros. B) Muestra la imagen del recuadro indicado en (A). Las flechas indican lechos de piedra pómez; el círculo blanco encierra un cuchillo rojo de 10 cm de largo para escalar (Tomado de Harpel et al., 2011).

Estudios realizados en el volcán Misti muestran que las erupciones explosivas de tipo pliniana y subpliniana ocurrieron, en promedio, cada 2000 a 4000 años; mientras que, las caídas de cenizas ligadas a erupciones vulcanianas ocurrieron cada 500 a 1500 años en promedio (Thouret et al.,

2001). La última erupción pliniana del Misti ocurrió hace 2000 años AP y tuvo un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) de 5 (Harpel et al., 2011). Esta erupción generó una columna de ceniza y pómez de 30 km de altura que posteriormente dejó en la ciudad de Arequipa una capa de pómez.

La última erupción explosiva moderada del Misti ocurrió entre 1440-1470 d. C., generando un volumen de ceniza menor de  $6 \times 10^6 \text{ m}^3$  (Thouret et al., 2001). Asimismo, se ha identificado en superficie la presencia de al menos 14 depósitos de caída de ceniza de lapilli y pómez emplazados dentro de los últimos 35 mil años, 7 de los cuales fueron emitidos durante erupciones plinianas y subplinianas (Cacya et al., 2007).



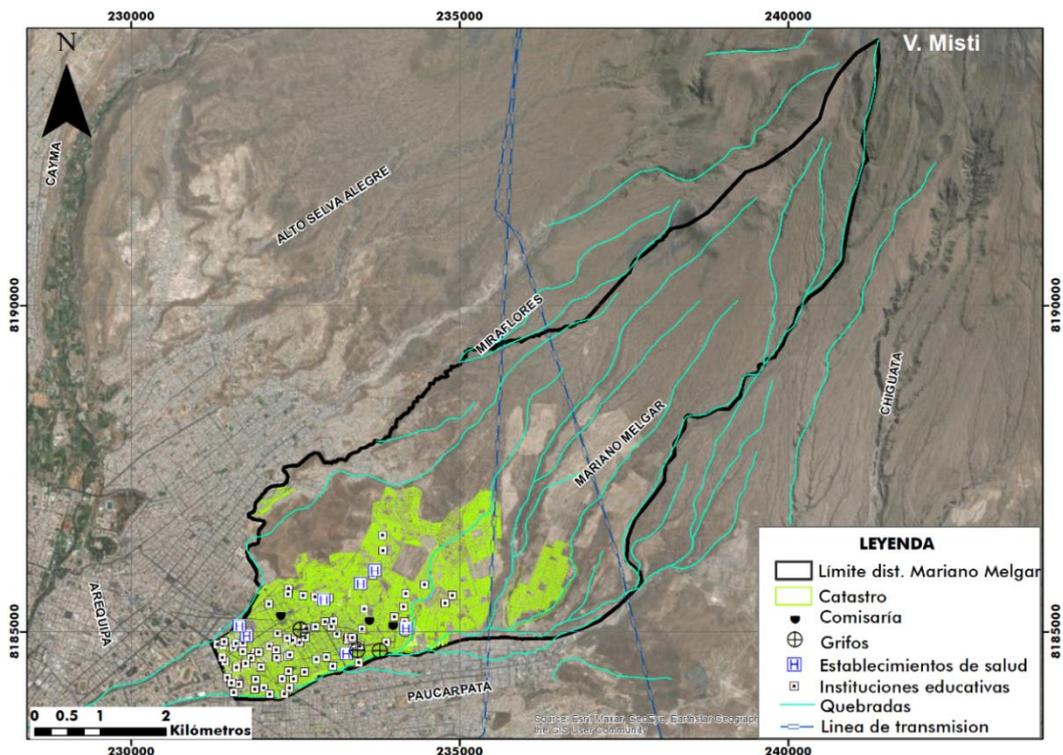
**Figura 3.-** División de la zona proximal, medial y distal para el depósito de piroclásticos "Sacarosa". En la figura, los puntos azules indican 33 afloramientos distribuidos al suroeste del volcán Misti (Tomado de Cuno et al., 2019)

Por otro lado, hace 33 mil años el volcán Misti registró una erupción explosiva que dejó depósitos de cenizas que afloran al sur y suroeste del volcán, específicamente en los distritos de Mariano Melgar, Alto selva Alegre, Cayma, Cerro Corolado y Yura (Figura 3). Estos depósitos tienen entre 0.8 a 1.20 m de espesor en una zona proximal entre 11 y 15 km; en la zona

medial, a más de 15 km, se encuentran depósitos de 40 a 80 cm de espesor y, en una zona distal, a más de 22 km, se hallan depósitos de 24 cm de espesor (Cuno et al., 2019).

### 3.- DISTRITO DE MARIANO MELGAR

El distrito de Mariano Melgar se encuentra ubicado al noreste de Arequipa Metropolitana, en la provincia y región de Arequipa. El distrito se encuentra a una altura de 2335 hasta 2480 m s. n. m (siendo el punto más bajo y el más alto, respectivamente) y limita por el norte con las estribaciones del volcán Misti. Este distrito se asienta en su parte baja en una planicie inclinada de baja pendiente y poco accidentada y, en su parte alta, sobre las estribaciones del volcán Misti (Figura 4), en una cadena montañosa de relieve accidentado cruzado por escorrentías y microcuencas de torrenteras ocupadas por la mayoría de los asentamientos humanos y pueblos jóvenes. En el distrito residen cerca de 59,918 habitantes (datos del Censo de Población y Vivienda del Instituto Nacional de Estadística e Información INEI de 2017), población que desarrolla sus actividades económicas en la ciudad de Arequipa.



**Figura 4.-** Ubicación del distrito de Mariano Melgar con respecto a la estructura del volcán Misti. Se muestra el límite distrital y la ubicación de los principales establecimientos públicos del distrito.

El distrito de Mariano Melgar presenta varios peligros de origen natural y antrópico como los debidos a la inestabilidad de los suelos en el área urbana del distrito ocasionado por la presencia de tufos volcánicos y la acción erosiva de las aguas presentes en temporadas de lluvias que arrastran materiales de las partes altas del volcán Misti.

Con respecto al clima, el distrito de Mariano Melgar presenta un clima continental, semidesértico por su cercanía al desierto de Atacama (Chile), con un promedio de precipitaciones pluviales bajo que se concentra en épocas estivales de verano, factores que crean sequedad atmosférica en otoño, invierno y primavera con gran variación diaria de temperatura.

Asimismo, la presencia de la cadena volcánica al norte y noroeste de la provincia de Arequipa, con una topografía que presenta cerros y colinas al suroeste de la ciudad, define un corredor como patrón de circulación de vientos superficiales de la ciudad de oeste a noroeste. Los vientos de gran altura van hacia el oeste en el día y al este por la noche.

## **4.- EVALUACIÓN DEL PELIGRO POR CAIDA DE CENIZAS**

La caída de ceniza representa el peligro volcánico de mayor potencial de impacto social, ambiental y económico para cualquier área urbana; por lo tanto, la construcción de escenarios de peligro por caída de cenizas resulta ser una herramienta eficiente para disponer de información técnica-científica que sustente la correcta gestión del riesgo de desastres. Para construir estos escenarios hoy en día, se hace uso de modelos numéricos para disponer de información cuantitativa para conocer la dispersión y caída de ceniza para una posible erupción del volcán Misti.

### **4.1.- Modelo Ash3d**

Ash3d es un modelo atmosférico euleriano tridimensional para el transporte, dispersión y deposición de tefra que se emplea para estudiar y pronosticar los peligros de las nubes de cenizas volcánicas y la caída de tefras. Ash3d modela el transporte de ceniza volcánica dividiendo la atmósfera en una cuadrícula tridimensional de células y calculando el flujo de masa a través de las paredes celulares.

Debe entenderse que durante la erupción de un volcán se inyecta tefra a un ritmo constante en la columna usando un campo de viento en tres dimensiones, dependiente del tiempo importado de un modelo numérico de predicción del tiempo. Asimismo, la advección y difusión de cenizas a favor del viento se calcula numéricamente con una tasa de difusión determinada por una difusividad especificada por el usuario. Las partículas de cenizas individuales caen a una velocidad determinada por su velocidad de sedimentación en el aire y se depositan cuando alcanzan la superficie del suelo (Mastin et al; 2009).

#### 4.1.1.- Condiciones iniciales

El modelo Ash3d calcula la dinámica en la que se inyecta tefra en una columna de nodos sobre el volcán. Los usuarios pueden especificar que la ceniza se concentre en una sola celda y se distribuya uniformemente a lo largo de la columna o verticalmente siguiendo la ecuación de Suzuki (1983):

$$\frac{dQ_m}{dz} = Q_m \frac{k^2 (1 - z/H) \exp(k(z/H - 1))}{H [1 - (1 + k) \exp(-k)]},$$

Dónde:

$Q_m$  = masa total de material emitido en un intervalo de tiempo dado a un tamaño de partícula dado.

$H$  = altura total de la pluma

$Z$  = elevación dada en la pluma y el factor de forma

$k$  = constante ajustable que controla la distribución de cenizas con altura

Un valor bajo de  $k$  se tiene una distribución de masa aproximadamente uniforme con la elevación; mientras que, los valores más altos concentran la masa cerca de la parte superior de la pluma. Asimismo, durante una erupción se logra que Ash3d inyecte tefra en estos nodos a un ritmo constante y de este modo, la distribución del tamaño de grano insertada en cada nodo de la columna es la misma en cada elevación y para cada pulso eruptivo.

#### 4.1.2.- Transporte

El modelo Ash3d resuelve la conservación de la masa en cada celda rastreando la concentración de masa  $q$  con el tiempo  $t$  de acuerdo a:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot ((\mathbf{u} + \mathbf{v}_s) q) - \nabla \cdot (K \nabla q) = Q,$$

Dónde:

$U$  = vector de viento 3-D

$V_s$  = velocidad de asentamiento

$K$  = difusividad

$Q$  = término fuente que es distinto de cero solo en la columna de nodos sobre el volcán.

Por defecto, el modelo Ash3d calcula la velocidad de sedimentación de cada tamaño de partículas no esféricas usando las ecuaciones de Wilson y Huang (1979). Los modelos alternativos que se pueden utilizar incluyen como opcional un factor de corrección de deslizamiento de Cunningham (Mastin et al; 2009). Asimismo, la difusividad  $K$  puede ser espacialmente variable y puede ser hecha en función de las condiciones meteorológicas locales. Se ha comprobado que las nubes modeladas coinciden bien con las observadas cuando  $K = 0$ ; por lo tanto, se consideró este valor para las simulaciones de escenarios de cenizas (Mastin et al; 2009).

#### **4.1.3.- Caída de cenizas**

Ash3d rastrea el flujo de masa de cada tamaño de grano a través de los límites de la celda y acumula un depósito una vez que las tefras caen a través del límite de la celda que representa la superficie del suelo en una ubicación particular.

### **4.2.- Parámetros de entrada para Ash3d**

#### **4.2.1.- Configuración de red y fuente**

Nombre del Volcán: Proyección cartográfica utilizada para los datos y las variables como *latlonflag* y *projflag* (lista de variables de parámetros de proyección). Estas variables describen la proyección utilizada tanto para los archivos de viento como para las coordenadas

de entrada. Actualmente, estos deben tener la misma proyección. Para un proyecto particular, se leen valores adicionales que definen la proyección.

#### **4.2.2.- Parámetros de fuente para cada pulso eruptivo**

Dentro de estos parámetros se considera los siguientes:

- *Hora de inicio (aaaa mm dd h.hh (UT)*
- *Duración (horas)*
- *Atura de la pluma, km sobre el nivel del mar*
- *Volumen erupción ( $\text{km}^3$  DRE)*

Si el año es 0, entonces el modelo se ejecuta en modo de pronóstico, donde mm dd h.hh son interpretados como el tiempo después del inicio del archivo de viento.

#### **4.2.3.- Opciones de viento**

Durante la ejecución del modelamiento, Ash3d leerá de un solo sondeo de viento 1-D o de datos de viento tridimensionales en cuadrícula, dependientes del tiempo, de acuerdo con el valor del parámetro *iwind*.

- *iwind, iwindFormat*
- *HeightHandler*
- *Tiempo de simulación en horas*

Detener el cálculo cuando el 99 % de la masa erupcionada haya depositado *nWindFiles* (archivos de viento); es decir, número de archivos de viento en cuadrícula (se usa si *iwind* > 1)

#### **4.2.4.- Opciones de salida**

Como salidas del modelamiento numérico, Ash3d, permite considerar lo siguiente:

- *Imprime el archivo ESRI ASCII del espesor del depósito final*
- *Escribe el archivo KML del espesor del depósito final*
- *Imprimir archivos de depósito ESRI ASCII en momentos específicos*
- *Escribir archivos de depósito KML en momentos específicos*
- *Imprimir archivos ASCII de concentración de nubes de cenizas*

#### **4.2.5.- Grupos de tamaño de grano**

En este bloque se especifica las clases de tamaño y cómo se calculan las velocidades de caída.

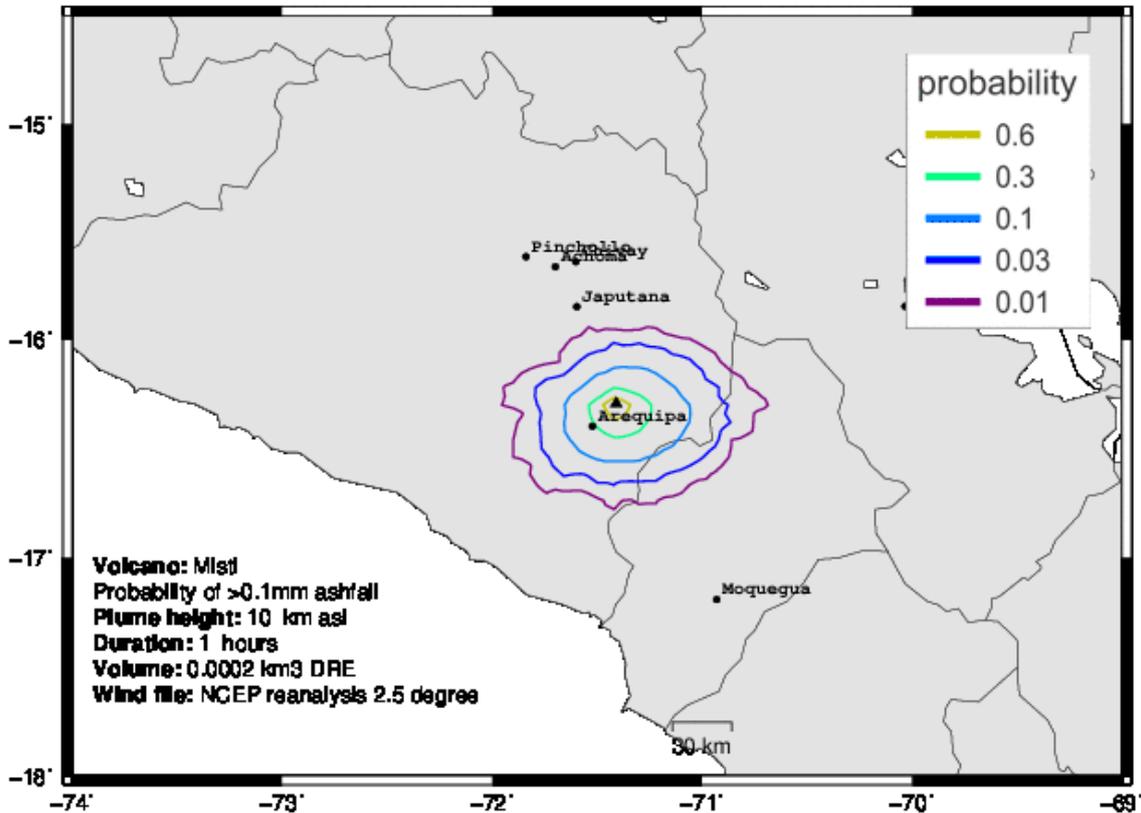
### **4.3.- Parámetros de entrada para posibles escenarios eruptivos**

En general, se realizaron 1000 simulaciones para cada escenario de posible erupción explosiva del volcán Misti muestreando al azar las condiciones del viento de acuerdo al registro histórico disponible para el distrito de Mariano Melgar, así como el software Ash3d. Los escenarios considerados en este estudio son:

#### **4.3.1.- Erupción de tipo vulcaniana**

Se consideró un volumen de ceniza de  $0.1 \text{ km}^3$  ( $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ ), volumen frecuente en pequeñas erupciones explosivas de tipo freáticas, freatomagmáticas y vulcanianas ( $IEV \leq 2$ ) como la presentada por el volcán Ubinas durante los últimos 1000 años (Thouret et al., 2005; Samaniego et al., 2020). También se consideró una altura de la pluma volcánica de 5 km. Estos resultados obtenidos para el volcán Misti muestran que las cenizas alcanzan distancias mayores a 30 km, siendo

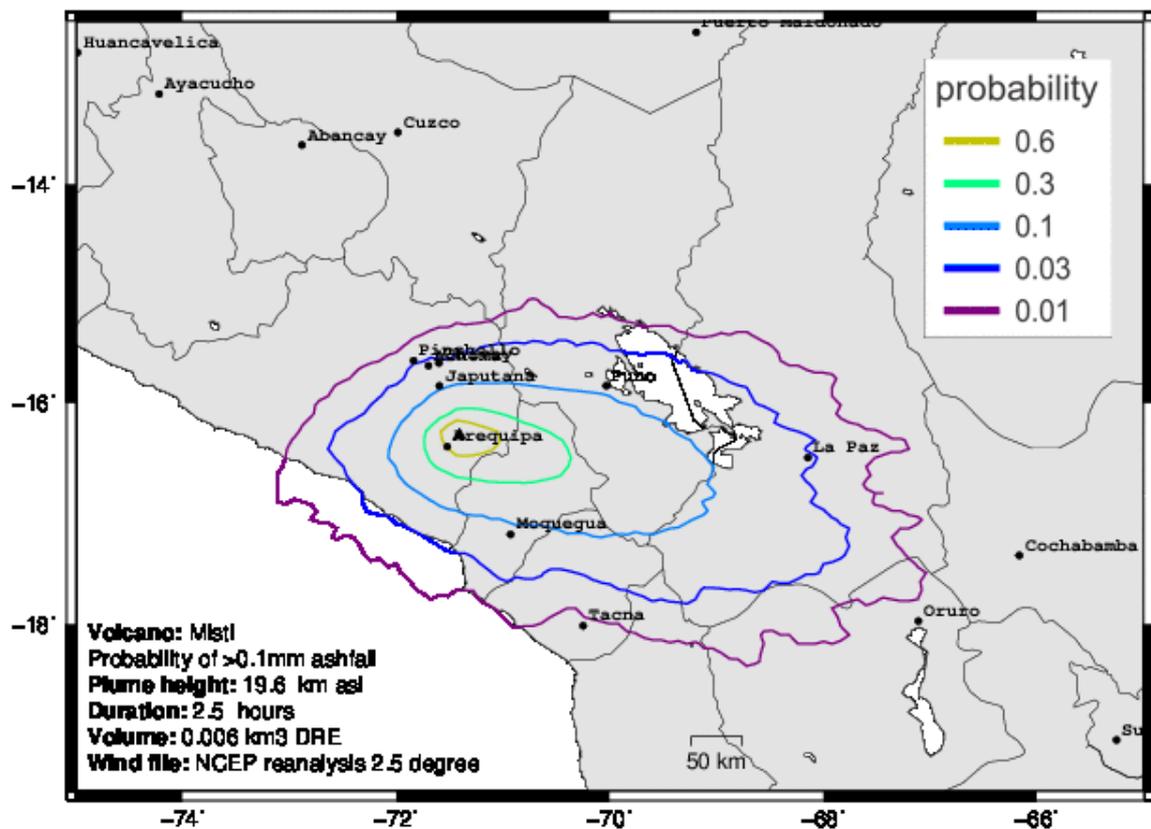
dispersadas predominantemente en dirección oeste, tomando como referencia la ubicación del volcán (Figura 5).



**Figura 5.-** Mapa de probabilidad por caída de cenizas del volcán Misti con espesores desde 0.1 mm para un escenario eruptivo tipo vulcaniano con VEI 1-2 (elaboración USGS, 2021).

#### 4.3.2.- Erupción de tipo subpliniana

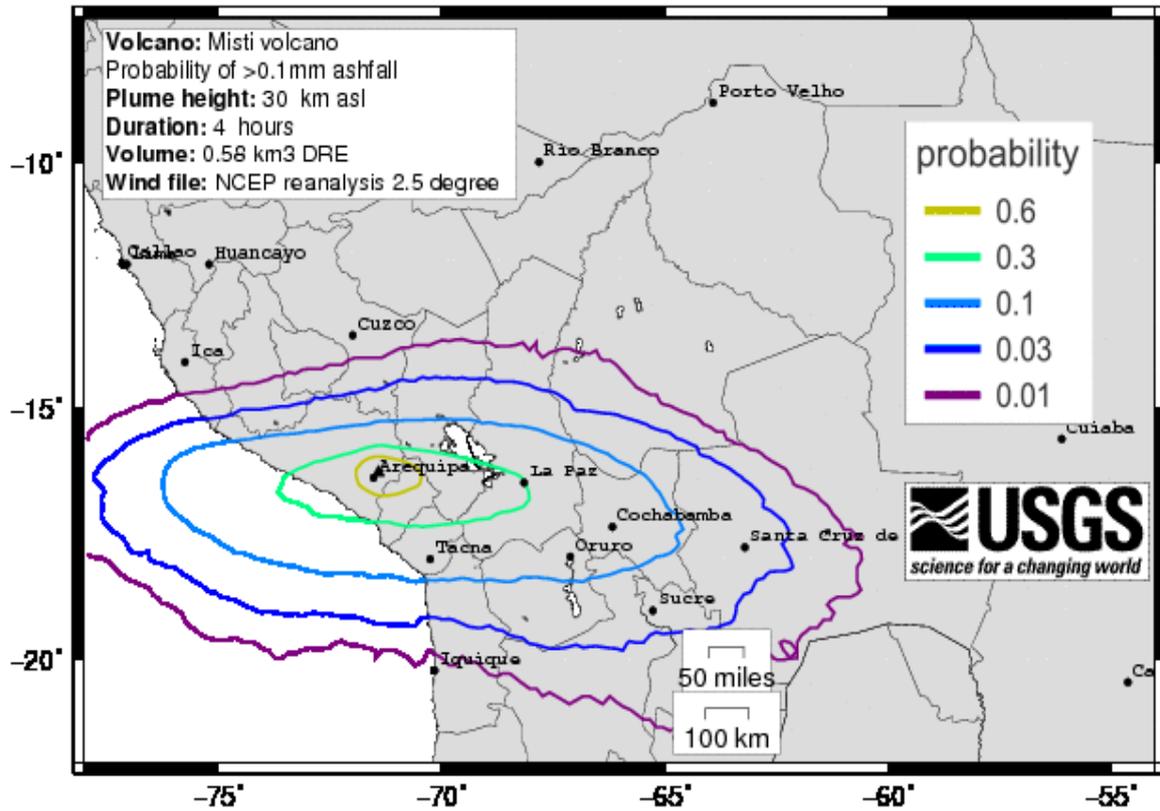
Se consideró un volumen de ceniza menor a 0.8 km<sup>3</sup> (8x10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>) basado en el último episodio explosivo subpliniano del volcán Chaiten (Chile) en el 2008 con ~1 km<sup>3</sup> y un IEV 4-5. También se consideró una altura de la pluma de 14 km con una duración de 2.5 horas (Folch et al., 2008). Estos resultados muestran que las cenizas alcanzan distancias mayores a 50 km.; siendo dispersadas predominantemente en dirección oeste, este y sureste, tomando como referencia la ubicación del volcán. (Figura 6).



**Figura 6.-** Mapa de probabilidad por caída de ceniza del volcán Misti con espesores desde 0.1mm y un escenario eruptivo tipo subpliniano con VEI 3- 4 (elaboración USGS, 2021)

#### 4.3.3.- Erupción de tipo Pliniana

Se considera un volumen de pómez emitido de  $1.4 \times 10^9$  m tomando como ejemplo el volumen de pómez emitido durante la erupción de hace 2000 años del volcán Misti (Harpel et al., 2011). Dicha erupción generó una pluma de pómez y ceniza de aproximadamente 30 km de altura y duración del orden de 4 horas. Estos resultados obtenidos muestran que las cenizas alcanzan distancias mayores a 100 km, siendo dispersadas predominantemente en dirección oeste, este y sureste tomando, como referencia la ubicación del volcán. (Figura 7).



**Figura 7.-** Mapa de probabilidad por caída de ceniza del volcán Misti con espesores desde 0.1mm y un escenario eruptivo tipo pliniano, con VEI 5-6 (elaboración USGS, 2020)

## **5.- RESULTADOS**

A continuación, se describen los resultados obtenidos del modelamiento de dispersión y caída de ceniza para una posible erupción del volcán Misti con afectación al distrito de Mariano Melgar sobre la base de 3 escenarios eruptivos: vulcaniano (VEI 1-2), subpliniano (VEI 3-4) y pliniano (VEI 5). Para este proceso, se consideró direcciones de viento predominantes al SE y SO del cráter del volcán Misti y los depósitos de cenizas obtenidos en cada escenario fueron correlacionados con la información contenida en la literatura histórica de anteriores erupciones del volcán Misti.

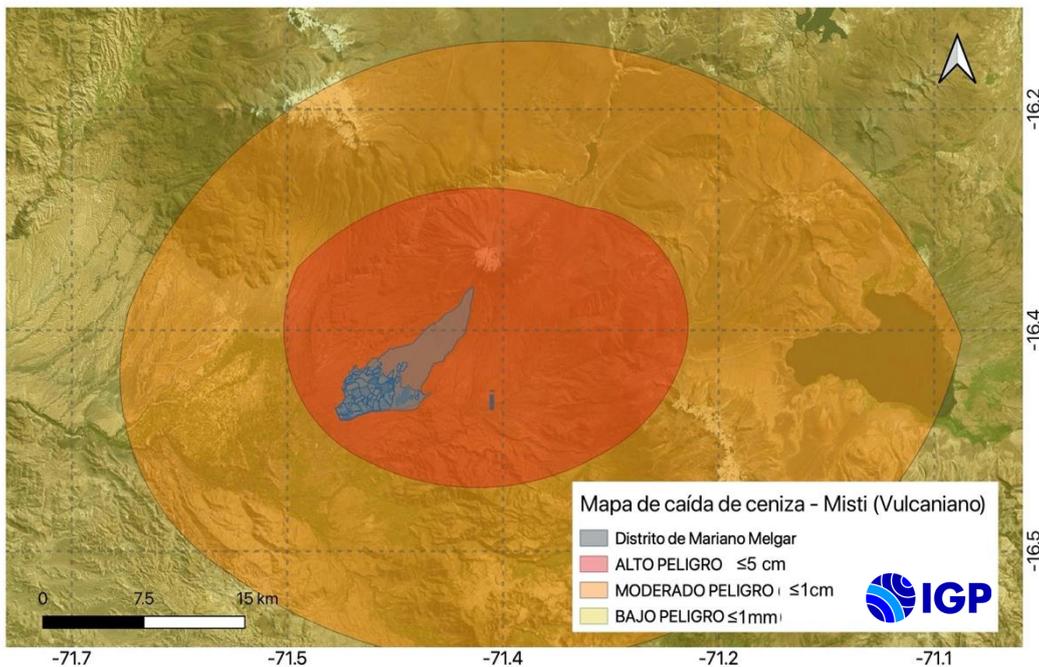
### **5.1.- Erupción de tipo vulcaniana**

Los resultados obtenidos para el modelamiento numérico de una erupción de tipo vulcaniana con un VEI 1-2, han sido clasificados en Peligro alto, Moderado y Bajo, siendo sus características las siguientes (Figura 8):

- **Peligro Alto:** considera la zona que puede ser afectada por caída de cenizas que formarían capas con espesores menores a 5 cm sobre un área proximal con radio de 10 km alrededor del volcán Misti. Estos valores son coherentes con los correspondientes a la erupción presentada por el volcán Misti entre los años 1440-1470 con un IEV-2 (Thouret et al., 2001).
- **Peligro Moderado:** considera la zona que puede ser afectada por caída de cenizas que formarían una capa con espesores de algunos centímetros a milímetros sobre un área con radio de 30 km alrededor del volcán Misti. Estos valores son coherentes con los correspondientes a la erupción del volcán Ubinas en los años 2006-2009 con IEV 2. Esta erupción dejó depósitos de ceniza con

espesores de 1 mm en un radio de 30 km del cráter del volcán Ubinas (Rivera et al., 2014).

- **Peligro Bajo:** considera la zona que puede ser afectada por caída de cenizas que formarían una capa con espesores menores a 1 mm sobre un área distal de radio igual a 60 km desde el volcán Misti. Estos valores son coherentes con los datos de la última erupción del volcán Ubinas del año 2019. Después de esta erupción, se identificaron capas de ceniza con espesores de 1 mm a más de 90 km (Aguilar et al., 2021).

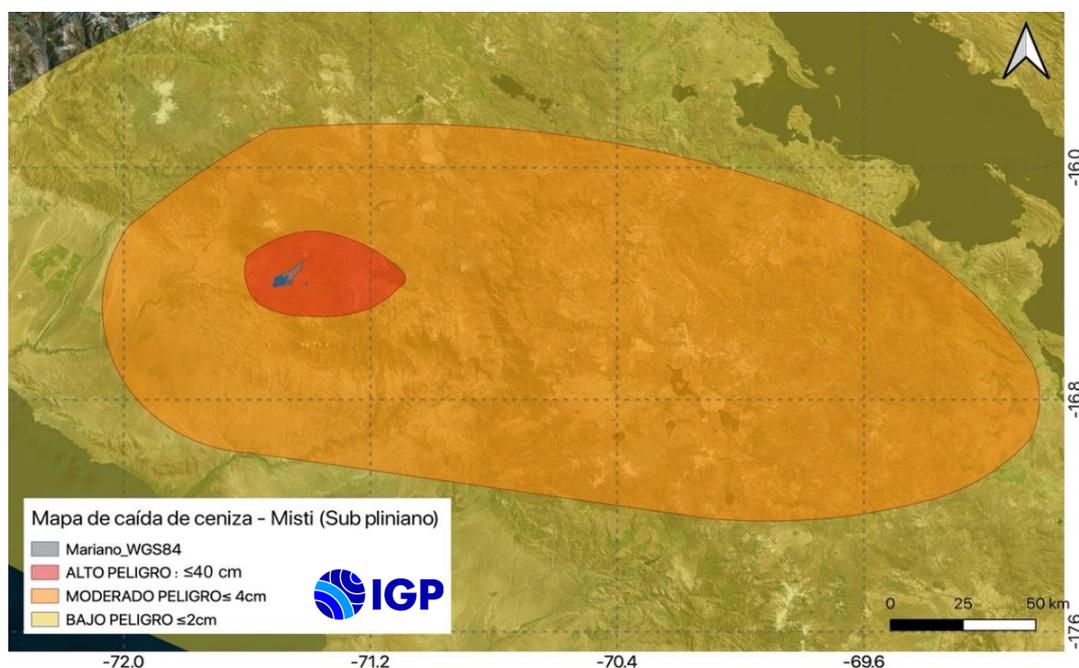


**Figura 8.-** Mapa de peligro por caída de ceniza del volcán Misti para un escenario eruptivo de tipo vulcaniano con VEI 1-2. El área en azul indica la ubicación del distrito de Mariano Melgar. Las zonas de peligro consideran cenizas en capas con espesores variables de 1 mm hasta 5 cm.

## 5.2.- Erupción de tipo subpliniana

Los resultados obtenidos corresponden a una erupción de tipo subpliniana con un VEI 3-4, siendo sus características las siguientes (Figura 9)

- **Peligro Alto:** corresponde a la zona que puede ser afectada por caída de ceniza y pómez que formarían una capa con espesores de hasta 40 cm sobre un área proximal de radio igual a 10 km alrededor del volcán Misti. Estos resultados son coherentes con los depósitos de ceniza correspondiente a la erupción subpliniana del volcán Yucamane (Tacna) ocurrida hace 3085 años AP. Después de esta erupción se observó la presencia de depósitos de cenizas de similar espesor en áreas aledañas a dicho volcán (Rivera et al., 2020).



**Figura 9.-** Mapa de peligro por caída de ceniza del volcán Misti para un escenario eruptivo de tipo subpliniano con VEI 3- 4. El área en azul indica la ubicación del distrito de Mariano Melgar. Las zonas de peligro consideran cenizas en capas con espesores variables de algunos milímetros hasta 40 cm.

- **Peligro Moderado:** corresponde a la zona que puede ser afectada por caída de cenizas que formarían capas de varios centímetros de espesor sobre un área de radio igual a 10 y 30 km de distancia del volcán Misti. Estos resultados son coherentes con la información basada en los depósitos emitidos por el Misti

durante erupciones subplinianas de hace 833 y 112 Ka (Cacya et al., 2007). Las cenizas alcanzaron una área medial de 10 a 23 km del volcán Misti.

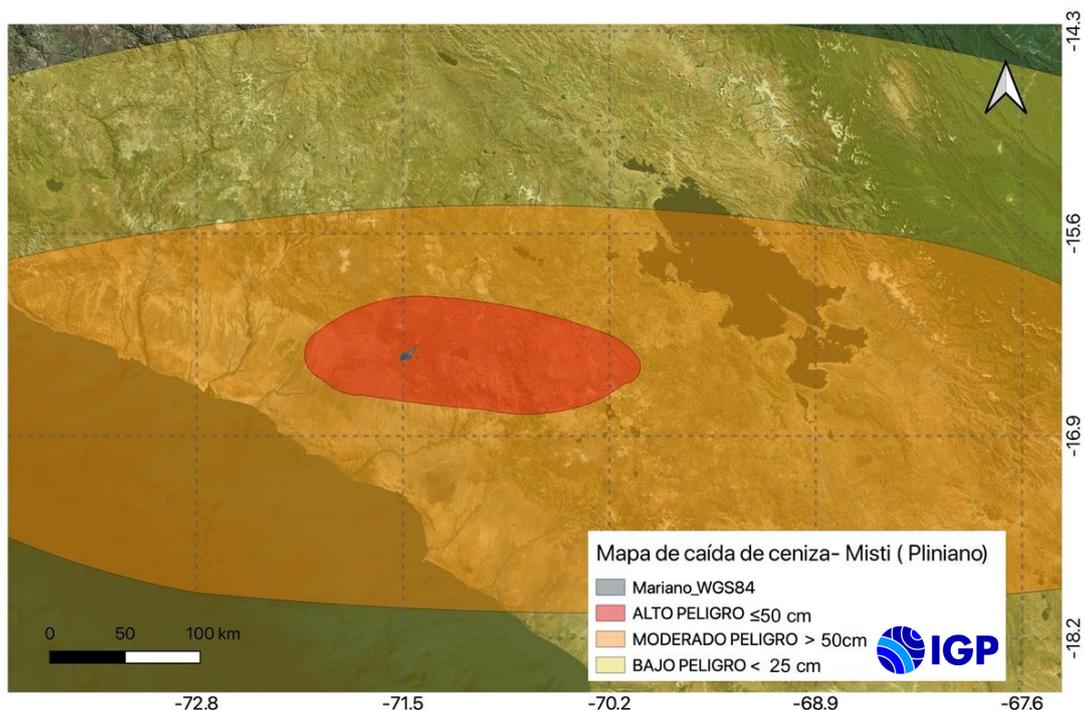
- **Peligro Bajo:** corresponde a la zona que puede ser afectada por caída de ceniza que formarían capas con espesores de algunos centímetros a varios milímetros sobre un área distal de radio entre 30 y 60 km de distancia del volcán Misti. Esta información es coherente con los depósitos de ceniza formados por el Misti hace 833 y 112 Ka (Cacya et al., 2007).

### **5.3.- Erupción de tipo pliniana**

Los resultados obtenidos corresponden a una erupción de tipo pliniana con un VEI 5-6, siendo sus características las siguientes (Figura 10):

- **Peligro Alto:** corresponde a la zona que puede ser afectada por caída de pómez y ceniza que formarían una capa de 1m a 50 cm de espesor sobre un área proximal con radio de 12 km alrededor del volcán Misti. Estos resultados son coherentes con los depósitos de cenizas correspondientes a la erupción pliniana del volcán Misti ocurrida hace 33,700 años. En esta erupción los depósitos de ceniza presentaron espesores de 1.20 cm en una zona proximal de radio entre 11 a 15 km al SO del volcán Misti (Cuno et al., 2019).
- **Peligro Moderado:** correspondería a una zona que puede ser afectada por caída de cenizas que formarían capas con espesores menores a 50 cm en un radio de 12 a 25 km de distancia del volcán Misti. Estos resultados son coherentes con los depósitos de ceniza de 40 a 80 cm de espesor hasta distancias de 15 km en dirección SO del volcán y que correspondería a la

erupción pliniana del volcán Misti ocurrida hace 33,700 años AP (Cuno et al., 2019).



**Figura 10.** - Mapa de peligro por caída de ceniza del volcán Misti para un escenario eruptivo tipo pliniano con VEI. El área de color azul indica la ubicación del distrito de Mariano Melgar. Las zonas de peligro consideran cenizas en capas con espesores variables de 50 cm hasta 1 m y 5 m.

- **Peligro Bajo:** correspondería a una zona que puede ser afectada por caída de cenizas que formarían capas con espesores de algunos centímetros hasta 25 cm sobre un área de radio entre 20 a 30 km de distancia del volcán Misti. Estos resultados son coherentes con los depósitos de cenizas de 8 a 40 cm de espesor formados durante la erupción pliniana del volcán Misti ocurrida hace 33,700 años AP. Estas capas fueron visibles a distancias mayores a 15 km en dirección SO del volcán (Cuno et al., 2019).

## **6.- GESTIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO**

La experiencia en emergencias volcánicas ha mostrado que es sumamente difícil mantener una percepción equilibrada del riesgo volcánico y que el nivel de conciencia depende fundamentalmente del tiempo transcurrido desde la última erupción devastadora en la misma región (UNESCO, 1987). En el caso del volcán Misti, la última erupción de gran magnitud ocurrió hace 2050 años y por lo tanto, debe aceptarse que en esos años no existía población circundante.

En el siglo XV, el volcán Misti presentó una erupción moderada de tipo vulcaniana ocasionando la destrucción de algunos poblados aledaños al volcán, así como la huida de indígenas hacia la ciudad de Cusco. Vestigios de esta erupción son los diferentes depósitos de caída de tefras encontrados en el entorno del volcán. Estas zonas serían afectadas por similares eventos eruptivos en el futuro con la misma frecuencia promedio presentada en el pasado. Actualmente, existe en la ciudad de Arequipa mucha población asentada en zonas de peligro volcánico.

### **6.1.- Percepción del riesgo volcánico**

Es importante entender que el riesgo es la posibilidad de pérdida de vidas humanas, propiedades, capacidades productivas, entre otros factores dentro de un área determinada sujeta a los peligros volcánicos (Tilling, 1989). En nuestro país, la falta de una cultura de prevención basada en estrategias sólidas y confianza entre actores se hace cada vez más notoria. En este sentido, las instituciones públicas y privadas deben esforzarse en realizar campañas de comunicación bien direccionadas que consideren el contexto del territorio, los conocimientos y las necesidades de información de los actores locales con la finalidad de fomentar confianza de las

comunidades y así mejorar todo el proceso sistemático que conlleva a la gestión del riesgo de desastres.

## **6.2.- Mitigación y reducción del riesgo volcánico**

Las medidas de prevención y reducción del riesgo se reconocen como aquellas que se realizan con anterioridad a la ocurrencia de un peligro que pueda generar desastres en áreas urbanas, con lo que se logra disminuir sus efectos. La prevención y reducción del riesgo es una acción que se realiza antes de ocurrir el peligro y requiere de la participación de todos los actores del SINAGERD, donde cada uno de ellos debe asumir el rol que les corresponde. Solo así se logrará el éxito esperado.

Una de las medidas importantes para la población que habita en áreas de peligro volcánico es la educación y sensibilización frente a la ocurrencia de una reactivación del volcán. Es necesario conocer el tipo de erupción que ha presentado anteriormente cada volcán, así como los probables escenarios eruptivos que podría presentar en el futuro. Esta información deberá ser considerada en los planes de emergencia.

Cuando la población se encuentra capacitada son mucho más efectivas las acciones de prevención, mitigación y atención de emergencias; sin embargo, estas capacitaciones deben ser realizadas por los funcionarios municipales acompañados de los profesionales de las instituciones de investigación como el Instituto Geofísico del Perú. Este trabajo conjunto permitirá contar con información verídica y confiable que pueda ayudar a construir y entender estos procesos.

Por otro lado, es importante entender que los centros responsables del monitoreo volcánico, en el caso del Perú el Centro Vulcanológico Nacional del Instituto Geofísico del Perú, emitirán reportes o información con anterioridad al desarrollo del proceso eruptivo de un volcán. Por ello, la

práctica de simulacros de evacuación es un ejercicio eficiente que debe ejecutarse con regularidad. Por ejemplo, para el caso del distrito de Mariano Melgar, con una población de aproximadamente 59,918 habitantes, se debe considerar el número de vehículos necesarios para trasladar a la población en riesgo a zonas seguras, además de la logística que esta actividad demanda.

La información contenida en este informe técnico-científico permitirá disponer de insumos para realizar la tarea de prevención y, con ella, planificar otras que permitan en el tiempo reducir el riesgo de la población ante una posible erupción del volcán Misti. Los escenarios construidos para peligros como avalanchas de escombros, flujos de lava, flujos piroclásticos y caída de cenizas deben ayudar a proyectar la ejecución de proyectos para mejorar el crecimiento urbano y construcción de obras vitales que permitan el crecimiento sostenible y seguro del distrito.

## **CONCLUSIONES**

Las simulaciones de caída de ceniza usando modelos numéricos tienen como propósito predecir las zonas que podrían ser potencialmente afectadas por caída de ceniza en una ventana de tiempo definida. De presentarse una eventual erupción del volcán Misti, en cualquiera de los tres escenarios considerados en este estudio, el distrito de Mariano Melgar, ubicado en áreas consideradas cercanas al volcán, se vería afectado por la caída de ceniza. Estas áreas se encuentran en las zonas de PELIGRO ALTO debido a que las cenizas formarían capas con espesores máximos de 5 mm, en el caso de una erupción vulcaniana, y hasta 1 m en el caso de una erupción pliniana.

Además, según los resultados obtenidos en este estudio, para escenarios eruptivos de tipo subpliniano y pliniano, la dirección predominante de los vientos es hacia el SE, dirección en el cual se encuentra emplazado el distrito de Mariano Melgar; por lo tanto, sería propenso a ser afectado por la caída de tefras. En este escenario, la vulnerabilidad del distrito aumenta debido a múltiples factores como la fragilidad y resiliencia, los cuales generarían pérdidas humanas, de infraestructura, económicas, problemas en salud, saneamiento e higiene, entre otras.

Los resultados obtenidos en el presente estudio representan una contribución para la elaboración de planes de desarrollo y planificación urbana, además que proveen insumos para el desarrollo de un plan de contingencia para el distrito de Mariano Melgar en caso de una posible erupción del volcán Misti.

## **RECOMENDACIONES**

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, es necesario recomendar a las autoridades municipales considerar dentro de sus actividades culturales la educación y sensibilización de la población sobre los peligros volcánicos. Esto permitirá propiciar, a futuro, una mejor acción para la atención de una emergencia volcánica que pudiera presentarse ante una posible erupción del volcán Misti.

Asimismo, es necesario que las autoridades y población estén continuamente informadas sobre el comportamiento dinámico del volcán Misti. La información oficial del Estado peruano es emitida por IGP a través del Centro Vulcanológico Nacional ([https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanológico-nacional/](https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/)).

## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestro agradecimiento al Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) a través de su programa *Volcano Disaster Assistance Program* (VDAP) por realizar las simulaciones de emisiones de ceniza usando el algoritmo Ash3d. Asimismo, a las autoridades de la Municipalidad Distrital de Mariano Melgar por el esfuerzo hecho para disponer del catastro actualizado al año 2019, siendo este insumo base para la ejecución del presente estudio en el marco del proyecto “Dinámica de los productos volcánicos del Misti y análisis de la exposición y afectación en la población de la ciudad de Arequipa”.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Aguilar, R., Ortega, M., Manrique, N., Apaza, F., Rivera, M., Harpel, C., (2011). Characteristics of beginning of the 2019 eruptive crisis at Ubinas volcano ESSOAr <http://doi.org/10.1002/essoar.10501253.1>
- Blong, R. J. (1984). Some effects of tephra falls on buildings, in *Tephra Studies*, edited by S. Self and R.S.J. Spark, pp.
- Cacya, L., J. Mariño, M. Rivera, J-C Thouret (2019). Estudio de la erupción pliniana del volcán Misti ocurrida hace 33.7 mil años ap, que emplazó el depósito sacarosa en la ciudad de Arequipa.
- Cuno J., Harpel, C.J., M. Rivera, F. García (2018). Estudio preliminar de la (21,000-11,000 años AP).
- Fisher, R. V. (1961). Proposed classification of volcanoclastic sediments and rock, *Geol. Soc. Amer. Bull* 72, 1409-1414.
- Folch, A., Jorda O., Viramonte J. (2008). Volcanic ash forecast – application to the May 2008 Chaitén eruption. Buenos Aires 177, 4400 Salta, Argentina.
- Harpel, C.J., Cuno, J.J., Cueva, K., Japura, S., Cabrera, M., Soncco, Y., Rivera, M., (2011). Tefroestratigrafía preliminar de erupciones explosivas del volcán Misti (Arequipa, Perú) desde la Autopista y sus implicaciones para los peligros volcánicos. *Foro Internacional: Los Volcanes y su Impacto, Arequipa, Perú*.
- Mastin, L.G., Guffanti, Marianne, Ewert, J.E., and Spiegel, J. (2009), Preliminary spreadsheet of eruption source parameters for volcanoes of the world: U.S. Geological Survey Open-File Report 2009-1133, v. 1.2, 25 p. [<https://pubs.usgs.gov/of/2009/1133/>].
- Newhall, C.G. (1982). A method for estimating intermediate – and long-term risks from volcanic activity, with an example from Mount St. Helens, Washinton, U.S Geol. Surv. Open – File Report 82-396, 59''.

- Rivera M., Thouret Jean., Samaniego P., Le Pennec J. (2014).. The 2006-2009 activity of the Ubinas volcano (Perú): Petrology of the 2006 eruptive products and insights into genesis of andesite magmas, magma recharge and plumbing system). <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.11.010>
- Rivera M., Samaniego P., Vela J., Le Pennec J., Guillou H., Paquette JL., Liorzou (2020). The eruptive chronology of the Yucamane-Calientes compound volcano: A potentially active edifice of the Central Andes (southern Peru). <https://doi:10.1016/j.jvolgeores.2020.106787>
- Samaniego, P., Rivera, M., Manrique, N., Schiavi, F., Nauret, F., Liorzou, C. & Ancellin, M.-A. (2020). Linking magmatic processes and magma chemistry during the post-glacial to recent explosive eruptions of Ubinas volcano (southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 407, 107095. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107095>
- Suzuki, T. (1983), A Theoretical model for dispersion of tephra, in *Arc Volcanism: Physics and Tectonics*, edited by D. Shimozuru and I. Yokoyama, pp. 95-113, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo.
- Tilling, R.I. (1989). Introduction and Overview. In *Volcanic Hazards*, R.I. Tilling (Ed.). <https://doi.org/10.1029/SC001p0001>.
- Thouret, J.C.; Rivera, M.; Worner, G.; Gerbe, M.; Finizola, A.; Fornari, M.; Gonzales, K. (2005). Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Peru. *Bulletin of Volcanology* 67; 557-589.
- Thouret, J.-C., Finizola, A., Fornari, M., Legeley-Padovani, A., Suni, J., and Frechen, M., (2001). Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru: *Geological Society of America Bulletin*, 113, 1593–1610.
- UNESCO, (1987). *Manejo de emergencias volcánicas*.- 82 págs, UNDRO UNESCO, New York.
- Wilson, L., and T. C. Huang (1979). The influence of shape on the atmospheric settling velocity of volcanic ash particles, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 44, 311-324.

